



TÜRK
AKUSTİK
DERNEĞİ



İstanbul
Bilgi Üniversitesi



ULUSAL AKUSTİK KONGRESİ

BİLDİRİLER KİTABI

● 2020'NİN

ARDINDAN

SESLER &
SESSİZLİK

Depremler

Protestolar

Covid-19

7-8 EKİM 2021. İSTANBUL BİLGİ ÜNİVERSİTESİ

Editörler

Ayça Şentop Dümen

Sezin Nas

Konca Şaher



hiperyayın

14. ULUSAL AKUSTİK KONGRESİ BİLDİRİLER KİTABI
2020’NİN ARDINDAN SESLER, SESSİZLİK
“Depremler, Protestolar, Covid-19”

Editörler

Ayça Şentop DÜMEN - Sezin NAS - Konca ŞAHER

Hiper Yayın 864

Araştırma-İnceleme

Editörler

Ayça Şentop DÜMEN- Sezin NAS- Konca ŞAHER

Genel Yayın Yönetmeni

Hatice BAHTİYAR

Mizanpaj

Senem ILGIN

Kapak Tasarım

Yaren AKSAKAL

Yayıncı Sertifika No: 16680

ISBN: 978-625-7499-63-7

e- ISBN: 978-625-7499-64-4

1. Baskı: İstanbul, 2021

Copyright© Tüm hakları saklıdır. Bu kitabın telif hakları, 5846 sayılı yasanın hükmüne göre, kitabı yayımlayan Hiperlink Eğitim İletişim Yay. Gıda. San. ve Tic. Ltd. Şti. ve Ayça Şentop DÜMEN- Sezin NAS- Konca ŞAHER'e aittir. Yayıncının ve yazarın izni olmaksızın elektronik ve mekanik herhangi bir kayıt sistemi veya fotokopi ile çoğaltılamaz, kopyalanamaz. Ancak kaynak gösterilerek kısa alıntı yapılabilir.

Her hakkı mahfuzdur. Bu kitapta yayımlanan yazıların etik, bilimsel ve hukuki sorumluluğu yazar(lar)a aittir. Yayınevi uluslararası bir yayınevidir.

Baskı-Cilt: Yalın Yayıncılık-Sertifika No: 44154

GENEL SATIŞ PAZARLAMA VE YAYINEVİ

Hiperlink Eğt İlet. Yay. Gıda San. ve Paz. Tic. Ltd. Şti

Tozkoparan Mah. Haldun Taner Sok. Alparslan İş Merkezi

No: 27 Kat: 6 D: 21 Merter- Güngören / İstanbul

Telefon: 0212 293 07 05-06 Faks: 0212 293 56 58

www.hiperlink.com.tr / info@hiperlink.com.tr

Ayça ŞENTOP DÜMEN

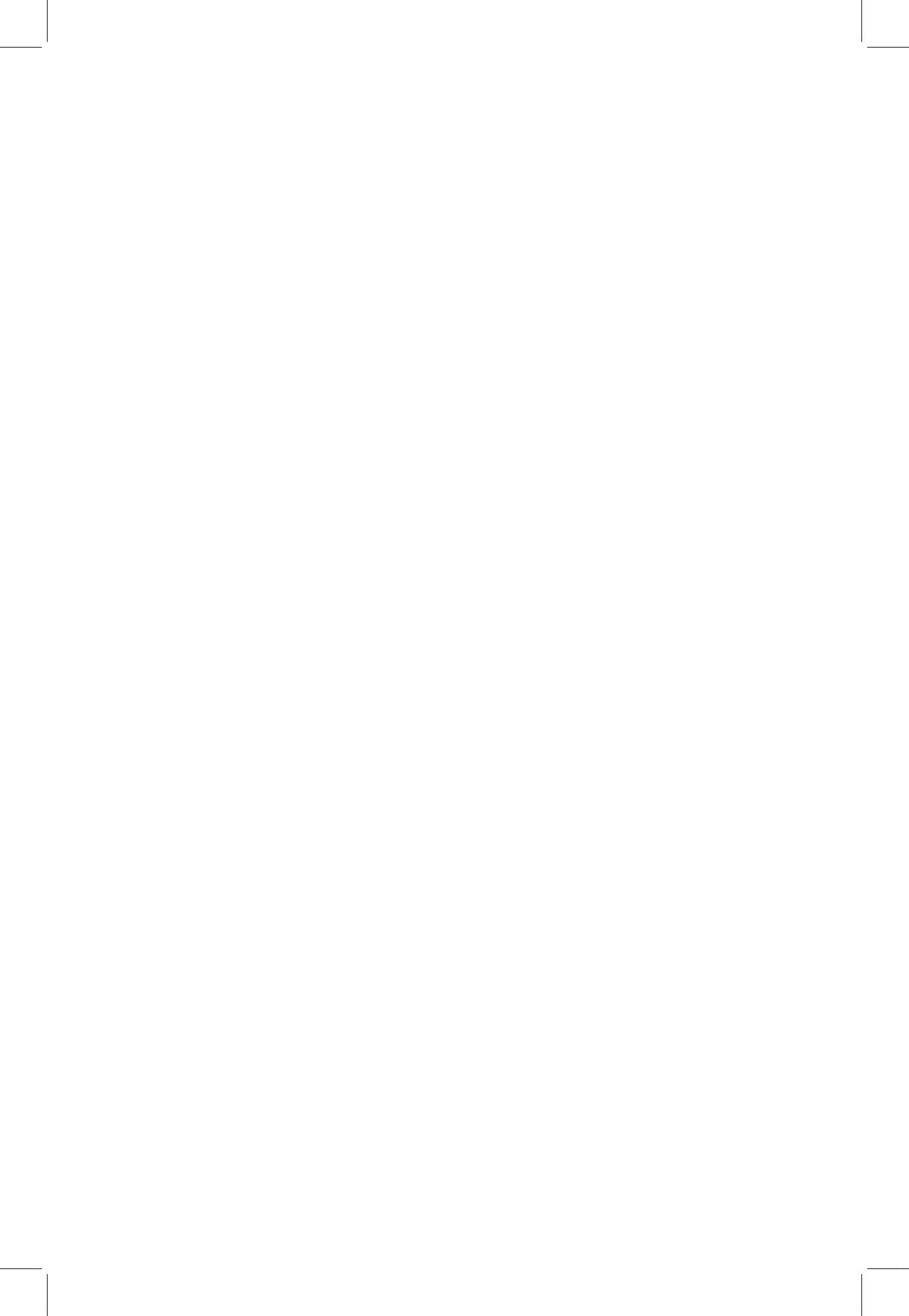
Ayça Şentop Dümen, İstanbul Teknik Üniversitesi'nde mimarlık lisans eğitimini takiben aynı üniversitede bina akustiği alanında yüksek lisans (2013) ve doktora (2020) çalışmalarını tamamlamıştır. Binalarda ses yalıtımını sağlamaya yönelik yapı elemanı tasarımı, akustik performans, akustik ölçümler ve subjektif algı konularında çalışmalar gerçekleştirmiştir. Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik'in hazırlanması projesinde (2014) ve uygulama kılavuzunun hazırlanmasında (2018) uzman olarak yer almıştır. 2019'da Aalborg Üniversitesi - Bina Araştırma Merkezi'nde misafir araştırmacı olarak bulunmuştur. Aynı yıl ASA'nın Uluslararası Öğrenci Ödülü'ne hak kazanmıştır. Pek çok bilimsel etkinlik organizasyonunda yer almış, çalıştaylar düzenlemiştir. Çeşitli projelerde akustik danışmanlık yapmış ve kurucu ortağı olduğu Acoustic-HUB ile faaliyet göstermiştir. 2013 yılından beri İstanbul Bilgi Üniversitesi, İç Mimarlık Bölümü'nde çalışmaktadır. 2018'den beri Türk Akustik Derneği'nin yönetim kurulunda görev yapmaktadır.

Sezin NAS

Sezin Nas, Kadir Has Üniversitesi İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü lisans derecesini 2017 yılında, Yıldız Teknik Üniversitesi Proje Yönetimi Tezsiz Yüksek Lisans Programı'nı 2018 yılında tamamlamıştır. Aynı yıl Marmara Üniversitesi İç Mimarlık Anasanat Dalı'nda tezli yüksek lisansa başlamıştır. Eğitim yapılarında aydınlatma ve akustik alanlarında çalışmalar yürütmektedir. Yüksek lisans eğitimi süresince kısa dönemlerde sektörde tasarımcı olarak çalışmıştır. 2019 yılı itibariyle Türk Akustik Derneği'nin düzenlemiş olduğu eğitim, seminer ve kongrelere koordinatörlük desteği vermektedir. 2021 Eylül ayı itibariyle Işık Üniversitesi İç Mimarlık Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.

Konca ŞAHER

Konca Şaher, lisans (1998) ve yüksek lisans (2001) derecelerini ODTÜ Mimarlık Bölümü'nden mimari akustik alanındaki doktora derecesini de (2013) Delft Teknoloji Üniversitesi'nden almıştır. Delft Teknoloji Üniversitesi (2002-2007) ve Danimarka Teknik Üniversitesi'nde (2005-2006) araştırmacı olarak, 2007-2013 yılları arasında da dünyanın önemli tasarım ve mühendislik şirketlerinden biri olan ATKINS'in Londra ofisinde akustik danışman olarak çalışmıştır. Türkiye ve dünyanın çeşitli yerlerinde konut projeleri, sağlık kurumları, okullar, oditoryumlar, havaalanları, tren ve metro istasyonları, ofisler için bina ve hacim akustiği hesaplamaları ve planlamada çevresel gürültü etkisi değerlendirme olmak üzere çok çeşitli projelerde danışman olarak çalışmıştır. Çalıştığı projeler arasında Londra 2012 Olimpik ve Paralimpik Oyunları Geçici Müsabaka Alanlarında çevresel gürültü ve yapı akustiği danışmanlığı, King Abdülaziz Uluslararası Havalimanı akustik danışmanlığı ve Çevresel Gürültü Direktifinin Uygulama Kapasitesi için Teknik Yardım projesinde yerel uzman görevleri sayılabilir. Araştırma alanları arasında hacim ve bina akustiği, akustik ölçüm ve simülasyonlar, hacim ve yapı akustiği ölçümleri, modelleme ve akustik konfor değerlendirmesi, farklı kullanıcılar için (yetişkinler, çocuklar, işitme engelli bireyler) akustik kriterlerin değerlendirilmesi ve kentsel planlamada çevresel gürültü etkisi hesaplama, değerlendirme ve raporlama yer almaktadır. 2014 yılından beri Kadir Has Üniversitesi İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü'nde çalışmaktadır. 2018'den beri Türk Akustik Derneği'nin yönetim kurulunda görev yapmaktadır.



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	13
DEPLASMAN: MÜZİK YAPMA PRATİKLERİNDE KALICI BİR YURTSUZLAŞMAYA DOĞRU..	15
Tolga Tüzün	
PANDEMİDE VE PANDEMİYE RAĞMEN PERFORMANS SES VE MEKAN.....	17
Cevdet Ereğ	
SESLER VE POLİTİKA: PANDEMİDE SOKAĞI DİNLEMEK	19
KEŞİLEN ALKIŞLAR, YÜKSELEN SELALAR.....	21
Görkem Özdemir	
KÜRESEL SALGIN, SES PEYZAJI VE KİŞİSEL NOTLAR	23
Gürkan Maruf Mihçı, Ayça Şentop Dümen, Konca Şaher	
AFET ANINDA İNSANSIZ HAVA ARACI İLE ÇIĞLIK SESLERİNİN SAPTANMASI	27
Macarena Varela	
DEPREM SIRASINDAKİ TİTREŞİMLERİN YERÇEKİMİ İVMESİ ÖLÇER İLE GÖZLENMESİ	29
Baki Karaböce	
TÜRKİYE'DE MİMARLIK VE İÇ MİMARLIK EĞİTİMİNDE AKUSTİK DERSLERİNİN GÜNCEL DURUM İNCELENMESİ.....	31
Sezin Nas, Hakika Sezgin	
MİMARİ AKUSTİK ALANINDA GELİŞİM/DEĞİŞİM DAVRANIŞININ ARAŞTIRMALAR ÜZERİNDEN DEĞERLENDİRİLMESİ	43
Duygu Özel Güney, Çiğdem Tekin	
İŞİTSEL PEYZAJ YAKLAŞIMININ MİMARİ SÜREÇ İLE İLİŞKİLENDİRİLMESİ ÜZERİNE BİR ÖN MODEL ÇALIŞMASI.....	69
Uğur Beyza Erçakmak Osmalı, Papatya Nur Dökmeci Yörüköğlü	
İÇ MİMARLIK EĞİTİMİNDE SESİN BİR TASARIM ELEMANI OLARAK ELE ALINMASI: İŞİTSEL PEYZAJ ÇALIŞTAYI DENEYİMİ.....	81
Kıvanç Kitapçı, Papatya Nur Dökmeci Yörüköğlü	
RÜZGAR TÜRBİNİ GÜRÜLTÜSÜNÜN ÇGDYY KAPSAMINDA DEĞERLENDİRİLMESİ	91
M. Akif EMEKLİ, Burak Ahmet TUNA	
İSTANBUL HANLAR BÖLGESİNDEKİ AVLU VE BAĞÇELERİN SESSİZ ALAN OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİ ÜZERİNE BİR ALAN ÇALIŞMASI	103
Gülşen Akın Güler, Aslı Özçevik Bilen	
KONUT BALKONLARININ MİMARİ VE AKUSTİK ÖZELLİKLERİNİN KULLANICILARININ AKUSTİK KONFORUNA KATKILARI	115
Hilal Üstüner, Füsün Demirel	
DARBE SESİ DÜZEYİ BAKIMINDAN AKUSTİK KONFORUN SAĞLANABİLMESİ İÇİN YÜZER DÖŞEME UYGULAMASI	125
Mehmet OKAY, Mehmet Nuri İLGÜREL, Rahmi GÜÇLÜ	
KENTSEL İŞİTSEL PEYZAJLARDA SES KAYNAKLARI VE MEMNUNİYET DÜZEYLERİ İNCELEMESİ- TÜRKİYE'DE COVID-19 PANDEMİ SÜRECİ	141
Özlem GÖK TOKGÖZ, Hanife Ayça DOĞAN, Aslı ÖZÇEVİK BİLEN	
ÇOK AMAÇLI MÜZİK SINIFLARINDA AKUSTİK PROBLEMLERİN KAFES ANALİZİ İLE TANILANMASI	155
Ahmet Aslan, Akın Oktav	
NESNEL KONUŞMA ANLAŞILIRLIĞI ÖLÇÜTLERİ ÜZERİNE BİR İNCELEME	171
Mahmut Sözer, Doç. Dr. Emre İlal	

KAMPÜS YAPILARI İÇERİSİNDE KONFERANS SALONLARININ AKUSTİK PERFORMANS DEĞERLENDİRMELERİ.....	187
Zuhal Özçetin, Merve Görkem, Sebahat Gül İlisulu, Füsün Demirel	
GİRESUN KÜLTÜR MERKEZİ ÇOK AMAÇLI SALONU AKUSTİK TASARIMI	199
Füsün Demirel, Merve Görkem	
KÜÇÜK ODALARIN SES KAYIT VE KONTROL ODASI OLARAK AKUSTİK TASARIMI.....	209
Öğr. Gör. Murat Tıraş	
KAYIT STÜDYOLARININ AKUSTİK TASARIM YAKLAŞIMLARI VE ÖRNEK UYGULAMA	221
Dilara Kelle, Ayça Şentop Dümen, Sevtap Yılmaz	
YENİ NESİL AÇIK KAYNAKLI SONLU ELEMANLAR YAZILIMI KULLANIMIYLA ÜÇ BOYUTLU HACİMLERİN AKUSTİK MODAL ANALİZİ	239
Mete Ögüç, Ali Fethi Okyar, Aleyna Güney	
KÜÇÜK HACİMLERDE MODLARIN ODA GEOMETRİSİ VE ODA ORANLARI İLE İLİŞKİSİNİN İNCELENMESİ	247
İlkay Sefer, Sevtap Yılmaz Demirkale²	
YANKISIZ ODALAR İÇİN SES YUTMA KATSAYISI YÜKSEK AKUSTİK KAMA (WEDGE) TASARIM VE ÜRETİMİ.....	261
Onur AKAYDIN, Alper AKGÜL, Ezgi TÜRK GÜRKAN, H. Temel BELEK	
FANLARIN STANDARTLARA UYGUN AKUSTİK ÖLÇÜMÜ İÇİN BİR ÇINLAMA ODASI TASARIMI VE OPTİMİZASYONU.....	277
Mete Ögüç, Efe Ünal	
AKUSTİK TEST ODALARINDA K_2 ÇEVRESEL DÜZELTME DEĞERİNİN BELİRLENMESİ	287
Cafer Kırbas, Eyüp Bilgiç, Enver Sadıkoğlu	
ODYOLOJİK ÖLÇÜMLERDE METROLOJİK İZLENEBİLİRLİK TEMELLERİNİN KUVVETLENDİRİLMESİ.....	301
Enver Sadıkoğlu, Eyüp Bilgiç, Cafer Kırbas	
SİSMOMETRELERİN TEMEL PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ İÇİN ÖLÇÜM SİSTEMLERİ.....	313
Eyüp Bilgiç, Enver Sadıkoğlu, Cafer Kırbas	
TİTREŞİM ve DEPREM TESTLERİNDE KULLANILAN STANDARTLAR VE İÇERİKLERİNİN KİYASLANMASI.....	325
Eyüp Bilgiç	
SÜLEYMANİYE CAMİ'NİN KUBBESİNDE YER ALAN SEBULARIN AKUSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ.....	341
Gülnihan ATAY, Zühre SÜ GÜL	
YENİ NESİL AÇIK KAYNAKLI SONLU ELEMANLAR YAZILIMI KULLANIMIYLA HARMONİK BİR DÜZLEMSSEL DALGANIN SAÇINIMI İÇİN KİRLİLİK HATASININ TAHMİNİ	353
Mete Ögüç, Ali Fethi Okyar, Nezih Topaloğlu, Tahsin Khajah	

Kongre Bilim Kurulu

Prof. Dr. Ahmet Güney
Prof. Dr. Füsün Demirel
Prof. Dr. Halit Temel Belek
Prof. Dr. Mehmet Çalışkan
Prof. Dr. Neşe Yüğrük Akdağ
Prof. Dr. Nevzat Özgüven
Prof. Dr. Selma Kurra
Prof. Dr. Sevtap Yılmaz
Prof. Dr. Zerhan Yüksel Can
Doç. Dr. Aslı Özçevik Bilen
Doç. Dr. Baki Karaböce
Doç. Dr. Konca Şaher
Doç. Dr. Mehmet Nuri İlgürel
Doç. Dr. Mustafa Emre İlal
Doç. Dr. Papatya Nur Dökmeci Yörükoğlu
Dr. Ayça Şentop Dümen
Dr. Enver Sadıkoğlu
Dr. Eyüp Bilgiç
Dr. Mine Aşçıgil Dinçer
Dr. Nurgün Tamer Bayazıt
Dr. Zuhâl Özçetin

Kongre Düzenleme Kurulu

Doç. Dr. Konca Şaher
Dr. Ayça Şentop Dümen
Dr. Zuhâl Özçetin
Hakika Sezgin
Seda Kulak
Sezin Nas
Volkan Dikmen

Kongre Düzenleme Destek Ekibi

Berkay Kadakal
Cansu Değer
Elif Korkmaz
Yaren Aksakal

Kapak Tasarımı

Yaren Aksakal



*Ulusal Akustik Kongresi Türk Akustik Derneği ve İstanbul Bilgi Üniversitesi
işbirliği ile düzenlenmiştir.*



**İstanbul
Bilgi Üniversitesi**



**TÜRK
AKUSTİK
DERNEĞİ**

Destekçiler: Busypod

BUSYPOD
Design of Silence

*14. Ulusal Akustik Kongresi'nin gerçekleştirilmesine
katkıda bulunan sponsorlarımıza*

teşekkür ederiz.



ÖNSÖZ

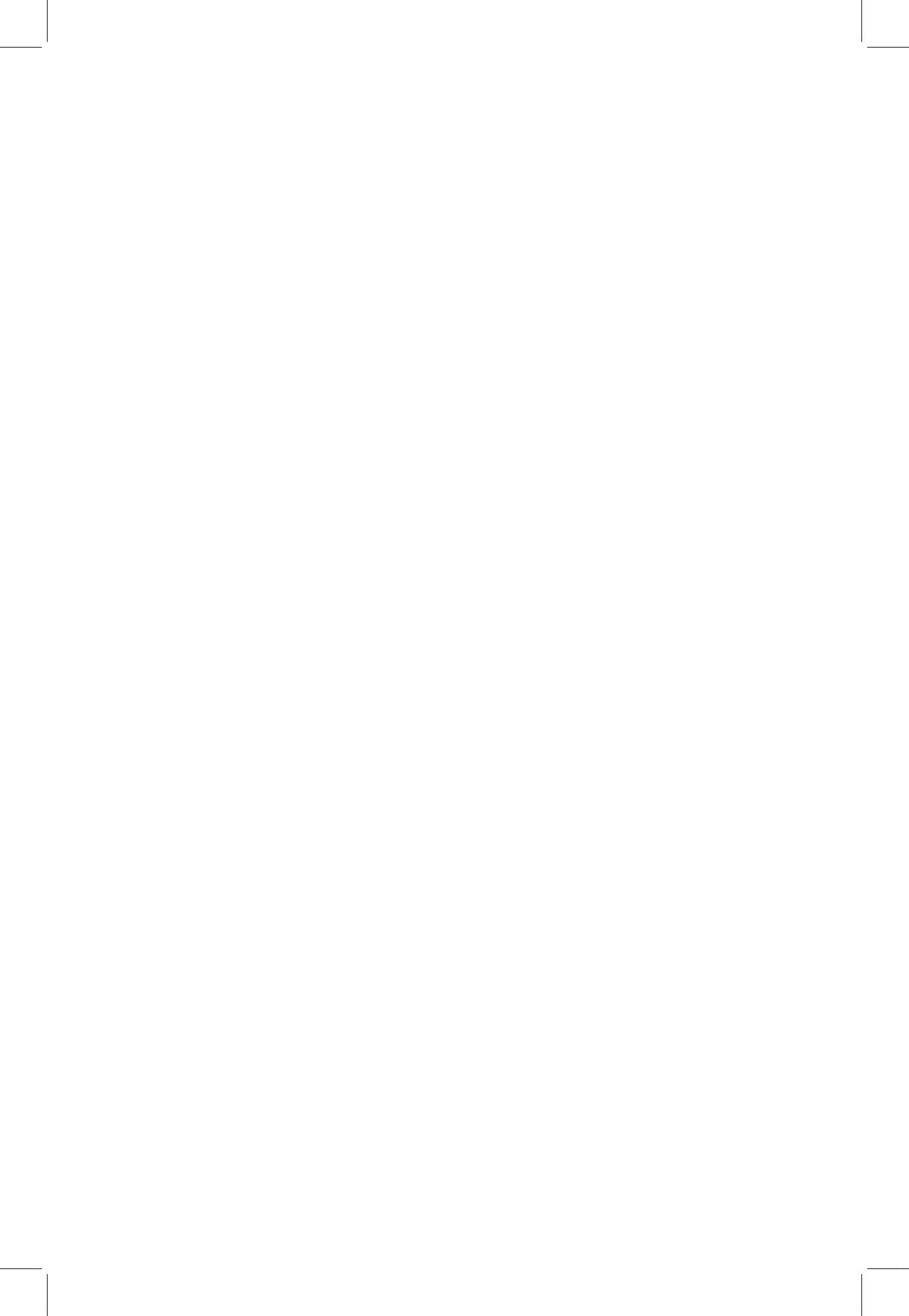
Uluslararası Ses Yılı olarak belirlenen 2020 yılı, küresel pandemi salgınıyla beraber bir yandan “sessiz” ve izole bir yıl olurken diğer yandan da dünya çapında gerçekleşen protestolarla insanların küresel siyasi manzara içinde “ses”lerini çıkartmaktaki direncini de gözlemlediğimiz bir yıl oldu. Yine 2020’de ülkemizde ve dünyada yaşanan depremlerde ise sismik-akustik cihazlar vasıtasıyla göçük altındaki boşluklarda, şaftlarda ve aralıklarda “sessizlik”te kalmış, yaşayan kişilerin ürettikleri “sesler”in algılanmasıyla afetzedelerin kurtarılma hikayelerine tanıklık ettik. Bu bağlamda bu konferans katılımcıları yapı ve hacim akustiği, gürültü kontrolü, akustik ölçümler ve işitsel peyzaj gibi alanların yanı sıra Pandemi, Protestolar ve Deprem konularında düzenlenecek özel oturum ve panellerle sesin sosyal, politik ve toplumsal etkilerini de değerlendirmeyi hedeflemektedir.

Pandemi döneminde salgınla mücadele kapsamında alınan önlemler, değişen yaşam ve çalışma alışkanlıkları, salgının yaratmış olduğu stres ve kaygı koşulları bireyin ‘yeni normal’ ve ‘kontrollü sosyal hayat’ içerisinde çevresi ve içinde yaşadığı mekân ile kurduğu ilişkileri yeniden biçimlendirmektedir. Bu bağlamda değişen günlük gerçekliğimizin kurguları arasında yeni bir ses bilinci ve ses farkındalığının oluştuğunu gözlemlemekteyiz. Bu ses farkındalığının farklı bileşenlerini pandemi döneminde değişen gürültü koşulları ile konut kullanıcılarının yeniden şekillenen gürültü algısından, müzik üretme ve dinleme pratiklerinin yeniden tanımlanmasına, dinleyicilerin sanal katılımıyla müziğin farklı bir şekilde dijital mekânda yeniden kurgulanmasından şehir seslerinin toplumsal cinsiyet, sınıf ve siyaset açısından geçirdiği dönüşüme kadar geniş bir spektrumda tartışmak kongredeki amaçlarımızdan birisidir.

Ayrıca yine 2020’deki ülkemizde ve dünyada yaşanan depremler akustik cihazların arama ve kurtarma personelinin afetzedeye erişimindeki önemini bir kere daha vurgulamış oldu. Geliştirilen akustik dinleme cihazları ile göçük altındaki boşluklarda, şaftlarda ve aralıklarda kalmış yaşayan kişilerin ürettiği sinyaller görüntülü ve sesli olarak algılamak mümkün olmaktadır. Deprem ve afet bölgelerindeki afetzedelerin tespitinde kullanılan akustik yöntemlerin tartışılması da kongrenin öne çıkan temalarından olacaktır.

Türk Akustik Derneği’nin düzenlediği 14. Ulusal Akustik Kongresi akustiğin çeşitli disiplin alanlarında son gelişmeleri konferans temaları çerçevesinde tartışmak ve farklı alanlardaki akustik tartışmaları, bilimsel çalışmalarını destekleyerek geniş kitlelere duyurmayı hedeflemektedir.

Konca Şaher
Türk Akustik Derneği Başkanı



DEPLASMAN: MÜZİK YAPMA PRATİKLERİNDE KALICI BİR YURTSUZLAŞMAYA DOĞRU

Tolga Tüzün

İstanbul Bilgi Üniversitesi, İstanbul

Davetli Konuşmacı - Panel Katılımcısı

ÖZET

2020 senesinde başlayan ve dünyayı politik, ekonomik ve kültürel anlamda kısa devre yapmasına sebep olan ve bu sayede içinde yaşadığımız sistemlerin farazi dayanıklılığını yerle bir eden COVID-19 salgını bir kriz olarak tanımlanıyor. Böylesi kriz anlarında müzik yapma ve dinleme pratiklerinin de kendini gözden geçirmesi, yeniden tanımlaması ve farklı patikalardan akmaya başlaması tarihte sık görülen bir durum. Salgının getirdiği kapanma, kamusal alanda yeni sessel ortamların ve farklı bir sessel bilincin oluşmasına katkıda bulundu. Aynı zamanda halihazırda varolan çevrimiçi paylaşım ortamlarının kapanma süresince farklı bir yaşam biçimine tahvil olması ve bunun sonucunda müzik üretim ve tüketim kiplerinin politik, ekonomik ve kültürel “yer değiştirmesi” bunların geleceğine dair bir çok sorunsalı beraberinde getiriyor. İnternet üzerinden yeni bir kolektiviteden ve buna dair “yeni” üretim, tüketim ve paylaşım süreçlerinden bahsetmek mümkün mü? Özel alanın kamusal alanla bu kadar kaynaşmasının getirdiği olanaklar ama aynı zamanda sorunlar, kapanma sonrası hayatta müzik pratiğinde nasıl izler bırakacak? Maddi olmayan, sanal bir ortama doğru “yer değiştiren” -deplase olan- bestecilerin, malzemenin, çalışma ortamlarının, paylaşımın yeniden kullanılabilir hale gelen kamusal alandaki rolleri nasıl şekillenecek? Kalıcı bir yersiz yurtsuz müzik pratiği, küresel olarak içinde yaşadığımız politik ekonominin arzuyu ve rızayı örgütlemek için ihtiyaç duyduğu bir araç haline gelebilir mi?



PANDEMİDE VE PANDEMİYE RAĞMEN PERFORMANS SES VE MEKAN

Cevdet Erek

İstanbul Teknik Üniversitesi, MIAM, İstanbul

Davetli Konuşmacı - Panel Katılımcısı

ÖZET

Pandemi döneminde müziği ve diğer ses odaklı pratikleri deneyimleme şekilleri önemli değişiklikler geçirdi. Üreticiler, yapımcılar ve çeşitli katılımcılar yeni sosyal mesafe normlarına uyum sağlamaya çalışırken sanal işbirlikleri, müzik paylaşımında sosyal medyanın artan rolü ve dinleyicilerin sanal katılımındaki yenilikler bu pratiklerin dijital mekânda yeniden kurgulanmasına sebep oldu. Bir çok konser salonu, performans ve sergileme mekânı önceden kaydedilmiş performanslar ile canlı performansları birleştirerek dijital medyada ulaşılabilir kıldı. Pandemi koşullarında büyük bir ivme kazanan dijital mekândaki kurgular, ses-müzik üretme ve tüketme şekillerinde çeşitli değişiklik ve yenilikleri işaret ediyor.

Diğer yandan; performansın icracı, alıcı, yapımcı, teknisyen vb. tüm bileşenlerini bir araya getiren ve bu yakınlığın yarattığı sinerjiyle varolan “fiziksel” mekanların temel bileşenlerini bir daha hatırlamak ve bu mekanların yeni normlarla dönüşürken nasıl fırsatlar sunabileceği üzerinde çalışmak bizler için büyük bir önem taşıyor.

Konuşmamda, pandemi sürecindeki uzun hareketsizliğin ardından tümü geçtiğimiz ay içerisinde Bergama Antik Kenti, İsveç Sarayı ve Harbiye Açık hava Tiyatrosu'nda gerçekleşen ve tümünde icracı olarak da bulunduğum izleyici etkinliklerden çeşitli belgeler ve izlenimler sunacak, geleneksel/deneysel/aşırı ses-mekân pratiklerimizin nasıl devam edebileceği tartışmasına katkıda bulunmaya çalışacağım.



SESLER VE POLİTİKA: PANDEMİDE SOKAĞI DİNLEMEK

E. Şirin Özgün

İstanbul Teknik Üniversitesi, MIAM, İstanbul

Davetli Konuşmacı - Panel Katılımcısı

ÖZET

Son yirmi yılda etnomüzikoloji alanında çerçevesini müzikle sınırlandırmayan ve müziğin içinde var olduğu ses dünyalarını merkeze alan çalışmalar ortaya çıkmaya başladı. 2010'larda gerçekleşen paradigma değişimiyle birlikte ses çalışmaları etnomüzikoloji disiplini içerisinde önemli bir yer edindi. Bu paradigma değişikliği etnomüzikolojinin de tanımını ve çerçevesini değiştirmekle kalmadı, disiplinlerarası sınırları da muğlaklaştırdı. Ses çalışmalarının etnomüzikoloji içinde öne çıkmaya başlamasının bir nedeni, araştırmacıların müziğin içinde gerçekleştiği toplumsal bağlamı müzik dışındaki sesleri dikkate almadan kavrayamayacaklarını fark etmeleriydi. Bir etnomüzikolog olarak ben de ses çalışmalarıyla 2010'ların başında karşılaştım ve bu alanda henüz oturmuş kuramsal ve yöntemsel yaklaşımlar yokken, 2009-2012 yılları arasında kentteki politik eylemler ve bunların sesleri ile ilgili bir alan araştırması yürüttüm. Bu sunumda öncelikle etnomüzikolojide ses çalışmalarını yönlendiren akustemoloji ve ses-dünyaları kavramları üzerinde durup ardından bu perspektiflerin alan araştırmasında sokağın, müziğin, köyün, doğanın seslerini dinlerken nasıl kullanılabileceğini araştırmalarımın örneklerle açıklayacağım. Bu yaklaşımın akademik bir bakış açısı olmanın ötesinde yaşamlarımızı anlamlandırmanın önemli bir aracı olduğunu sesler ve toplum üzerine verdiğim dersin çıktılarıyla örneklendireceğim. Ardından, pandemi sürecindeki duyma, dinleme, ses üretme ve duyulan sesleri yorumlama olanaklarını kendi kişisel karantina deneyimimden hareketle örneklendirmeye çalışacağım. Dört duvar arasında kalan ve dünyaya yalnızca pencereden açılan bu duyma ve dinleme deneyimi süresince üzerine düşündüğüm temel konular içerisi-dışarı ve sesler; şehrin seslerinin dönüşümü; toplumsal cinsiyet, sınıf ve sesler; ve siyasetin seslerinin dönüşümü idi. Karantinada pencereden dünyayı dinlemek benim için bir anlamda kendi dinleme tarihimi de dinlemek demektir. Pencereden duyduğum seslerin toplumsal hayatımıza dair söylediklerinden hareketle, yıllar içerisinde dönüşen dinleme pratiklerim ve bunların politik seslerle ilişkisi üzerine bir çerçeve çizeceğim.



KESİLEN ALKIŞLAR, YÜKSELEN SELALAR

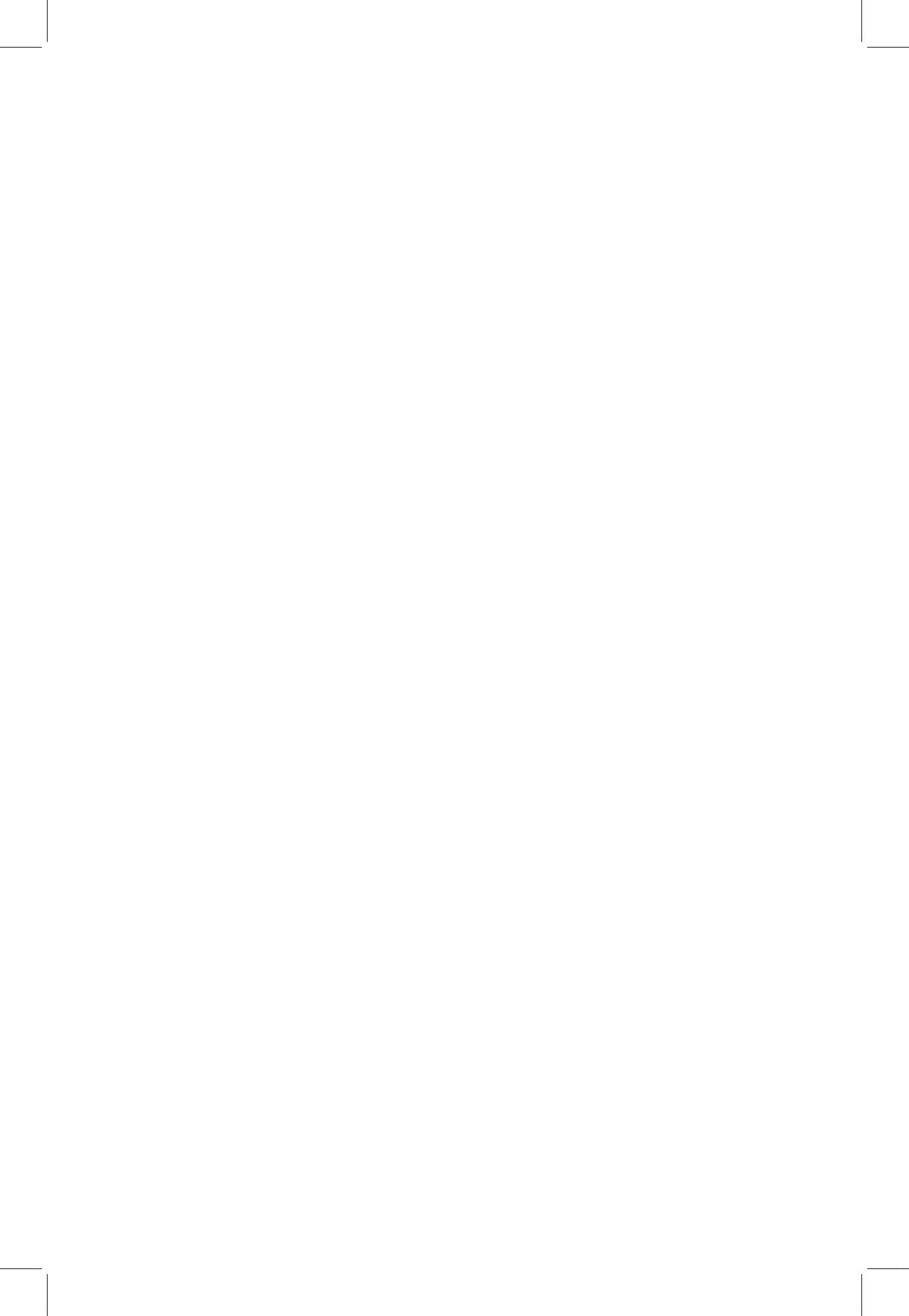
Görkem Özdemir

İstanbul Teknik Üniversitesi, MİAM, İstanbul

Davetli Konuşmacı

ÖZET

2020 Baharı'nın büyük bir zamanını kapalı mekanlarda geçirdiğimizi anımsıyorum. Yeni Koronavirüs salgınının ülkemizde resmi olarak ilan edilmesiyle beraber, “maske - mesafe - hijyen” ve “kontrollü sosyal hayat” kavramlarını öğrendik. Bu süreci İstanbul Anadolu Yakası'ndaki ev(ler)imde ve yakınlarında tecrübe ettim. Bu konuşmada, câmilerden yayınlanan selâlara odaklanarak, evimin içindeki ve çevresindeki sessel değişimleri belgeledim. Oto-etnografik anlatımı, bulunduğum semtlerdeki seslerin göçlerini, ve dengelerini sessel ve görsel olarak paylaşacağım.



KÜRESEL SALGIN, SES PEYZAJI VE KİŞİSEL NOTLAR

Gürkan Maruf Mihçı

Herron School of Art + Design, Indianapolis, Amerika

Davetli Konuşmacı

ÖZET

Küresel Covid-19 salgını ile 2020'nin Mart ayında başlayan sokağa çıkma yasakları, karantinalar, seyahat yasakları dinamik, kalabalık ve canlı şehirleri terk edilmiş ve bomboş mekanlara çevirdi. Gürültülü ve dinamik şehirler bir anda sessiz mekanlara dönüştü. Şehirleri gürültülü yapan taşıtlar ve kalabalık insan toplulukları salgın kısıtlamalarından dolayı bir anda azalınca, gürültünün hayatımıza ne kadar etki ettiği daha çok belirgin hale geldi. Salgının ilk başlarındaki sokak roportajlarında, sosyal medya paylaşımlarında ve insanların kendi aralarında konuşmalarında, şehrin normalde ne kadar gürültü ama şu anda ne kadar sessiz ve ıssız olduğu vurgulandı. Aslında, yaşadığımız şehirlerin sadece görsel kirliliğinin değil gürültü kirliliğinin de önemi ortaya çıktı. Kısıtlamaların yavaş yavaş kalkmasıyla da şehir o eski gürültülü yapısına geri döndü. Gürültünün hayatımıza olan etkisi görsel kirliliğe göre daha çok arka plana atılmışken bu salgınla beraber konuşulmaya başlandı. Bu sunum "şehir gürültüsü" kavramının kökenleri ile başlayıp, 2020 küresel salgını ile değişen şehirleri ele alıp, 2020 Mart-Eylül arasında aldığım kişisel notları ve ses kayıtları ile devam edecek. Şehir gürültüsü kavramının Ses Peyzajı ile olan ilişkisi üzerinde durulup, kendi deneyimlerim ile bu bağlantının öneminden bahsedilecek.



TÜRK AKUSTİK DERNEĞİ'NİN PANDEMİ DÖNEMİNDE GÜRÜLTÜ RAHATSIZLIĞI ARAŞTIRMASI

Ayça Şentop Dümen

Türk Akustik Derneği Genel Sekreteri
İstanbul Bilgi Üniversitesi

Konca Şaher

Türk Akustik Derneği Başkanı
Kadir Has Üniversitesi

Türk Akustik Derneği Sunumu

ÖZET

2020-2021 yılı Dünya'da Uluslararası Ses Yılı olarak kutlanmaktadır. International Commission for Acoustics (ICA) ve işbirlikçi kuruluş ve ülkeler tarafından organize edilen çeşitli aktiviteler ile sesin öneminin ve akustik bilim dalının desteklenmesi hedeflenmektedir. Türk Akustik Derneği'nin organize ettiği çalışmalardan birisi de konutlarda gürültüye bağlı rahatsızlık araştırması olmuştur.

Pandeminin ilk dalgası tüm dünyada hareketliliğin oldukça kısıtlandığı, konutta geçirilen zamanın önemli ölçüde arttığı, öte yandan kısıtlanma, kapalı kalma, yalnızlık, ölüm korkusu, sevdiklerimiz için duyulan endişe ile ilişkili olarak stres ve kaygı seviyesinin yükseldiği bir dönem olarak hissedilmiştir. 'Sessiz' ve 'uzak' geçen bu dönemde işitsel çevremize ilişkin farkındalığımızın artmış olması da mümkündür. Öte yandan konut tipolojisinin üstlendiği yeni işlevler kişinin yapma çevresi ile kurduğu ilişkiyi ve beklentileri yeniden tanımlamaktadır.

Türk Akustik Derneği adına yürütülen bu çalışmada pandeminin ilk dalgası esnasında konutlarda gürültü rahatsızlığı ve stres / kaygı seviyeleri anket ile araştırılmış, farklı çevresel gürültü karakterine sahip iki konumda tekrarlı ölçümler ile gürültü düzeyi değişimleri hakkında bulgular elde edilmiştir. Çalışma sonuçları kongre programında sunulacaktır.

TEŞEKKÜR

*Bu araştırmanın kurgulanmasındaki desteklerinden ötürü **Prof. Dr. Selma Kurra**'ya ve sokağa çıkma kısıtlamalarının olduğu dönemde ölçüm cihazlarını bize ulaştırarak çalışmanın gerçekleşmesine büyük katkıda bulunan **Tanju Kılıçarlan**'a teşekkürlerimizle.*



AFET ANINDA İNSANSIZ HAVA ARACI İLE ÇIĞLIK SESLERİNİN SAPTANMASI

Macarena Varela

Fraunhofer FKIE, Wachtberg, Almanya

Davetli Konuşmacı (keynote speaker)

ÖZET

Deprem, yangın veya çöken binalar gibi afetler sırasında felaketzedeleri canlı bulmak için her dakika önemlidir. İnsansız Hava Araçlarının (İHA) Arama ve Kurtarma (SAR) amaçlı kullanımı, tehlikeli veya ulaşılması zor olabilecek geniş alanları hızlı bir şekilde inceleme ve ilk müdahale ekiplerine duruma bağlı farkındalık sağlama yetenekleri nedeniyle hızla artmaktadır. Şu anda İHA'lar, afet bölgeleri üzerinde uçarken insanları görsel olarak algılamak için sensörler kullanıyor. Ancak çoğu durumda potansiyel kazazedeler bu sensörler tarafından görülemez. Kurbanlar enkaz içinde sıkışıp kalmış olabilir veya opak duman nedeniyle görünmeyebilir. Bu sebeple, kurbanların hayatlarını kurtarmaya destek olmak için Almanya'daki Fraunhofer İletişim, Bilgi İşleme ve Ergonomi Enstitüsü (FKIE), insan çığlıkları da dahil olmak üzere, afetler sırasında belirli seslerin pusula yönünü belirlemek için drone'lara bağlanabilen akustik teknoloji geliştiriyor. Bu teknoloji, belirli ses olaylarını filtreleme, algılama, yönlendirme ve kaynak lokalizasyonunu sağlamak için gelişmiş dizi işleme teknikleri ve yapay zeka yöntemleriyle birleştirilmiş "Crow's Nest Array" (CNA) adı verilen özel bir MEMS mikrofon dizisinden oluşmaktadır. Konferansta, CNA akustik sistemi tanıtılacak ve çeşitli açık alan deneylerinde değerlendirilen performansı ortaya konacaktır.

DETECTING HUMAN SCREAMS WITH UAVS DURING DISASTERS

SUMMARY

During disasters, such as earthquakes, fires, or collapsed buildings, every minute counts to find possible victims alive. The use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Search and Rescue (SAR) purposes is rapidly increasing due to their ability to quickly survey large areas, that may be dangerous or difficult to reach, and provide situational awareness to first responders. Currently, UAVs use sensors to visually detect people when flying over disaster zones. However, in many cases, potential victims are not visible to these sensors. Victims could possibly be trapped in rubble or not visible due to opaque smoke. Therefore, to help saving the lives of these victims, the Fraunhofer Institute for Communication, Information Processing, and Ergonomics (FKIE) in Germany is developing acoustic technology that can be attached to drones to determine the compass bearing of certain sounds, including human screams, during disasters. The acoustic technology consists of a special volumetric array of MEMS microphones, called "Crow's Nest Array" (CNA), combined with advanced array processing techniques and artificial intelligence methods to achieve filtering, detection, bearing and source localization of specific audio events. At this conference, the CNA acoustic system will be presented, and its performance evaluated in various open field experiments, will be exposed.

** Türkçeye çevirisi Cansu Değer (İstanbul Bilgi Üniversitesi) tarafından yapılmıştır.*

DEPREM SIRASINDAKİ TİTREŞİMLERİN YERÇEKİMİ İVMESİ ÖLÇER İLE GÖZLENMESİ

Baki Karaböce

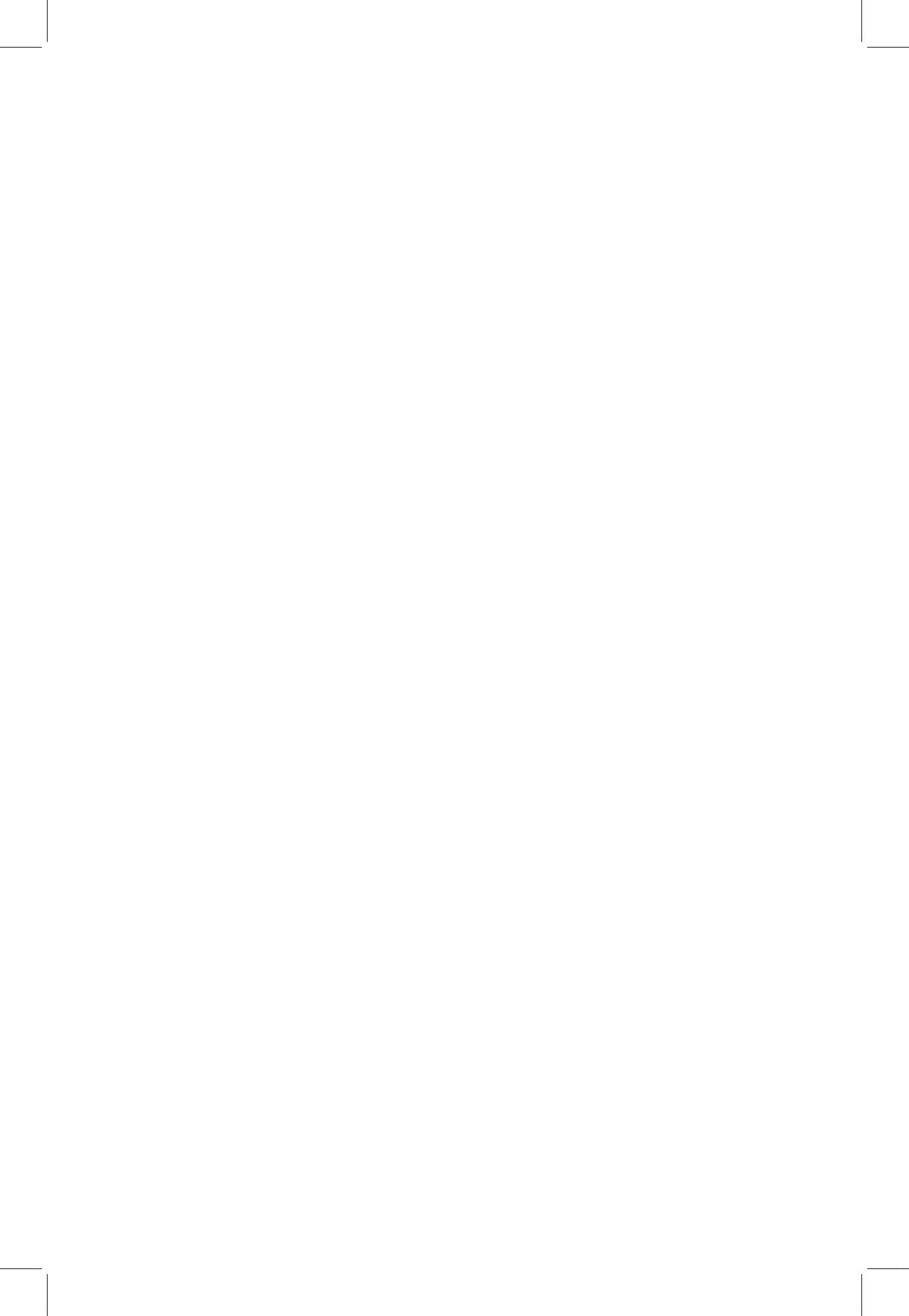
TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, Gebze

Davetli Konuşmacı

ÖZET

Deprem dalgaları, enerjinin hızlı salınımı ile üretilen yerdeki düşük frekanslı titreşimler veya sismik dalgalardır. Deprem, tektonik plakaların hareketleri ile elastik enerjinin depolanması ve çarpışmalarının neden olduğu bir olaydır. Deprem dalgaları, yerde vücut ve yüzey dalgaları olmak üzere iki ana formda ve çeşitli büyüklüklerde titreşimler oluşturur.

Bir depremin kaydı, bir titreşim cihazı (sismograf) tarafından zamana karşı titreşimlerin kaydı olarak grafik şeklinde alınabilmektedir. Deprem titreşimleri bağıl gravimetre ve mutlak gravimetre cihazları tarafından da algılanabilir. Bu sunumda ülkemizden binlerce km uzakta meydana gelen Richter ölçeğine göre 8,2 büyüklüğünde Japonya Hokkaido depremi sırasında TÜBİTAK UME'de bulunan Mutlak Gravimetre cihazı ile algılanan deprem sinyalleri sunulacaktır.



TÜRKİYE'DE MİMARLIK VE İÇ MİMARLIK EĞİTİMİNDE AKUSTİK DERSLERİNİN GÜNCEL DURUM İNCELENMESİ

Sezin Nas¹

Işık Üniversitesi, Şile, İstanbul, Türkiye
e-posta: sezin.nas@isikun.edu.tr

Hakika Sezgin²

Kadir Has Üniversitesi, Cibali, İstanbul, Türkiye
e-posta: hakika.sezgin@khas.edu.tr

ÖZET

Bina akustiği tüm dünyada mimari ve iç mimari alanlarında yapı fiziği alanının ayrılmaz bir parçasını oluşturmakta ve işitsel konfor koşullarının sağlanmasında büyük bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda mimarlık ve iç mimarlık eğitim müfredatında önemli bir yer tutması beklenmektedir. Türkiye özelinde bakıldığında mimarlık ve iç mimarlık alanında eğitim veren çok sayıda üniversite olduğu görülmektedir. Bu üniversitelerde akustik eğitiminin incelenmesi, Türkiye özelinde akustik eğitiminin ne düzeyde olduğunu gösterecektir. Bu amaçla bu çalışma çerçevesinde mimarlık ve iç mimarlık eğitiminde akustik alanında ders veren üniversiteler, nitelik ve nicelik bakımından incelenmiştir. Bu inceleme sırasında akustik eğitimi için verilen derslerin dönem içerisindeki ağırlığı –ders saati, dersin kredi yükü, zorunlu/seçmeli olma özelliği- ve içerik bilgilerine ulaşılmıştır. Sonuç olarak bu çalışma mimarlık ve iç mimarlık bölümlerinde akustik eğitiminin güncel durumunu ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Mimarlık eğitimi, iç mimarlık eğitimi, akustik dersleri.

EXAMINATION OF ACOUSTICS LESSONS IN ARCHITECTURE AND INTERIOR ARCHITECTURE EDUCATION IN TURKEY

ABSTRACT

Building acoustics is an integral part of the field of building physics in the fields of architects and interior architects all over the world and plays a major role in providing auditory comfort conditions. In this context, it is expected to have an important place in the architecture and interior architecture education curriculum. In Turkey, it is seen that there are many universities that provide education in the field of architecture and interior architecture. The examination of acoustic education in these universities will show the level of acoustic education in Turkey. For this purpose, within the framework of this study, universities that offer courses in the field of acoustics in architecture and interior architecture education were examined in terms of quality and quantity. During this examination, the weight of the courses given for acoustic education in the semester – the course hour, the credit load of the course, the compulsory/elective feature – and the content information were obtained. As a result, this study aims to reveal the current status of acoustic education in architecture and interior architecture departments.

Keywords: Architectural education, interior design training, acoustic lessons.

1. GİRİŞ

Mimari mekanlar ya da çevreler insanlar tarafından duyuları aracılığıyla algılanır. İnsan vücudu mekan içinde hareket ettikçe, gördükçe, kokladıkça, dokundukça ve duydukça mimari hayat bulur. Mimari tasarımlar yüzyıllardır görsel duyuya ayrıcalık tanımış, insanoğlunun dinleyerek doğal mekan algısını göz ardı etmiştir. Bir mekanı canlandırmak, mimari işlevin ve biçimin sadece görsel olarak algılanması gerektiği anlamına gelmez. Bir mimari tasarımın başarısı, insan vücudunun duyular aracılığıyla mekanla nasıl etkileşime girdiği ile artar. [1] Bina akustiği, bu mekanlar ya da çevrelerdeki işitsel konfor koşullarını oluşturduğu ve tasarımın tamamlayıcı bir parçası olduğu için mimarlık ve iç mimarlık eğitiminde önemli bir yeri bulunmaktadır.

Bina akustiği konuları, üniversitelerin mimarlık ve iç mimarlık bölümlerinin müfredatlarında yer almakta olup, eğitimdeki ve ülkemizdeki önemi günden güne artmaktadır. Bu çalışma, mimarlık ve iç mimarlık (bazı üniversitelerde bu bölümün adı iç mimarlık ve çevre tasarımı olarak geçmektedir) bölümlerinin lisans eğitiminde verilen mimari akustik derslerin güncel durumunu analiz etmek için yapılmıştır. Türkiye'deki üniversitelerin mimarlık ve iç mimarlık bölümlerinin müfredatları incelenerek, akustik ile ilgili dersler; içeriklerine göre, türlerine göre zorunlu ve seçmeli olarak, dersin verildiği üniversite devlet üniversitesi ve vakıf üniversitesi olarak sıralanmıştır.

2. TÜRKİYE'DE YAPILAN GEÇMİŞ ARAŞTIRMALAR

Türkiye'de akustik eğitimi üzerine yapılmış olan çalışmalar kronolojik sırayla incelenmiş ve yeni açılan üniversiteler ve/veya akustik dersleriyle beraber Türkiye'de mimarlık ve iç mimarlık bölümü lisans düzeyinde verilen akustik eğitiminin günümüze değin değişimi ve günümüzdeki durumu incelenmiştir.

Meriç ve Çalışkan'ın 2013 yılında yapmış oldukları Türkiye'de mimarlık bölümlerinde verilen akustik eğitimi ile ilgili yaptıkları çalışmada [2] 42 üniversite incelenmiş ve bu üniversitelerin 32 tanesinde akustik konularının lisans programında zorunlu dersler müfredatında yer aldığı, 21 üniversitede ise yine mimarlık lisans programında seçmeli dersler müfredatında bulunduğu tespit edilmiştir.

2014 yılında Çakır, Sevinç ve İlal tarafından yapılmış olan 'Türkiye'de Mimarlık Eğitiminde Akustik: Güncel Durum' başlıklı çalışmada [3] ise Türkiye'de 2014 yılında 82 üniversitede mimarlık bölümü bulunduğu belirtilmiştir. İncelenen 82 üniversitenin 49 tanesinde akustik konularının zorunlu lisans derslerinde yer aldığı ve 22 üniversitede seçmeli lisans derslerin yer aldığı tespit edilmiştir.

İç mimarlık bölümüne baktığımızda ise 2015 yılında Sevinç, Çakır ve İlal'in 'Türkiye'deki İç Mimarlık Eğitiminde Yapı Fiziği Dersleri' başlıklı çalışmalarında [4], 59 iç mimarlık bölümünden 53 tanesinde zorunlu yapı fiziği derslerinin bulunduğu tespit edilmiştir. 20 üniversitede ise yapı fiziği konularını içeren seçmeli derslerin yer aldığı belirtilmiştir. Yapılan çalışmaya göre, yapı fiziği derslerinde ele alınan aydınlatma, akustik, ısı-nem kontrolü, ısıl konfor ve yangın konu başlıklarından aydınlatma konularının ön planda olduğu akustik konularının ise ikinci sırada yer aldığı tespit edilmiştir.

3. YÖNTEM

Çalışma kapsamında Türkiye'de mimarlık ve iç mimarlık (bazı üniversitelerde bu bölümün adı iç mimarlık ve çevre tasarımı olarak geçmektedir) bölümlerinde lisans eğitimi veren üniversiteler incelenmiştir. Başlangıç olarak Yök Atlas [5] üzerinden Ağustos 2020 tarihinde mimarlık ve iç mimarlık alanında eğitim veren üniversitelerin listesine ulaşılmıştır. Bu üniversitelerin müfredatlarının incelemek için öncelikle müfredat bilgilerinin yer aldığı ortak bir bilgi sistemi olan bologna üzerinden ders bilgi paketlerine ve ders kataloglarına ulaşılması hedeflenmiştir. Yök Atlas üzerinden tespit edilen üniversitelerin bologna sayfaları ziyaret edilmiş, iç mimarlık ve mimarlık bölümlerinin ders içeriklerine ulaşılmıştır. Bologna sayfalarına ulaşamayan üniversitelerin web sitelerinde yer alan ders programları veya ders planlarından faydalanılmıştır. Bologna sayfaları ve bölüm web sayfalarından ders içeriklerine erişilen her üniversitenin müfredatları incelenmiş ve bu müfredat bilgileri içerisinde 'akustik', 'ses', 'gürültü' anahtar kelimeleri aratılmış, bu anahtar kelimelerden en az bir tanesine sahip dersler bir sonraki aşama için seçilmiş, anahtar kelimelerden herhangi bir tanesine sahip olmayan dersler ise elimine edilmiştir. Daha sonra ortaya çıkarılan derslerin içerikleri okunarak bu derslerin akustik alanına ait olup olmadıkları tespit edilmiştir. Yapılan inceleme sonucunda belirlenen bütün derslerin akustik alanıyla ilişkili olduğuna karar verilmiştir. En son aşamada ise bu dersler daha detaylı olarak incelenmiş, bu inceleme sırasında belirlenen derslerin zorunlu/seçmeli özelliklerine ve ders kredi yüklerine bakılmıştır.

4. BULGULAR

4.1. İç Mimarlık Bölümü Bulguları

Türkiye'de 2020 yılında Yök Atlas üzerinden lisans düzeyinde eğitim programları arasından yapılan araştırma sonucunda devlet üniversiteleri arasında 16 üniversite iç mimarlık bölümü, vakıf üniversiteleri arasında 62 üniversitede

İngilizce ve/veya Türkçe eğitim olmak üzere toplam 78 iç mimarlık bölümü bulunmaktadır.

16 Devlet Üniversitesi arasında 9 üniversite akustik alanında seçmeli veya zorunlu olmak üzere eğitim vermekteyken 5 üniversitede akustik alanına ait ders bulunmamaktadır. 2 üniversitenin ise müfredat bilgilerine ulaşılamamıştır. (Şekil 1.)

Vakıf Üniversiteleri arasında Türkçe ve/veya İngilizce olmak üzere 62 Vakıf Üniversitesi bulunmaktadır. Bu üniversiteler arasında 36 üniversite seçmeli ve/veya zorunlu olmak üzere akustik alanında eğitim vermektedir. 12 üniversitede akustik alanında ders bulunmamaktadır ve 14 üniversitenin ise müfredat bilgisine ulaşılamamıştır. (Şekil 2.)

Vakıf ve devlet üniversiteleri arasında iç mimarlık bölümde akustik ders bulunan 45 üniversite arasından 9 üniversitede akustik alanına ait zorunlu ders olmamasına rağmen seçmeli ders bulunmaktadır. Bu üniversitelerden 2 tanesi devlet üniversitesi 7 tanesi vakıf üniversitesidir.



Şekil 1. Devlet Üniversiteleri arasında akustik alanında mevcut ders durumu



Şekil 2. Vakıf Üniversiteleri arasında akustik alanında mevcut ders durumu

Devlet ve vakıf üniversitelerinde yer alan akustik ile ilişkili 45 dersin kredilerine bakıldığında 2-5 kredi arasında değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir. Bu derslerden 2 krediye sahip 4 ders, 3 krediye sahip 26 ders, 4 krediye sahip 7 ders, 5 krediye sahip 2 ders olduğu görülmüştür. 4 derse ait kredi bilgisine ise ulaşılamamıştır. Tüm bu derslerin ortalama kredi yükleri ise 3,17 olarak hesaplanmıştır.

4.1.1. İç Mimarlık Eğitiminde Zorunlu Akustik Dersler

İç mimarlık eğitiminde akustik eğitimi veren toplam 45 üniversitenin 28 tanesi akustik alanında zorunlu ders vermektedir. Bu dersler “Mekan ve Malzeme”, “Çevre Denetimi”, “Fiziksel Çevre Kontrolü”, “Oda Akustiği”, “İç Mekan Akustik Bilgisi”, “İç Mekanda Çevresel Kontrol”, “Mimari Akustik”, “İç Mimarlıkta Yapı Malzemeleri”, “Mimaride Duyular: Işık ve Ses”, “Mekan Akustiği”, “Donatım Akustik”, “Yapı Fiziği”, “İç Mekanda Işık, Renk ve Doku”, “Akustik ve Yangın Güvenliği”, “Isıtma, Soğutma, Tesisat ve Akustik”, başlıkları altında işlenmektedir. Tüm bu başlıklar altında akustik konusu farklı konu-saat ağırlığı üzerinden işlenmektedir.

4.1.2. İç Mimarlık Eğitiminde Seçmeli Akustik Dersler

İç mimarlık eğitiminde akustik dersi veren toplam 45 üniversitenin 15 tanesi akustik alanında seçmeli ders vermektedir. Bu dersler “Salon Akustiği”, “Akustik”, “İç Mekan Akustiği”, “Mimaride Akustik”, “Akustik Tasarımı”, “Akustik ve Aydınlatma” “Yapı Akustiği” başlıkları altında işlenmektedir. Seçmeli dersler kapsamında derslerin ağırlıklı olarak akustik konusu üzerinden uzmanlık dersleri olarak işlendiği görülmektedir.

Bunların dışında 45 üniversite arasından 3 tanesinde akustik dersi ve konusunun işlendiği ancak bunların seçmeli ya da zorunlu olduğu üniversite tarafından belirtilmemiştir.

4.2. Mimarlık Bölümü Bulguları

Türkiye’de mimarlık bölüm bulgularına bakıldığında 58 devlet üniversitesi, 71 vakıf üniversitesi olmak üzere toplam 129 üniversitede mimarlık lisans eğitimi verilmektedir.

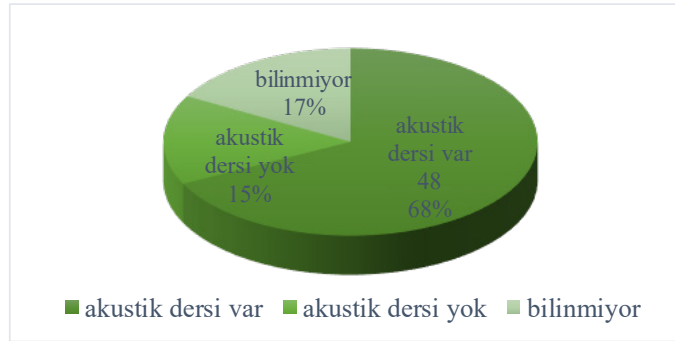
Bu 58 devlet üniversitesinden 44 tanesi seçmeli ve/veya zorunlu olmak üzere akustik alanına ait ders vermekte olup, 3 üniversitede akustik alanına ait ders bulunmamaktadır. 11 üniversitenin ise bulgularına ulaşılamamıştır. Akustik alan dersi veren 44 üniversitede seçmeli ve/veya zorunlu olmak üzere toplam 70 ders olduğu görülmektedir. (Şekil 3)

71 vakıf üniversitesine bakıldığında ise 48 üniversitede seçmeli ve/veya zorunlu olmak üzere 72 adet akustik alan dersi veya akustik alan bilgisi içeren ders bulunmaktadır. 11 üniversitede akustik dersi bulunmamaktadır ve 12 üniversitenin bulgularına ulaşılamamıştır. (Şekil 4)

Vakıf ve devlet üniversiteleri arasında mimarlık bölümünde akustik ders bulunan 92 üniversite arasından 10 üniversitede akustik alanına ait zorunlu ders olmamasına rağmen seçmeli ders bulunmaktadır. Bu üniversitelerden 7 tanesi devlet üniversitesi 3 tanesi vakıf üniversitesidir.



Şekil 3. Devlet Üniversiteleri arasında akustik alanında mevcut ders durumu



Şekil 4. Vakıf Üniversiteleri arasında akustik alanında mevcut ders durumu

Devlet ve vakıf üniversitelerinde yer alan akustik ile ilişkili 142 dersin kredilerine bakıldığında 2 ve 6 kredi arasında değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir. Bu derslerden 2 krediye sahip 22 ders, 2,5 krediye sahip 2 ders, 3 krediye sahip 70 ders, 3,5 krediye sahip 1 ders, 4 krediye sahip 6 ders, 5 krediye sahip 4 ders, 6 krediye sahip 1 ders olduğu görülmüştür. 9 derse ait kredi bilgisine ise ulaşılamamıştır. Tüm bu derslerin ortalama kredi yükleri ise 2,94 olarak he-

saplanmıştır. İç mimarlık ders kredi yüküne bakıldığında ise bu ortalamanın 3,17 olduğu görülmektedir. Mimarlık ve iç mimarlık akustik alanına ait ders kredi yüklerinin benzer olduğu görülmektedir.

4.2.1. Mimarlık Eğitiminde Zorunlu Akustik Dersler

Mimarlık eğitiminde toplam 92 üniversitede zorunlu ve seçmeli olmak üzere her birinde bir veya birden fazla ders olduğu görülmektedir. Bu 92 üniversite arasında 76 üniversitede toplam 82 adet zorunlu ders olarak akustik alanına değinen ders bulunmaktadır. Bu dersler “Yapı Fiziği”, “Yapı Teknolojileri”, “Çevre Denetimi”, “Fiziksel Çevre Kontrolü”, “Binalarda Çevresel Sistemler”, “Çevre Kontrol Sistemleri”, “Tasarımda Enerji ve Fiziksel Çevre Sorunları” dersleri adı altında bulunmaktadır.

4.2.2. Mimarlık Eğitiminde Seçmeli Akustik Dersler

Yine mimarlık eğitimi veren toplam 92 üniversite arasından 14 üniversite akustik alanında seçmeli ders vermektedir. Seçmeli ders veren 14 üniversitede toplam 29 adet akustik alan dersi bulunmaktadır. Bu seçmeli derslerin “Yapı Akustiği”, “Aydınlatma ve Akustik Simülasyon”, “Binalarda Akustik Tasarım”, “Mimaride Hacim Akustiği”, “Mimari Akustik”, “Fiziksel Çevrede Gürültü Kontrolü”, “Seslerle Değişen Kentler”, “Yapı Akustiği”, “Eğitim Yapılarında Akustik Tasarım”, “Yapılarda Gürültü Kontrolü”, “Hacim Akustiği ve Gürültü Denetimi”, “Aydınlatma ve Akustik”, “Kültür Yapılarında Akustik Tasarım”, “Ofis Yapılarında Akustik Tasarım”, “Mimari Akustik Uygulamaları”, “Salon Yapıları”, “Ses ve Işık Tasarımı”, “Binalarda Yalıtım Uygulamaları”, “Farklı Bina Tipolojilerinde Akustik Tasarım”, başlıkları adı altında akustik uzmanlık dersleri olduğu görülmektedir.

Bunların dışında 92 üniversite arasından 4 tanesinde akustik dersi ve konusunun işlendiği ancak bunların seçmeli/ zorunlu olup olmadığı üniversite tarafından belirtilmemiştir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmanın amacı olarak Türkiye’deki iç mimarlık ve mimarlık bölümlerinde lisans düzeyinde verilen akustik dersleri irdelenmiştir. Yapılan inceleme sonucunda bu iki bölümde toplam 161 tane akustik alanıyla ilgili ders olduğu ortaya çıkarılmıştır. Bu derslerin 115 tanesi mimarlık bölümünde verilirken 46 tanesi ise iç mimarlık bölümlerinde verilmektedir. Mimarlık bölümünde 82 dersin zorunlu olduğu görülmektedir. İç mimarlık bölümünde ise

zorunlu dersler 28'dir. Tüm bu veriler değerlendirildiğinde mimarlık lisans programında akustik alanına ait derslerin %71 zorunlu, %25 dersin ise seçmeli olduğu görülmektedir. Aynı şekilde iç mimarlık lisans eğitiminde akustik alanına ait derslerin %61'i zorunlu, %33ü ise seçmeli derstir. Derslerin seçmeli zorunlu verilme oranlarına bakıldığında akustik alanında eğitim veren üniversitelerin çoğunluğu dersi zorunlu olarak aktarmaktadır. Bu da akustik alanına ait derslerin mimarlık ve iç mimarlık programlarındakini önemini vurgulamaktadır.

Mimarlık eğitiminde verilen 115 ders incelendiği zaman 23 dersin yapı fiziği ile ilgili olduğu, 33 dersin ise fiziksel çevre kontrol veya denetimiyle ilgili olduğu görülmektedir. Sadece 19 tanesinin doğrudan akustik adı altında verilmekte olup içeriğin tamamı yıl boyunca akustik alanına değinmektedir. Bu da göstermektedir ki aslında doğrudan akustik eğitimi verilen ders sayısı çok sınırlıdır.

İç mimarlık lisans eğitimi incelendiğinde ise akustik içeriğe sahip 46 ders içerisinde 24 tanesinin doğrudan akustik alan dersi olduğu görülmektedir. Bu da yine sınırlı eğitimin olmasını gösterse bile oran olarak iç mimarlık eğitiminde akustiğe odaklanan derslerin daha yoğun olduğu söylenebilir.

Ancak, her 2 eğitimde de toplam ders müfredatı içerisinde incelendiğinde sınırlı düzeyde akustik eğitimi verildiği söylenebilir. Oysaki 2017 yılında Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yürürlüğe girmiş olan "Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkındaki Yönetmelik" [6] ve "Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik Kapsamında Düzenlenecek Sertifika Eğitim Programlarına Dair Tebliğ" [7] gereği yeni yapılacak binaların ruhsat aşamasında hazırlanması gereken akustik rapor ve/veya akustik proje zorunluluğu getirilmiştir. İşitsel konfor koşullarının sağlanması için hazırlanan bu rapor veya projelerin, ayrıntılı ve doğru bir şekilde hazırlanabilmesi için mimarların ve iç mimarların akustikle ilgili olarak bilgi düzeylerinin artırılması önem kazanmıştır. Bu nedenle üniversite müfredatlarının yeniden revize edilmesi ve bu dersi verebilecek öğretim üyelerinin yetiştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Yine aynı şekilde dikkat çekilmesi gereken bir diğer konu ise görüldüğü üzere mimarlık ve iç mimarlık lisans programlarında akustik alan dersleri yaklaşık aynı oranlarda ders içeriği olarak aktarılmaktadır. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı D1 Temel Bina Akustiği Uzmanı olmak için getirdiği ön koşullar arasında mimar, inşaat mühendisi, makine mühendisi, elektrik mühendisi, elektrik ve elektronik mühendisi, fizik mühendisi veya optik/akustik mühendisi olması veya bu mesleklerden olmaması durumunda akustik alanında tezli yüksek lisans veya doktora yapmış olması şartı aranmaktadır. Görüldüğü üzere iç mimarlar D1 Temel Bina Akustiği Uzmanı olarak bu

programlara başvuru yapamamaktadır. Fiziksel çevre kontrolü açısından iç mimarlar sesin, gürültünün ve akustiğin önemini lisans eğitimleri boyunca mevcut dersler sayesinde edinmesine rağmen herhangi bir yetki alanına sahip olmaları sağlanamamıştır.

Çakır ve diğerlerinin [4] 2015 yılında yapmış olduğu çalışmaya bakıldığında 2010 yılı öncesi iç mimarlık lisans eğitimi veren 36 üniversite bulunuyorken 2020 yılından itibaren bu sayı 140 üniversiteye ulaşmıştır. Yine aynı çalışmada 2014 yılı itibarıyla 59 iç mimarlık lisans eğitimi veren üniversite bulunmaktadır. Bu üniversitelerden 53'ünde zorunlu yapı fiziği dersi bulunmakta ve bu ders adı altında bazı bölümlerde akustik alan bilgisine yer verildiği görülmektedir. 2020 yılına bakıldığında ise 140 iç mimarlık lisans programının 45 tanesinde 28 zorunlu, 15 seçmeli akustik alan dersi bulunmaktadır. Üniversite ve lisans programındaki artışa rağmen akustik alanına ait ders sayısının aynı oranda artmadığı görülmektedir. Ancak Çakır'ın çalışmasında yalnızca yapı fiziği dersi incelenmiştir ve bu derslerin içeriklerinin her birinde akustik alan bilgisinin bulunup bulunmadığı bilinmemektedir.

Sevinç ve diğerlerinin [3] 2014 yılında yaptığı çalışmada ise mimarlık bölümlerinde akustik alanına ait derslerin durumu incelenmiş 2010 yılı öncesi 49 mimarlık bölümünden 38 tanesinin zorunlu akustik dersi işlediği tespit edilmiştir. Aynı çalışmada 2014 yılı bulguları ise 82 üniversiteden 49 tanesinin zorunlu, 22 üniversitede ise seçmeli akustik dersi işlediğidir. 2020 yılı bulgularına bakıldığında ise 92 adet mimarlık bölümü bulunmakta, bunlardan 76 tanesinde akustik alanına ait zorunlu ders bulunduğu, 14 tanesinde ise seçmeli akustik alan dersi olduğu görülmüştür. Mimarlık bölümlerine bakıldığında üniversite sayısındaki artışla birlikte akustik alan bilgisi içeren ders sayılarında da doğru orantıda bir artışın olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmanın en önemli eksikliği ise bütün üniversitelerin müfredatına ulaşamamasıdır. Devlet üniversitelerinin iç mimarlık bölümlerinin %23'ünün, mimarlık bölümlerinin %17'sinin müfredatına ulaşamamıştır. Vakıf üniversitelerinde ise bu oranlar sırasıyla %13 ve %19'dur. Bu da çalışmanın çıktılarının güvenilirliğini azaltmasının yanı sıra ulaşılan oranlara baktığımızda ise büyük çoğunluğa ulaşıldığını göstermektedir, kısaca tüm bu bulgulara ulaşamayanlar hakkında fikir elde etmek için yeterli olacaktır. Fakat bu çalışmanın güvenilirliğini arttırmak amacıyla müfredatlarına ulaşamayan üniversitelerle iletişime geçilerek elde edilecek bilgiler ile çalışma güncellenmesi sağlanabilir.



6. KAYNAKLAR

- [1] N.T. Bayazıt, A. Hohman, ve R. Reder, “Aural Architecture or Acoustic Architect- How to Teach Acoustics to Architecture Students”, Inter Noise, New York, 2012
- [2] I. Meriç ve M. Çalışkan, “Acoustics education for architects: Developing a base of knowledge for professional experience”, Inter Noise, Innsbruck, 2013
- [3] O. Çakır, Z. Sevinç ve M. E. İlal, “Türkiye’de Mimarlık Eğitiminde Akustik: Güncel Durum”, 1. Ulusal Yapı Fiziği ve Çevre Kontrolü Kongresi, İtü İstanbul, 2014
- [4] Z. Sevinç, O. Çakır ve M. E. İlal, “Türkiye’deki İç Mimarlık Eğitiminde Yapı Fiziği Dersleri”, İç Mimarlık Eğitimi 3. Ulusal Kongresi, İKÜ İstanbul, 2015
- [5] YÖK Atlas, <https://yokatlas.yok.gov.tr/universite.php>, erişim tarihi: 27.08.2020
- [6] Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkındaki Yönetmelik, (31.05.2017), Resmi Gazete (Sayı: 30082), Erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2017/05/20170531-7.htm>
- [7] Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik Kapsamında Düzenlenecek Sertifika Eğitim Programlarına Dair Tebliğ, (12.04.2018), Resmi Gazete (Sayı: 30389), Erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/04/20180412-4.htm>



MİMARİ AKUSTİK ALANINDA GELİŞİM/DEĞİŞİM DAVRANIŞININ ARAŞTIRMALAR ÜZERİNDEN DEĞERLENDİRİLMESİ

Duygu Özel Güney¹

Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Beyoğlu, İstanbul, Türkiye

e-posta: 20193101004@ogr.msgsu.edu.tr

Çiğdem Tekin²

Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Beyoğlu, İstanbul, Türkiye

e-posta: cigdem.tekin@msgsu.edu.tr

ÖZET

Temel bilginin yeni bilgilerle geliştirilmesi, deneysel olarak yapılabilirliği ve uygulanabilirliği içeriğine sahip, farklı ölçekteki akademik çalışmalar ulusal yapılanma içinde bilimsel olarak; yeni süreçler, yeni sistemler ve yeni malzemelerin tanımlanabilmesinde oldukça önemli bir yere sahiptir. Elde edilen bilginin ulusal olmasının yanında, niteliğiyle uluslararasılaşabilme davranışı ile gelen noktada bilimsel alanının düzeyinin belirlenebilmesi de bilimsel politikaların gözden geçirilmesinde önemli veriler oluşturur. Mimari akustik ülkemizde gelişmekte olan bilim alanlarından biridir. Akademik yapı içinde söz konusu alana ilişkin; temel bilginin arttırılması, geliştirilmesi ve uygulanabilirliği için farklı ölçekte birçok çalışma yapılmıştır/yapılmaktadır. Bu çalışmada mimari akustik alanında son yirmi yıl içinde tamamlanmış olan lisansüstü çalışmalar içerik analiz yöntemi ile kategorize edilerek ulusal akademik sınırlar içinde yaklaşım ve farkındalığımız belirlenmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mimari Akustik

**EVALUATING THE IMPROVEMENT & THE CHANGE BEHAVIOR
FOR ARCHITECTURAL ACOUSTICS BY MEANS OF ACADEMIC
STUDIES****ABSTRACT**

Academic studies which includes developing basic knowledge by means of new information, experimental feasibility and applicability are vital owing to the fact that they contribute improvements about new processes, new systems and new materials in terms of scientific thought within the national scale. In addition to having the information for national scale, having a potential to be an international study in future is important. Besides all these qualifications, it is also important to specify the level of the academic research about reviewing the scientific approaches. Architectural acoustics field is one of the developing scientific fields in our country. There are lots of academic studies about this subject which contribute to basic knowledge with different scales. Postgraduate studies completed within the last two decades are categorized and the tendency and the national level of the studies are evaluated in detail.

Keywords: Architectural Acoustics

1. GİRİŞ

Akademik çalışmalar, herhangi bir bilimsel alanda ulusal ölçekte hangi seviyede ve hangi yaklaşımda olduğunu şeffaf bir şekilde göstermektedir. Akustik konusu uzun bir tarihe sahip olmasına rağmen halk için yapı üretimi yakın bir geçmişe tarihlendiği için özellikle bina ve doku ölçeğinde gürültü denetimi konusunun gelişmesi ülkelerin gelişmişlik düzeyine bağlı olarak farklılık göstermektedir.

Türkiye’de 2000’li yılların başına kadar herhangi bir yasal yaptırımını bulunmayan gürültü denetimi konusunda yasal mevzuat olarak ilk gelişme 2002 yılında resmi gazetede yayınlanan; “Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği” ile gerçekleşmiştir. Bu yönetmelik kapsamında yapı içi gürültü denetimi ve hacim akustiği konuları yer almamaktadır. Çevresel gürültü kapsamı ile birlikte yapı içi gürültü ve hacim akustiği konularını da içeren tam kapsamlı ilk yasal mevzuat ise, oldukça yakın bir dönemde, 2017 yılında resmi gazetede yayınlanan; “Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik’tir.

Fiziksel çevre etkilerinden biri olan gürültü konusu ve gürültünün denetimi, yapı fiziği sorunları ve çözümünde doğrudan kullanıcının konfor durumu ile ilişkilidir. Bu durumda kullanıcının; cinsiyeti, yaşı, kültürü, alışkanlıkları gibi kullanıcıya göre değişkenlik gösteren özellikler nedeni ile gürültüyü algılama ve bundan rahatsızlık duyma durumları da değişkendir. Ayrıca toplumun gelir düzeyi arttıkça mekandan konfor anlamında beklentileri daha düşük olanlara göre de farklılaşmaktadır. Bina üretiminde; ısı, su, yangın gibi doğrudan yapı sağlığı, kullanıcı sağlık ve güvenliğini tehdit eden/ebilecek ve kontrol edilemediğinde etkileri görülebilir/hissedilebilir olan yapı fiziği problemlerinin çözümünde uygulanabilir mevzuatlar tanımlanmasına rağmen tam anlamı ile yapılabilirliği başarılamamıştır. Kullanıcıyı öncelikle psikolojik olarak etkileyen gürültü ve denetimi konusunda ise; “Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik” Resmi Gazete 2017’de yürürlüğe girmiş olmasına rağmen, uygulama konusunda henüz gereken ölçüde duyarlılık/farkındalık çeşitli sebeplerle gelişmemiştir.

Çok kullanıcıli mekanlarda (çok amaçlı salon, oditoryum, konser salonu) işlevin gerektirdiği şartların sağlanabilmesi için akustik koşullar mutlaka sağlanmaya çalışılırken, bu işlev dışındaki mimari yapılar ve yerleşim dokusu önerilerinde aynı önemin verilmediği, mevcut uygulamalardan görülmektedir. Bireysel farkındalık ile bireysel mekanlarda ya da az sayıda binada gürültü denetimi konusu dikkate alınırken, toplumun büyük bir çoğunluğu bu durumdan; rahatsız değil, rahatsız olduğunun farkında değil, rahatsız olundu-

ğunda neler yapılabileceğinin farkında değil gibi durumlar söz konusudur. Bu noktada toplum genelinin farkında olabilmesi için; kullanıcı farkındalığının geliştirilmesi, mevzuatlar, akademik çalışmalar ve bunu destekleyen malzeme sektörünün niteliği ve duyarlılığı önem kazanmaktadır.

2. ÇALIŞMANIN AMAÇ, KAPSAM ve YÖNTEMİ

Mimari akustik ülkemizde gelişmekte olan bilim alanlarından biridir. Akademik yapı içinde söz konusu alana ilişkin; temel bilginin artırılması, geliştirilmesi, uygulanabilirliği, ayrıca konuya ilişkin yaşanmakta olan mevcut problemlerin tespiti, çözümü ve geliştirilmesi için farklı mimari ve kent-sel ölçekte birçok lisansüstü çalışma yapılmıştır/yapılmaktadır. Bu çalışmada; mimari akustik konusunda ulusal ölçekte yapılmış olan lisansüstü çalışmalar üzerinden bilimsel yaklaşımların belirlenmesi amaçlanmıştır.

Farkındalığı ve bir yapıdan beklentisi yakın bir geçmişte bilgiye dayalı olarak değişime uğramış olan kullanıcı/tüketici profilinin varlığı ve konuya ilişkin yönetmeliklerin yürürlüğe girme tarihleri dikkate alınarak, çalışma kapsamında; Türkiye’de mimari akustik konusuna ilişkin (2000-20) son yirmi yılda tamamlanmış olan lisansüstü çalışmalar incelenmiştir.

Bu araştırmada içerik analiz yöntemi kullanılmıştır. Akademik çalışmaları tespit edebilmek için YÖK’ün tez veri tabanı kullanılmıştır. Tezlerin taranmasında; “mimari akustik, gürültü, yapı akustiği, hacim akustiği, işitsel peyzaj, akustik ekoloji, akustik ölçüm, yutuculuk, yansıtıcılık, saçıcılık” gibi anahtar kelimeler ile arama yapılmıştır.

Ulaşılan çalışmaların çeşitli ölçütlere göre künyeleri oluşturulmuştur. Oluşturulan liste aktif bir tablo haline getirilerek istenilen ölçütlere göre sıralanabilmesi ve filtrelenebilmesi sağlanmıştır. Künye bilgileri için 12 adet ölçüt belirlenmiştir: yıl, kaynak türü, kaynak adı, ana konu, amaç, yöntem, konunun ele alınışı, yazar, üniversite, anabilim dalı, yazım dili, tez mevcudiyeti (kısmi örnek Şekil 1).

Yıl	Kaynak Türü	Kaynak Adı	Ana Konu	Amaç	Yöntem	Konunun Ele Alınışı	Yazar	Üniversite	Ana Bilim Dalı	Yazım Dili	Tez Mevcudiyeti-Notlar
2012	Tez-Doktora	PEYZAJ MİMARLIĞINDA 'AKUSTİK EKOLOJİ': 'SESPEYZAJLARI'NIN İZMİR KENTİ ÖRNEĞİNDE İRDELENMESİ	İşitsel Peyzaj (Subjektif Algı)	farklı kurguları ve amaçları olan kamusal dış mekanlarda kullanıcılara tercihlerinin işitsel yönden sağlanması temeli alınarak sespeyzajlarının tanımlanmasına ve sorgulanması, elde edilen birikimin mekanların fiziksel biçimlendirilmesine uygulanması	Ölçüm+Anket	Çok Yönlü Değerlendirme	Meltem Yağmur Wallace	Ege Üniversitesi	Peyzaj Mimarlığı	Türkçe	Mevcut
2017	Tez-Doktora	NANOFIBROUS RESONANT MEMBRANE FOR ACOUSTIC APPLICATIONS	Malzeme (Yutucu)	Özellikleri kontrol edilebilen yüzeylerin eldesinin mümkün olduğu, nano boyutta liflerin imal edilebileceği "elektro-egirme" teknolojilerinden faydalanılması planlanmış ve tez kapsamında; beyaz esya kaynaklı gürültünün azaltılmasına yönelik, nanolifli rezonant membran esaslı bir materyal geliştirilmesi amaçlanmıştır	Ölçüm	Yeni Bir Yaklaşım ve Öneri	Merve Küçükali Öztürk	İstanbul Teknik Üniversitesi	Tekstil Mühendisliği	İngilizce	Mevcut
2016	Tez-Doktora	AN APPROACH FOR DEVELOPING ROAD TRAFFIC NOISE ANNOYANCE PREDICTION MODEL	Çevresel Gürültü Denetimi (Subjektif Algı)	gürültü göstergeleri kullanmadan, hem akustik hem de sosyal etkileri için içine katan yerel karayolu trafik gürültüsü rahatsızlığı tahmin modeli geliştirmek	Ölçüm+Simülasyon +Anket	Yeni Bir Yaklaşım ve Öneri	Mine Dinçer	İstanbul Teknik Üniversitesi	Mimarlık	İngilizce	Mevcut
2019	Tez-Doktora	A MODEL FOR ASSESSING ACOUSTIC COMFORT IN ENCLOSED PUBLIC SPACES	Hacim Akustiği (Subjektif Algı)	yemek mekanları özelinde, akustik amaçlı kullanılmayan kapalı kamusal alanlarda akustik konfor değerlendirmeleri ile psikoakustik parametrelerin ilişkisini araştırmak	Ölçüm+Simülasyon +Anket	Çok Yönlü Değerlendirme	Onurcan Çakır	Zirmit Yüksek Teknoloji Enstitüsü	Mimarlık	İngilizce	Mevcut
2009	Tez-Doktora	A MODELLING METHOD FOR OPTIMISING THE SEATING ARRANGEMENT AT THE ACOUSTICAL DESIGN STAGE OF HALLS	Hacim Akustiği (İşlev Örneği)	optimum oturma düzeninin oluşturulmasına yönelik olarak mimari tasarımın başlangıç aşamasında kullanılabilecek ipuçları elde edilmesi	Simülasyon	Durum/Vaka Tespiti	Özgül Yılmaz Karaman	Dokuz Eylül Üniversitesi	Mimarlık	İngilizce	Mevcut

Şekil 1. Akustik Alanında Yerel Ölçekte Yapılmış Tezler – Örnek Liste

Bu kapsamda farklı anabilim dallarında yazılmış toplam 190 adet; 24 adet doktora, 166 adet yüksek lisans tez çalışmasına ulaşılmıştır. Tespit edilen tezlerin araştırma konuları üzerinden ortak ana kategorileri belirlenmiştir.

3. LİSANSÜSTÜ ÇALIŞMALARDAKİ ANA KATEGORİLER

190 adet lisansüstü çalışma için içerik analiz yöntemine göre sekiz ana kategori belirlenmiş ve dağılımı yapılmıştır (Tablo 1);

1. Hacim Akustiği
2. Çevresel Gürültü Denetimi
3. Malzeme
4. Yapı İçi Gürültü Denetimi
5. İşitsel Peyzaj
6. Makine Gürültü Denetimi
7. Yapı Fiziği Optimizasyon
8. Akustik Ölçüm Tekniği Geliştirme

Analize konu olan "Mimari akustik" bağlamında yapılmış olan 190 adet lisansüstü çalışmada tespit edilmiş olan sekiz ana kategori olmasına rağmen bazı tezlerde karma yapıda gözlenmiştir;

- Yapı İçi Gürültü Denetimi + Hacim Akustiği,
- Çevresel Gürültü Denetimi + Yapı İçi Gürültü Denetimi + Hacim Akustiği,
- Çevresel Gürültü Denetimi + Yapı İçi Gürültü Denetimi şeklindedir.

Tablo 1. Ana Kategoriye Yönelik Analizler

Ana Kategori	Adet	Yüzde
1. Hacim Akustiği	82	% 43,15
2. Çevresel Gürültü Denetimi	31	% 16,31
3. Malzeme	20	% 10,52
4. Yapı İçi Gürültü Denetimi	13	% 6,84
5. İşitsel Peyzaj	12	% 6,31
• Yapı İçi Gürültü Denetimi + Hacim Akustiği	9	% 4,73
6. Makine Gürültü Denetimi	6	% 3,15
7. Yapı Fiziki Optimizasyon	5	% 2,63
• Çevresel Gürültü Denetimi + Yapı İçi Gürültü Denetimi + Hacim Akustiği	5	% 2,63
• Çevresel Gürültü Denetimi + Yapı İçi Gürültü Denetimi	4	% 2,10
8. Akustik Ölçüm Tekniği Geliştirme	3	% 1,57
TOPLAM	190	-

Tablo 1’de görülebileceği gibi; **Hacim Akustiği** konusunda; **82 adet** [5, 7, 12, 13,14, 21, 24, 25, 26, 28, 29, 31, 33, 35, 36, 37, 38, 45, 53, 54, 56, 59, 60, 64, 65, 67, 68, 71, 73, 74, 77, 79, 80, 81, 84, 88, 90, 91, 95, 97, 98, 101, 102, 103, 105, 106, 108, 109, 110, 111, 113, 115, 116, 119, 120, 123, 125, 135, 137, 141, 143, 144, 149, 151, 153, 154, 155, 158, 159, 160, 164, 167, 169, 170, 173, 175, 178, 180, 181, 183, 185, 187], **Çevresel Gürültü Denetimi** konusunda; **31 adet** [10, 11, 15, 23, 27, 34, 44, 50, 52, 61, 63, 75, 76, 100, 104, 117, 118, 128, 132, 133, 139, 142, 145, 148, 150, 157, 177, 179, 182, 189], **Malzeme** konusunda; **20 adet** [4, 9, 19, 20, 40, 48, 62, 83, 85, 87, 96, 121, 131, 134, 146, 147, 161, 171, 174, 190], **Yapı İçi Gürültü Denetimi** konusunda; **13 adet** [3, 22, 32, 41, 47, 51, 55, 66, 92, 99, 112, 126, 163], **İşitsel Peyzaj** konusunda; **12 adet** [1, 2, 6, 8, 57, 94, 114, 122, 152, 168, 176, 188], **Yapı İçi Gürültü Denetimi + Hacim Akustiği** konusunda; **9 adet** [17, 18, 30, 70, 107, 129, 140, 156, 186], **Makine Gürültü Denetimi** konusunda; **6 adet** [16, 49, 78, 124, 130, 136], **Yapı Fiziki Optimizasyon** konusunda; **5 adet** [69, 93, 127, 172, 184], **Çevresel Gürültü Denetimi + Yapı İçi Gürültü Denetimi + Hacim Akustiği** konusunda; **5 adet** [58, 72, 86, 162, 165], **Çevresel Gürültü Denetimi + Yapı İçi Gürültü Denetimi** konusunda; **4 adet** [39, 42, 46, 166], **Akustik Ölçüm Tekniği Geliştirme** konusunda; **3 adet** [43, 82, 89] tez çalışması tespit edilmiştir.

Hacim Akustiği

Ana kategori olarak tespit edilen; hacim akustiği konusunda yapılan çalışmalar %43,15 oranı ile çalışmaların büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu kapsamda yapılan tezlerin büyük bir çoğunluğu bir bina veya mahal işlevi örneği üzerinden, simülasyon yöntemi ile analiz edilerek kurgulanmıştır. Çok az sayıda tezde deneysel yöntemler veya akustik ölçümler ile yapılan analizlere yer verildiği görülmüştür. Analizlere konu olan işlevler; oditoryum, çok amaçlı salon, eğitim derslikleri ve açık ofislerdir. İkincil sıklıkta; AVM, öğrenci yurdu ve camilerin analiz edildiği tespit edilmiştir.

Araştırmalara konu olan işleve sahip bu binalar ya da mekanlar genellikle mevcut olup, kullanım süresince yaşanan sorunlar ya da farklı sebepler ile sonradan durum tespiti yapmak amacı ile bu çalışmaların yapılması dikkat çekicidir. Bazı çalışmalarda bilginin belli bir alanda deneyimlenmesi için yapılmıştır. Bu amaçla genellikle izin alınması, mekanda ölçüm yapılması kolay olan yurt, konferans salonu gibi üniversite yerleşkeleri içinde yer alan birimler seçilmiştir.

Bu ana kategoride %43,15 oranında akademik çalışma üretilmiş olmasının sebeplerini tespit etmek kolay olmasa da yapılan çalışmalar incelendiğinde; mevcut yapılarda tespiti ve incelemesi daha ulaşılabilir olmasının bu kategorinin sıklıkla ele alınmasının sebeplerinden biri olabileceği tahmin edilmektedir. Ayrıca son yirmi yılda üretilen her iki çalışmadan neredeyse birinin bu ana kategoride olması nedeniyle; bu konuda ulusal ölçekte diğer kategorilere göre daha yüksek bir farkındalık, bilinç ve/veya gelişim gösterilmiş olması beklenir. Bu beklenen sonucun gerçekleşip gerçekleşmediği ise ayrı bir araştırma ve tartışma konusudur.

Çevresel Gürültü Denetimi

Ana kategori olarak tespit edilen; Çevresel gürültü denetimi konusunda yapılan çalışmalar %16,31 oranına sahiptir. 36 adet lisansüstü çalışma tespit edilmiştir. Bu çalışmalarda ana kategori; Çevresel gürültü denetimi olmasına rağmen bazıları buna ek olarak; Hacim Akustiği ve Yapı İçi Gürültü Denetimi konularını da içermektedir. Bu kapsamda özellikle Şehir ve Bölge Planlama bölümü tarafından da gürültü haritalarının oluşturulmasına yönelik oldukça fazla sayıda tez çalışması yapıldığı görülmüştür [23, 50, 76, 104, 128, 133, 138, 148, 150, 179]. Bu çalışmalar, gelişmekte olan yerleşimlerde, dokunun gürültü karakterini tanımlamak ve alınabilecek önlemler üzerinden planı revize edebilmek açısından önemlidir.

Bu kategoride yapılan çalışma sayısı yapı içi gürültü denetimine göre daha yüksektir. Bunun sebebi olarak; Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve

Yönetimi Yönetmeliği'nin 2005 tarihi itibari ile yürürlükte olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Yönetmeliğin yürürlüğe girme tarihi itibari ile 36 adet tez, öncesinde ise 4 adet tez yapılmış olması da bu düşüncüyü doğrulamaktadır. Bu dağılıma göre; araştırmacıların yönetmeliğin yürürlüğe girmesi ile araştırma konusu ve çalışma alanı belirledikleri ve yönetmeliğe olan uygunluğunun analiz edilmeye çalışıldığı sonucu çıkarılabilir. Çevresel gürültü konusunda kullanıcı şikayeti/tasarımcı öngörüsünden önce ulusal mevzuatların araştırma konusunu yönlendirmesi bu konuda hassasiyetin/farkındalığın yeterince gelişmediği fikrini de güçlendirmektedir.

Malzeme

Ana kategorilerden malzeme alanında; yalıtım, yutucu ve saçıcı malzemeler olmak üzere üç temel konuda çalışmaların genellikle karşılaştırmalı deneysel analizler ile yapıldığı tespit edilmiştir. Sayıları henüz çok olmasa da ekolojik kaygıların da gözetildiği tezler vardır. Bu çalışmalarda ortak amaç; endüstriyel yapı malzemelerine alternatif olabilecek yenilikçi ve doğal malzemelerin ses yutuculuk performanslarını araştırmaktır. Tekstil Mühendisliği anabilim dalında da yapılmış ve mimari akustik alanı ile ilgili bir içeriğe sahip lisansüstü çalışmalar da bu envanter çalışmasına dahil edilmiştir.

Yapı İçi Gürültü Denetimi

Ana kategorisi gürültü denetimi olan tezlerde genellikle yapı elemanı performanslarının simülasyon ile karşılaştırma analizlerine yer verildiği görülmüştür. Çevresel gürültü denetimi ve yapı içi gürültü denetimi konularında yapılan çeşitli çalışmalar vardır. Ancak bu geniş konuların henüz her yönüyle ele alınmadığı tespit edilmiştir. Örneğin; gürültü denetiminin subjektif değerlendirilmesi noktasında ele alınabilecek farklı noktalar olduğu değerlendirilmiştir.

Akustik; diğer yapı fiziki dalları arasında insan sağlığını ve psikolojisini doğrudan etkilemesi açısından ayrı bir öneme sahiptir. Bu sebeple bu konuda yapılacak bilimsel çalışmalarda insan faktörünü ve subjektif değerlendirmeleri göz ardı etmemek gerekir. Yasal mevzuatlar yerel, ulusal ve uluslararası ölçekte çeşitli sayısal ölçütler ile akustik konforun sağlanmasına yönelik sınırları çizmektedir. Ancak bunlar her koşulda rahatsızlık düzeyini yansıtamayabilir. Farklı sosyo-ekonomik düzeyler, farklı kültürler, farklı yaş grupları gibi daha alt ölçekteki farklılıklara bakmak gerekebilir.

Envanter çalışması kapsamındaki tezler arasında subjektif algı konusuna yer verilen çalışmalar ayrıca incelenmiştir. 190 adet akademik çalışma arasından 15 tanesinde bu konuya yer verildiği tespit edilmiştir [2, 3, 6, 8, 10, 12, 17,

18, 41, 57, 103, 112, 114, 129, 163]. Ulaşılan çalışmaların 7 (yedi) tanesi yapı içi gürültü denetimi ana kategorisinde yazılmıştır. Bu çalışmalarda dikkat çeken ortak içerik; öznel değerlendirmeler ile nesnel gereksinimlerin çeşitli açılardan karşılaştırılmış olmasıdır.

İşitsel Peyzaj

İşitsel peyzaj alanında az sayıda teze rastlanmıştır. Bu konu subjektif algı ile doğrudan ilişkili olduğundan yazılan tezlerde çoğunlukla anket yöntemi ile deneysel analizlere yer verildiği görülmüştür.

Makine Gürültü Denetimi

Bu ana başlık kapsamında yazılan tezlerin tamamı Makine Mühendisliği anabilim dalından yazarlar tarafından yazılmıştır. Ancak oldukça kapsamlı olan bu alan ile ilgili olarak yalnızca mimari akustik alanını kapsayacak tezler envanter çalışmasına dahil edilmiştir. Çeşitli ekipmanların analizi gibi tamamen makine gürültüsü ile ilişkili tezler inceleme kapsam dışında tutulmuştur.

Yapı Fiziği Optimizasyon

Mimari akustik alanının, diğer yapı fiziği disiplinleri ile bir arada bir değerlendirilmesini içeren oldukça az sayıda çalışma yapıldığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışmaların çok büyük bir çoğunluğunda yapı kabuğu özelinde ısı konfor ve akustik konfor bir arada incelenmiştir. Bazı çalışmalarda ilave olarak görsel gereksinimler akustik konfor ile birlikte ele alınmıştır.

Hem bu alanda yapılmış bilimsel çalışmalara bakıldığında hem de yasal mevzuatlarda yapı fiziği konularının bir arada ele alınmamış olduğu görülmektedir. Bir binanın üretimi aşamasında mimari, statik, yangın, akustik, ısı ve daha pek çok disipline ait farklı gereklilikler bir arada sağlanmak durumundadır. Bu noktada bir disiplin için ihtiyaç olan çözüm, kimi zaman diğer disiplinlerin ihtiyaçları ile örtüşmemekte, hatta ters yönde etki gösterebilmektedir. Bu sebeple bu ihtiyaçların bir arada değerlendirilmesine yönelik bir bilimsel yaklaşım getirmek ve bir optimizasyon önerisinde bulunmanın bir ihtiyaç olduğu düşünülmektedir. Bu alanda bilimsel çalışma sayısının artırılmasının yanında yasal düzenlemelerin de bu bütüncül yaklaşım konusunda gelişmesinin önemli olduğu düşünülmektedir.

Akustik Ölçüm Tekniği Geliştirme

Bu ana kategori kapsamında yapılan tezler; ölçüm düzeneği ve sistemlerine yönelik geliştirilen yeni yaklaşımları içermektedir. Bu alanda yazılmış çok az sayıda tez çalışması bulunmaktadır. Yapılmış mevcut çalışmalar yeni bir yak-

laşım önerisinde bulunması ve gelecekteki bilimsel çalışmalar ile geliştirilebilmesine imkan tanınması açısından önemli olarak değerlendirilmiştir.

Sekiz ana kategoriye göre yapılmış olan çalışmalar mevcut bir alan, bina, yapı elemanı üzerinden simülasyon, anket gibi analizler ile ağırlıklı olarak tespit niteliğindedir. Yeni bir sistem, yöntem, model önerisi oldukça azdır.

Çalışmaların yönetmeliklerin gölgesinde kaldığı ve yönetmeliklere göre çalışmanın doğrulandığı görülmektedir. Yönetmeliklerin önüne geçer nitelikte çalışmalar oldukça azdır. Bu durum çalışmaların yasal mevzuata paralel ilerlediğini, araştırma-geliştirme, yenilik getirme yönünün gelişmekte olduğunu ifade etmektedir.

4. ÇALIŞMALARIN METODOLOJİSİ

İncelenen tezlerin bir kısmında; amacın anlaşılır şekilde ifade edilmediği, hatta amacın belirtilmediği, en önemlisi çok sayıda tezde hipotezin yer almadığı tespit edilmiştir. Tam metnine ulaşılarak incelenme imkanı bulunan tezlerin ise amaçlarının çoğunun çalışmada incelenen yapının ve/veya malzemenin üzerinden ifade edildiği görülmüştür. Bu sebeple amaç başlığı altında tezler arasında herhangi bir kategorizasyon ve analiz yapmak mümkün olmamıştır. Ancak kullanılan yöntemler ve konunun ele alınışı belirli başlıklar altında kategorize edilebilmiştir. İncelenen tezlerde kullanılan yöntemler (Tablo 2) dört başlıkta toparlanmıştır:

1. Simülasyon/Hesaplama
2. Ölçüm; uzun/kısa dönemli çevresel gürültü ölçümleri, hava/katı doğuşlu ses yalıtımı ölçümleri, arka plan gürültüsü ölçümleri, empedans tüpü yöntemiyle ses yutuculuk/hava akış direnci ölçümleri)
3. Kavramsal; mimari akustik konusunda teorik bilgiler, kavramlar, literatür araştırmaları
4. Anket

Bazı tez çalışmalarında birden fazla yöntem aracılığı ile çalışmaların yürütüldüğü de görülmüştür;

- Ölçüm + Simülasyon/Hesaplama,
- Ölçüm + Simülasyon/Hesaplama + Anket,
- Ölçüm + Anket,
- Simülasyon/Hesaplama + Anket

Simülasyon/Hesaplama yöntemi olarak, yalnızca akustik yazılım ve hesap metotları değil, aynı zamanda MATLAB, sonlu elemanlar yöntemi gibi yöntemlerin kullanılması durumunda da bu kategorizasyona dahil edilmiştir. Ölçüm yöntemi; saha ve laboratuvar ortamında yapılan akustik ölçüm çalışmalarını kapsamaktadır. Bunlardan bazıları ortam gürültü düzeyi ölçümleri olduğu gibi, bazıları da kapalı mekanlarda yansım süresi ölçümleri ve benzerleridir. Literatürde yer alan bilgilerin bir araya toplanması ve yorumlanması şeklindeki çalışmalar, kavramsal çalışmalar yöntemi kategorizasyonuna dahil edilmiştir. Subjektif değerlendirmelerin çalışmalara dahil edilmesi durumunda genellikle anket yöntemine başvurulmuştur. Kimi çalışmalarda anket çalışmaları ile birlikte dinleme testleri de yapılmıştır.

Tablo 2. Yöntemlere Yönelik Analizler

Yöntem	Adet	Yüzde
1. Simülasyon/Hesaplama	54	% 31,03
• Ölçüm + Simülasyon	54	% 31,03
• Ölçüm + Simülasyon + Anket	21	% 12,06
2. Ölçüm	16	% 9,19
• Ölçüm + Anket	15	% 8,62
3. Kavramsal	10	% 5,74
• Simülasyon + Anket	3	% 1,72
4. Anket	1	% 0,57
TOPLAM	174 *	-

* Yazılmış olan tezlerden yayınlanma izni olmayanlar için amaç, yöntem ve konunun ele alınışı analizi yapılamamıştır. Bu sebeple 190 adet tezdten 174 tanesi için değerlendirme yapılmıştır, kalan 16 adet tez için dijital ortamda erişim izni bulunmamaktadır.

Tablo 2'deki analizlere bakıldığında simülasyon/hesaplama yönteminin sıklıkla tercih edildiği görülmektedir. Gerek simülasyon/hesaplama gerekse ölçüm yöntemlerinin gerçek durumu yansıtma konusunda belirli hata paylarını barındırdığı bilinmektedir. Simülasyon çalışmalarında belirli kabuller üzerinden ilerlenmesi söz konusu olduğundan, bu yöntemin hata paylarının ölçüm yöntemine göre daha fazla olabileceği düşünülebilir. En gerçekçi sonuçlar, hem ölçüm hem de simülasyon çalışması yapılarak, sonuçlar arasında bağlantı kurulması ile elde edilecektir. Ancak, bu ikili doğrulamanın yapılması harcanan süre ve ölçüm için gerekli olan ekipmanların bulunabilmesi açısından her zaman çok verimli olmayabilir. Daha kolay ulaşılabilir olması ve kısa zamanda çok daha fazla örneklem üretilebilmesi sebebiyle simülasyon/hesaplama yönteminin en çok tercih edilen yöntem olduğu tahmin edilmektedir. İncelenen

tezlerde konunun ele alınışı (Tablo 3) ise üç ana başlıkta toparlanmıştır:

1. Çok Yönlü Değerlendirme
2. Durum/Vaka Tespiti
3. Yeni Bir Yaklaşım ve Öneri olarak kategorize edilmiştir.

Tablo 3’deki analizlere bakıldığında konunun ele alınışına ilişkin en çok karşılaşılan; “Çok Yönlü Değerlendirme” olmuştur. Birden fazla vakanın analiz edildiği veya çalışılan konuda geniş kapsamlı analizler yapılması durumunda çalışma bu kategorizasyona dahil edilmiştir. Çoğunlukla daha tekil analizlerin yapılması durumunda ise; “Durum/Vaka Tespiti” kategorizasyonu seçilmiştir. Yeni Bir Yaklaşım ve Öneri ise; konulara literatürden ve alışlagelmiş yöntemlerden ayrı bir yaklaşım geliştirilen çalışmalardır.

Tablo 3. Konunun Ele Alınışına Yönelik Analizler

Konun Ele Alınışı	Adet	Yüzde
1. Çok Yönlü Değerlendirme	78	% 44,82
2. Durum/Vaka Tespiti	71	% 40,80
3. Yeni Bir Yaklaşım ve Öneri	25	% 14,36
TOPLAM	174 *	-

*174 lisansüstü çalışma için değerlendirme yapılmıştır.

Doktora çalışmaları, yüksek lisans çalışmalarına kıyasla çok daha özgün bir içerik oluşturulması gereken çalışmalardır. Dolayısıyla konunun ele alınışının; “Yeni Bir Yaklaşım ve Öneri” kategorisinde olduğu akademik çalışmaların genellikle doktora tezlerinde karşımıza çıkması beklenen bir durumdur. Bu kategorizasyona dahil olan çalışmaların % 36’sı doktora, % 64’ü yüksek lisans tezlerinden oluşmaktadır. Bunun birincil sebebi; araştırmaya dahil edilen doktora tezlerinin toplam sayısının, yüksek lisans tezlerine göre çok daha az olmasıdır. Bu sebeple bu kategorizasyonu doktora tezleri arasında ve yüksek lisans tezleri arasında olmak üzere ayrı ayrı ele almak daha doğru olacaktır. Buna göre; doktora tezleri arasından % 29,13’ü Yeni Bir Yaklaşım ve Öneri kategorisinde yer alırken, yüksek lisans tezleri arasından sadece % 10,59’u Yeni Bir Yaklaşım ve Öneri kategorisinde yer almaktadır. Bu sonuçlar, konu başında belirtilen beklenen durumu yansıtır niteliktedir.

5. DİĞER ANALİZLER

Lisansüstü çalışmalara ilişkin yapılan detaylı kategorizasyon ile; yıl, üniversite, anabilim dalı ve yazım diline yönelik sonuçlar elde edilmesi mümkün olmuştur. Yıllara göre yapılan analizler beş yıllık periyotlar şeklinde yapılmıştır (Tablo 4). Envanter çalışması kapsamında son yirmi yılda mimari akustik alanında yapılmış olan çalışmalar dikkate alındığından 2000 yılından itibaren kategorizasyon yapılmıştır.

Tablo 4. Beş Yıllık Periyotlara Yönelik Analizler

Yıl Periyodu	Adet	Yüzde
2015 – 2019	88	% 49,16
2010 – 2014	45	% 25,14
2005 – 2009	36	% 20,11
2000 – 2004	10	% 5,59
TOPLAM	179 *	-

* Beş yıllık periyotlar halindeki değerlendirmenin kendi içinde tutarlı bir kıyaslama gösterebilmesi için 2020 yılında yapılmış olan çalışmalar yüzdesel analiz dışında tutulmuştur. 2020 yılında yazılmış toplamda 11 adet teze ulaşılmıştır.

Tablo 4'deki analizlere bakıldığında neredeyse yarısının 2015-2019 yılları arasında yazılmış olduğu görülmektedir. Bu durum, ülkemizde mimari akustik alanın son yıllarda hızlı bir gelişme içinde olduğunu göstermektedir. 2018 yılı itibariyle yürürlüğe girmiş olan “Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik” ile birlikte önümüzdeki yıllarda bu gelişimin daha da fazla hız kazanacağı öngörülebilir.

Lisansüstü çalışmaların üniversitelere göre dağılımına (Tablo 5) bakıldığında ağırlıklı olarak devlet üniversitesi olduğu görülmektedir. Bu üniversitelerin uluslararası bilimsel işbirliklerinin olması, mühendislik bölümleri içermesi, ilgili konuda laboratuvarlarının olması ve üniversitelerin yaşı itibari ile alanda uzman akademisyen sayısının fazla olması, bu konuda bu üniversitelerin daha çok çalışmasına neden olduğu fikrini güçlendirmektedir.

Tablo 5. Üniversitelere Yönelik Analizler

Üniversite	Adet	Yüzde
İstanbul Teknik Üniversitesi	54	% 28,42
Yıldız Teknik Üniversitesi	49	% 25,78
Orta Doğu Teknik Üniversitesi	25	% 13,15
Gazi Üniversitesi	14	% 7,36
Dokuz Eylül Üniversitesi	13	% 6,84
Diğer *	35	% 18,42
TOPLAM	190	-

* Diğer üniversiteler; Abdullah Gül Üniversitesi, Anadolu Üniversitesi, Atılım Üniversitesi, Bahçeşehir Üniversitesi, Balıkesir Üniversitesi, Bilkent Üniversitesi, Çankaya Üniversitesi, Ege Üniversitesi, Erciyes Üniversitesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Gaziantep Üniversitesi, İstanbul Arel Üniversitesi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kadir Has Üniversitesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Konya Teknik Üniversitesi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi ve Yaşar Üniversitesi'dir.

YÖK'ün tez veri tabanı üzerinden belirtilen anahtar kelimeler ile yapılan taramada Mimarlık dışında farklı disiplinlerin de bu alanda çalıştıkları tespit edilmiştir. Ancak, farklı disiplinlerin mimarlık ile ilişkili olan çalışmaları dikkate alınmıştır. Bu nedenle anabilim dalı dağılımına bakıldığında (Tablo 6) en fazla Mimarlık olması beklenen bir sonuçtur.

Tablo 6. Anabilim Dalına Yönelik Analizler

Anabilim Dalı	Adet	Yüzde
Mimarlık	152	% 80,00
Makine Mühendisliği	17	% 8,94
Müzik Bilimleri	5	% 2,63
İç Mimarlık	4	% 2,10
Tekstil Mühendisliği	2	% 1,05
Diğer *	10	% 5,26
TOPLAM	190	-

* Diğer anabilim dalları; Çevre Bilimleri, Fizik Mühendisliği, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı, Müzik Teknolojileri, Peyzaj Mimarlığı, Ses Teknolojileri, Şehir ve Bölge Planlama.

İncelenen lisansüstü çalışmaların yazım dillerine göre dağılımına (Tablo 7) bakıldığında yaklaşık %75'inin Türkçe yazıldığı görülmektedir. Bu durum geri kalan yaklaşık %25'inin İngilizce dilinde olması ile uluslararası kaynak

kullanımında yararlanılabilir olduğunu ifade etmektedir. Böylece ilgili üniversitenin, akademisyenlerin mimari akustik konusunda bilinirliği ve bilimsel olarak ülkenin temsili önemlidir. İngilizce olarak yazılan 46 adet tezin 25'i ODTÜ bünyesinde yapılmış çalışmalardır.

Tablo 7. Yazım Diline Yönelik Analizler

Yazım Dili	Adet	Yüzde
Türkçe	144	% 75,79
İngilizce	46	% 24,21
TOPLAM	190	-

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Mimari akustik alanında son yirmi yılda yapılmış olan lisansüstü çalışmaların analizi bu bilim alanında Türkiye'deki bina üretim yaklaşımlarına bağlı olarak oluşan sorunları, çözüm önerilerini, yapılması gereklilikleri ifade etmektedir. Burada ölçek yönetmeliklerdir. Sorunlar yönetmeliklerin içeriğinin üzerinde tespit edilmiş olabilir. Ancak yapılabilirlik sınırlarını ulusal ölçekte yönetmelikler belirlemektedir.

Analiz edilen çalışmalara bakıldığında ağırlıklı olarak yönetmeliklere paralel olarak arttığı, geliştiği ve mevcut olan binalar özelinde yapıldığı gözlenmiştir. Bu seçim ve zamanlama ile iki konuyu sorgulamak gerekir; Kullanıcı şikayetleri mi arttı?, Yönetmelikler ile mevcut binaların sorgulanması ihtiyacı mı oluştu?. Bu sorgulama akademik çalışmalarda yukarıda belirtildiği gibi çalışmaların ağırlıkta iki ana kategoride çalışma içeriği oluşturmaktadır; Birincisi; yönetmelikler ile bina/mekanın uygunluğunun ölçülmesi; uyumluluk. İkincisi; Binanın/mekanın kullanımı ile kullanıcı şikayetlerinin artması; sorun-tespit-bina özelinde çözüm üretimi. Analiz edilen lisansüstü çalışmalar bakıldığında;

Ana konu olarak bir işlev örneği üzerinden yapılmış hacim akustiği konusundaki çalışmalar oldukça fazla sayıdadır. Mimari akustik alanının dahil edildiği yapı fiziki optimizasyonu konusunda ve akustik ölçüm tekniği geliştirme konusunda da oldukça az sayıda çalışma yapılmış olduğu dikkat çekmektedir.

Yapılmış olan tezlerde yazarlar tarafından dikkat çekilmiş olan bir konu da; bir mekan veya bina için mimari akustik alanında yapılacak olan çalışmaların planlama aşamasında dikkate alınmasının önemidir. Böylece fayda,

verim ve ekonomik kazanımların olabileceğine vurgu yapılmıştır [5, 32, 120, 164]. Bu farkındalığın oluşması için ülkemizde henüz yeni gelişmekte olan mimari akustik alanında yapılacak yeni çalışmalar önemli olacaktır.

Bu çalışma yüksek lisans ve doktora çalışmalarını bütüncül olarak değerlendirebilme imkanı vermiştir. Buna göre yapılmış olan çalışmalar arasında etki değeri açısından farklılıklar olduğu görülmüştür. Kimi çalışmalar yalnızca tek bir örnek özelinde tespit ve çözüm sunarken, kimi çalışmalar bilimsel olarak etki değeri daha yüksek yenilikçi çözümler sunmaktadır. Ülkemizde halen gelişim ve ilerleme süreci devam eden mimari akustik alanının, etki değeri yüksek yeni çalışmalar ile daha da gelişebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Özçevik A. (2012). 'İşitsel Peyzaj- Soundscape' Kavramı İle Kentsel Akustik Konforun İrdelenmesinde Yeni Bir Yaklaşım (Doktora Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [2] Aburawis A. (2019). Evaluating The Relationship Between Indoor Soundscape Perception And Overall Spatial Experience Through Acoustical Post-Occupancy Evaluation (Doktora Tezi). Çankaya Üniversitesi, Ankara.
- [3] Dümen Ş. A. (2020). Konutlarda Akustik Performansın Mevzuat Ve Subjektif Etki Bağlamında Değerlendirilmesi İçin Bir Yaklaşım (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [4] Döşemeciler A. (2011). A Study On Number Theoretic Construction And Prediction Of Two Dimensional Acoustic Diffusers For Architectural Applications (Doktora Tezi). İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir.
- [5] Glass A. (2020). Akustik İşlevli Salonlarda Algoritmik Bir Tasarım Yöntemi ve Üç Boyutlu Aktif Simülasyon Programı (Doktora Tezi). Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, İstanbul.
- [6] Aydın Ç. D. (2017). İşitsel Peyzajda Ses Çevresi Memnuniyet Düzeyinin Bulanık Mantık İle Tahmin Edilmesi: Diyarbakır Suriçi Uygulaması (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [7] Topraktaş L. (2003). Acoustical Properties Of Classical Ottoman Mosques Simulation And Measurements (Doktora Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [8] Wallace M. Y. (2012). Peyzaj Mimarlığında 'Akustik Ekoloji': 'Sespeyzajları'nın İzmir Kenti Örneğinde İrdelenmesi (Doktora Tezi). Ege Üniversitesi, İzmir.
- [9] Öztürk M. K. (2017). Nanofibrous Resonant Membrane For Acoustic Applications (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [10] Dinçer M. (2016). An Approach For Developing Road Traffic Noise Annoyance Prediction Model (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [11] İlgürel N. (2009). Sanayi Yapılarının Tasarımında Gürültünün Bir Ölçüt Olarak Değerlendirilmesi İçin Bir Yöntem Geliştirilmesi (Doktora Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [12] Çakır O. (2019). A Model For Assessing Acoustic Comfort In Enclosed Public Spaces (Doktora Tezi). İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir.

- [13] Karaman Ö. Y. (2009). A Modelling Method For Optimising The Seating Arrangement At The Acoustical Design Stage Of Halls (Doktora Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [14] Türkmen R. (2013). Oditoryumlarda Akustik Performansın İyileştirilmesine Yönelik Tasarım Parametrelerinin Geliştirilmesi ve Bir Örneklem (Doktora Tezi). Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [15] Özer S. S. (2014). Karayolu Gürültüsünün Denetlenmesinde Yol-Yapı İlişkisi Açısından Optimum Koşulların Belirlenmesi (Doktora Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [16] Alan S. (2016). Prediction of Ground Borne Vibrations Due To Railway Traffic (Doktora Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [17] Gürtürk S. Ö. (2020). Açık Planlı Bürolarda İşitsel Konforun Tasarım Parametresi Olarak Alınmasına Yönelik Bir Yaklaşım (Doktora Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [18] Vergili S. (2015). Gürültü Kontrolünün Sağlanması Ve Konuşma Anlaşılabilirliğinin İyileştirilmesine Yönelik Farklı Akustik Tasarımlar: Dokuz Eylül Üniversitesi Hastanesi Acil Servis Birimi (Doktora Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [19] Kocatepe S. (2019). Tavuk Tüyü Liflerinden Ses Yalıtım Amaçlı Dokusuz Yüzey Yapılarının Geliştirilmesi (Doktora Tezi). Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- [20] Bozkurt T. S. (2019). Tarihi Mekânlarda Kullanılan Sıva Yüzey Kaplamalarının Ses Yutma Katsayısının İncelenmesi Ve Geliştirilmesi (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [21] Seven Y. (2020). Mevcut Tip Kültür Merkezlerinde Yer Alan Çok Amaçlı Salonların Değişken Akustik Konfor Koşullarının İyileştirilmesine Yönelik Bir Yöntem Önerisi, Uygulanması Ve Sınanması (Doktora Tezi). Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [22] Karcı Z. S. (2020). A Model For Prediction Of Noise Levels In Open Plan Offices Based On Number Of Occupants (Doktora Tezi). İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir.
- [23] Özçetin Z. (2016). Celal Bayar Bulvarı Üzerinde Trafik Kaynaklı Gürültünün Analizi Ve Çevresel Etkilerinin Araştırılması Üzerine Bir Yöntem Önerisi (Doktora Tezi). Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [24] Gül Z. S. (2015). Assessment Of Non-Exponential Sound Energy Decays Within Multi-Domed Monuments By Numerical And Experimental Methods (Doktora Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [25] Aslan A. (2020). Experimental And Computational Evaluation Of Acoustical Performance Of Multipurpose Music Classrooms (Yüksek Lisans Tezi). Abdullah Gül Üniversitesi, Kayseri.
- [26] Kaygısız A. (2019). Mimar Sinan Camilerinden Şemsi Ahmet Paşa Camii (Üsküdar) İle T.C. Diyanet İşleri Başkanlığı Tip 3 Camii'nin Akustik Açından Karşılaştırılması (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [27] Vural A. R. (2015). Açık Hava Eğlence Mekanlarından Kaynaklanan Gürültünün İncelenmesi Ve Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [28] Tekin A. (2019). Konferans Salonlarının Akustik Açından Değerlendirilmesi: İzmir DEÜ Mimarlık Fakültesi Örneği (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [29] Vural A. (2009). İstanbul'da Bulunan Dört Konser Salonunun Akustik Açından Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [30] Yavuz A. (2007). Ses Kayıt Stüdyosu Tasarımı Ve Mimari Akustik (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

- [31] Aydın A. (2008). Acoustical Characteristics Of Historical Turkish Baths (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [32] Şentop A. (2013). Binaların Gürültü Kontrolü Etkin Tasarımı İçin Yapı Elemanı Seçim Aracı (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [33] Ünal A. (2006). Acoustical Analysis And Design Of Horn Type Loudspeakers (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [34] Kumbay A. (2006). İstanbul Tarihi Yarımada Kentsel Mekanlarının Gürültü Denetimi Açısından İncelenmesi; Değerlendirmeler ve Öneriler (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [35] Sabah A. (2013). Antik Çağ Konser Mekanlarından 20. Yüzyıl Mekansal Müzik Konser Salonlarına Müzik ve Mimarlık İlişkisi (Yüksek Lisans Tezi). Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, İstanbul.
- [36] Acar B. (2007). Açık Planlı Büro Yapılarında İşitsel Konforun Sağlanmasına Yönelik Yaklaşım Örnekleri (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [37] İlban B. (2016). Bilgisayar Simülasyonu Yöntemi İle Camilerin Akustik Açından Değerlendirilmesi Ve Düzenlenmesi: Trabzon ve Rize Örneği (Yüksek Lisans Tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- [38] Şahin B. D. (2019). Açık Planlı Ofis Yapılarında Akustik Konfor Koşullarının İncelenmesi: İzmir'de Bir Ofis Yapısı Örneği (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [39] Untuç B. (2017). Konservatuvarlarda Gürültü Denetimi-Kurgusal Bir Yapı Kapsamında Değerlendirmeler (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [40] Yazıcı B. (yıl). Biomimetic Acoustic Metamaterial Design For Architectural Applications (Yüksek Lisans Tezi). Bilkent Üniversitesi, Ankara.
- [41] Şan B. (2010). İlköğretim Okullarında Gürültüden Rahatsızlığın Alan Araştırması İle Belirlenmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [42] Tekinbaykal B. (2016). Konutlarda Gürültü Denetimi İçin Uygun Kesit Seçeneklerinin Modelleme Yoluyla Belirlenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [43] Erdal B. (2012). Ses İletim Kaybı Ölçüm Düzenliği Tasarımı ve Geliştirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [44] Bıyıklı B. E. (2015). Hafif Giydirmeye Cepheli Yüksek Yapıların Akustik Performanslarının Analizi Ve Bir Örneklem (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [45] Aktı B. (2014). Daire Planlı Ve Kubbe Bitişli Çok Amaçlı Salonlarda Akustik Performansın Tasarım Değişkenleri Aracılığıyla Simülasyon Programında İrdelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [46] Ak B. K. B. (2017). Öğrenci Yurtlarında Gürültü Sorunu-Bir Örnek Kapsamında Soruna Yönelik Çözüm Önerileri (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [47] Baççioğlu C. (2017). Odalar Arasında Hava Doğuşlu Ses Yalıtımının Yanal İletimler Dahil Edilerek Hesaplanması (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [48] Meriç C. (2008). Rezonatör Tip Susturucuların Akustik Analizi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [49] Yayladere C. (2014). Sound Power Level Prediction In Ducted Heating, Ventilating And Air Conditioning System (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.



- [50] Belek C. (2017). Çevresel Gürültünün Konaklama Tesislerine Olan Etkisi Üzerine Bir Araştırma ve Bir Örneklem (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [51] Daloğlu C. (2019). Özel Dersliklerin Akustik Performans Sınıfları Ve Akustik Proje Tanımları Kapsamında Değerlendirilmesi: İzmir B.B Müzik Sanat Atölyeleri Örneği (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [52] Ünver C. (2019). Ulaşım Gürültüsü Kontrolünde Bariyer Kullanımı Ve Bio-Bariyer Uygulamaları (Yüksek Lisans Tezi). Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir.
- [53] Özgenel Ç. F. (2012). Developing A Tool For Acoustical Performance Evaluation Throughout The Design (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [54] Kömürcü D. (2016). Antik Çağdan Günümüze Performans Mekanlarının Akustik ve Mimari Açından Gelişimi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [55] Beşiktepe D. (2007). İnşaat Sektöründe Şantiye Gürültüsünün Değerlendirilmesi: Bir Konut Şantiyesi Örneği (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [56] Acar D. (2015). Ses Ve Mekan: Form Üretimi Üzerine Disiplinlerötesi Bir Yaklaşım (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [57] Demir D. (2017). Mimarlık Eğitiminde İşitsel Mekansal Farkındalık Oluşturmaya Yönelik Bir Öneri (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [58] Kara D. (2017). A Guideline Proposal For Acoustic Issues In Sustainable Building Assesment Tools: Office Case (Yüksek Lisans Tezi). Yaşar Üniversitesi, İzmir.
- [59] Teke D. (2012). Arena Tip Salonlarda Mimari Tasarım Öğelerinin Bilgisayar Simülasyon Çalışması İle Akustik Açından İrdelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [60] Ergin D. (2014). Gelişen Teknoloji Işığında Performans Mekânlarında İşitsel Konfor Gereksinimleri Ve Akustik Tasarım Yaklaşımları (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [61] Yüzgeç D. Ş. (2017). Giydirme Cam Cepheli Farklı Fonksiyonlara Sahip Binaların, Ses Yalıtımı Açısından Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [62] Özel D. (2017). Mimaride Kullanılan Dokunmamış Malzemelerin Ses Yutuculuğunun Empedans Tüpü İle Ölçülmesi Ve Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [63] Muti E. N. (2017). Gürültü Engellerinin Etkinliğinin, Engel Biçimi İle Değişiminin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [64] Kara E. (2009). Valensiya Santa Anna Şapelinin Restorasyon Sonrası Akustik Değerlendirmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [65] Çalışkan E. B. (2010). Acoustical Evaluation Of Shopping Mall Typology (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [66] Uçar E. G. (2019). Ses Kayıt Stüdyolarında Bölme Elemanlarının Kesit Özelliklerinin Gürültü Denetimi Açısından İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [67] Alic E. (2019). Camilerde Konuşma Anlaşılabilirliğinin Türkçe Ve Arapça Dilleri Üzerinden İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir.
- [68] Ateş E. G. (2007). Kültürel Mirasımız Olan Yerebatan Sarnıcının Akustik Sorunlarının İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

- [69] Atça E. (2013). Acoustic Design Based On Multi-Aspect Performance Analysis (Yüksek Lisans Tezi). İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir.
- [70] Başbuğ E. (2007). Sound Transmission Through Suspended Ceilings (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [71] Gürkan E. (2013). At Nalı Plan Tipi Salonların Konser Ve Opera İşlevlerinde Akustik Tasarım Açısından İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [72] Yenidoğan E. S. (2019). Yeşil Bina Sertifika Sistemlerinin Akustik Açısından Değerlendirilmesi: Açık Planlı Ofis Örneği (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [73] Uysal E. (2015). Camilerde Mimari Akustik Tasarım Kriterleri Ve Bir Örnek Çalışma: Hasan Tanık Camii (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [74] Yıldırım E. (2003). Yeni Cami'nin Akustik Açısından Performans Değerlendirmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [75] İşler E. (2005). Kentsel Ölçekte Gürültünün Denetlenmesinde Engel Etkinliğinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [76] Dadaş E. (2019). Endüstri Binalarında Gürültünün Araştırılması Ve Bir Örneklem: Ankara'da Bir Preshaneyeye Ait Gürültü Haritasının Oluşturulması (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [77] Türk E. (2011). İstanbul'daki Salonların Akustik Kalitesinin İncelenmesi Ve Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [78] Güngör F. E. (2003). Computer Aided Noise Prediction In Heating, Ventilating And Air Conditioning Systems (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [79] Geyyas F. B. (2019). Konser Salonlarında Orkestra Kabuğu Tasarımının Salonun Akustik Performansı Üzerine Etkisinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [80] Kara F. B. Z. (2019). Sanayi Yapılarındaki Atölyelerin Bilgisayar Simülasyon Yöntemiyle Akustik Açısından Değerlendirilmesi: Arsin Organize Sanayii Örneği (Yüksek Lisans Tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- [81] Sert F. Y. (2015). Dini Yapılarda Akustik Koşulların İzmir Kemeraltı Havralar Bölgesi Sefarad Sinagogları Üzerinden İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [82] Ersöz F. (2012). Maketlerin Akustik Ölçümlerde Kullanımı; Konser Salonu, Ölçekli Model Ve Bilgisayar Modellemesinin Karşılaştırılması (Yüksek Lisans Tezi). Atılım Üniversitesi, Ankara.
- [83] Ertürk F. (2018). Dikdörtgen Plakların Akustik Davranışlarının İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [84] Karabeyaz G. Ç. (2017). Alışveriş Merkezlerinde Akustik Konfor Tasarımı (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [85] Ökten G. (2010). Mimari Form ve Yüzey Saçıcılığının Akustik Parametreler Üzerindeki Etkisi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [86] Yazıcı G. (2016). Akustik Ve Sürdürülebilirlik: Bir Otel Örneği (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [87] Örün G. (2011). Acoustical Analysis And Taxonomy Of Performance Halls In Early Republican Period In Ankara: Resim Heykel Müzesi, Küçük Tiyatro And Opera (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [88] Ulusoy G. (2014). Acoustical Improvement Of Typical Sport Halls For Multi-Purpose Use (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

- [89] Aslan G. (2006). Cepstral Deconvolution Method For Measurement Of Absorption And Scattering Coefficients Of Materials (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [90] Konuk G. G. (2010). Hacim Akustiği Parametrelerinin Türk Makam Müziği İcra Edilen Kapalı Mekânlar Açısından İncelenmesi Ve Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [91] Bayramoğlu G. S. (2017). Oditoryumların Akustik Açısından Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Arel Üniversitesi, İstanbul.
- [92] Kepçeoğlu H. E. (2002). Tekstil Sanayinde Gürültü Denetimi Ve Bir Örnek İnceleme (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [93] Duran H. (2010). Bina Cephesinin Ses Ve Isıl Performansının Hastane Örneği Üzerinden Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [94] Doğan H. A. (2019). Kentlerin Ses Kimliğinin İşitsel Peyzaj Yaklaşımı İle Belgelemesinde Alan Seçimi Modeli Önerisi: Eskişehir Örneği (Yüksek Lisans Tezi). Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- [95] Fırat H. B. (2015). Mevlevihanelerin Akustik Özelliklerinin Değerlendirilmesi: İstanbul Mevlevihaneleri (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [96] Erol H. B. (2006). İç Mekanda Malzeme Kullanımında Akustik Performans Kriterleri (Yüksek Lisans Tezi). Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, İstanbul.
- [97] Balcı H. (2007). Antalya Cam Piramiti'nin Hacim Akustiğinin Bilgisayar Simülasyon Yöntemiyle Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [98] Kul H. (2018). Eskişehir'deki Salonların Akustik Envanter Çalışması Ve A.Ü. AKM Opera Ve Bale Salonu'nun Akustik Konfor Değerlendirmesi (Yüksek Lisans Tezi). Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- [99] Çay H. (2014). TS EN 12354-1 ve TS EN ISO 140-4 Standardlarının Karşılaştırılması: İstanbul'da Bir Konut Örneği (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [100] İplik I. (2019). Yapılarda Gürültü Denetimi Sürecindeki Uygulamaların Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [101] Meriç I. (2009). A Model For The Evaluation Of Speech Intelligibility In Elementary School Classrooms (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [102] Yiğit İ. H. (2017). Klasik Dönem Osmanlı Cami Mimarisinin Akustik Yönünden İncelenmesine Bir Örnek (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [103] Özgüven İ. Z. S. (2015). İlköğretim Binalarında Konuşma Anlaşılabilirliği Ve Ses Kalitesini İncelemek Üzerine Bir Alan Araştırması (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [104] Öztürk F. (2006). Çevre Gürültüsü Analizleri Ve İstanbul'da Seçilen Bir Pilot Bölgede Gürültü Haritasının Elde Edilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul.
- [105] Sefer İ. (2020). Küçük Hacimlerde Durağan Dalgaların (Modların) Oda Geometrisi Ve Oda Oranları İle İlişkisinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [106] İliş İ. A. (2005). Yapı Elemanlarında Hava İle Yayılan Sesin En Ve Iso Standartlarına Göre Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [107] Alkaya İ. (2019). Akustiğin Spor Salonu Tasarımında Bir Parametre Olarak Değerlendirilmesi Üzerine İnceleme (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [108] Gökçe İ. B. (2011). Açık Planlı Ofislerde Engel Etkinliğinin Modelleme Yoluyla Belirlenmesi Ve İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

- [109] Eren İ. (2019). Sveti Stefan Kilisesi'nin Ayrı İşlevler İçin Akustik Açından Değerlendirilmesi Ve İyileştirme Önerisi Getirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [110] Yücel İ. E. (2014). Farklı Kayıt Stüdyosu Formlarının Akustik Parametre Dağılımlarının İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [111] Ayık K. K. (2018). Acoustical Analysis And Evaluation Of Cultural Centers At Gaziantep University (Yüksek Lisans Tezi). Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep.
- [112] Güney K. S. (2002). Evaluation Of Sound Quality Parameters In Noise Control Studies (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [113] Yaşaroğlu K. (2006). Açık hava Tiyatrolarının Akustik Açından Değerlendirilmesi: İstanbul Cemil Topuzlu Açık hava Tiyatrosu Örneği (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [114] Çoktaş K. (2019). İşitsel Verilere Dayanarak Mekansal Atmosferin Taşkılla Örneği Üzerinden İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [115] Şaher K. (2001). Sightline Analysis Of Proscenium Type Of Auditoria (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [116] Sözer M. (2016). Bakü Hard Rock Cafe Örneğinde Akustik Ve Elektroakustik Parametrelerin Analizi Ve Karşılaştırması (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [117] Uyar M. (2005). Metal Çerçevesi Giydirmeye Cephelerde Ses Yalıtımı Sorunları (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [118] Emekli M. A. (2019). Havalımanı Çevresindeki Yapılarda Gürültü Denetiminde Kaynağa İlişkin Özelliklerin Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [119] Özyıldırım M. C. (2010). Kapalı Mekânların Akustik Tasarımında Ses Güçlendirme Sistemlerinin Uygulanma Koşulları (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [120] Tunçer M. E. (2011). Dersliklerin Akustik Performansında, İç Yüzey Gereçlerinin Etkinliğinin Saptanması (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [121] Çetin M. O. (2011). Susturucularda Basınç Kaybı Ve Akustik Performansın İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [122] Şaşmaz M. (2003). The Development And Application Of Beam Tracing Algorithm To Predict The Acoustics Of Urban Design Patterns (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [123] Yüce M. Y. (2009). An Acoustical Evaluation Model For Open Plan Offices (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [124] Sarıgöl M. (2007). Modeling Of Ground-Borne Vibration From Underground Railway Systems (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [125] Sucuoğlu M. (2017). Balkonsuz Ve Balkonlu Konser Salonlarının Akustik Açısından Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [126] Erdil M. (2015). Assessment Of Sound Transmission Characteristics Of Traditional Timber Framed Dwellings In Ankara, Turkey (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [127] Uygun M. (2019). Alışveriş Merkezlerinde Giydirmeye Cephelerin Isı Ve Akustik Yönünden İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [128] Bölükbaşı M. (2012). Eğlence Gürültü Haritalarının Hazırlanması: İstanbul Boğazı Kuruçeşme Mevkii Örneği (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

- [129] Doğan M. (2012). Televizyon Stüdyolarında Mimari Akustik Tasarım Kriterleri Ve Bir Örnek Çalışma: Eğitim Teknolojileri Genel Müdürlüğü Binası Televizyon Stüdyosu (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [130] Eroğlu M. (2019). Estimation Of Heating, Ventilation And Air Conditioning(Hvac) Noise Levels In Hospitals (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [131] Eşmebaşı M. (2019). Slot-Perforated Panel System Proposal For Variable Acoustic Solutions (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [132] Gözütok M. (2019). Stadyumlarda Uygun Akustik Ortamın Oluşturulması Bağlamında Genel İlkelerin Belirlenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [133] Aşçıgil M. (2009). Karayolu Gürültü Haritalarının Hazırlanması: İstanbul Zincirlikuyu-Maslak Ulaşım Hattı Örneği (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [134] Kaplan M. M. (2019). Performance Assessment Of Lime-Pozzolan Mortars With Straw Aggregate For Sound And Thermal İnsulation Purposes (Yüksek Lisans Tezi). Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [135] Laleli M. S. (2019). Bilgisayar Oyunlarında Kullanılan Mekânların Akustik Parametre Analizlerinin Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [136] Temiz M. A. (2012). Rezonatör Tip Susturucuların Akış Ve Akustik Etkinliğinin Geliştirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [137] Özkartal N. E. (2011). Konser Salonlarında Akustik Konfor Parametrelerinin Analizi Ve Bir Örnek Çalışma (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [138] Candemir N. (2008). D100 (E5) Karayolunun Gürültü Açısından Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [139] Erbaş N. (2000). Giydirme Cephelerde Akustik Sorunlar (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [140] Gürel N. (2007). İlköğretim Okullarının Akustik Açısından İncelenmesi: İstanbul'da Bir İlköğretim Okulu Örneği (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [141] Üçkaya N. B. (2014). Eğitim Mekanlarının Akustik Konfor Koşulları Bakımından İrdelenmesi: DEÜ Mimarlık Fakültesi Örneği (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [142] İlgürel N. (2003). Sanayi Yapılarının Mimarisinde Gürültünün Tasarım Ölçütü Olarak Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [143] Şeker N. N. Ç. (2014). Salonların Mimari Tasarımının Akustik Performansa Etkileri: Dikdörtgen, Fan Ve Elmas Salon Örnekleri (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [144] Tekin O. (2019). Spor Salonlarının Çok Amaçlı Kullanımında Akustik Performansın Malzeme Ve Tasarım Değişkenleri Aracılığıyla İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [145] Çakır O. (2012). A System Proposal For Façade Apertures To Prevent Acoustic Problems Of Naturally Ventilated Buildings (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [146] Önen O. (2008). Development Of An Effective Single Layer Micro-Perforated Sound Absorber (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [147] Saf O. (2010). Perforasyonlu Susturucuların Akış Ve Akustik Etkinliklerinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

- [148] Keskin O. (2014). Havalimanı Gürültü Haritalarının Hazırlanması:İstanbul Sabiha Gökçen Uluslararası Havalimanı Örneği (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [149] Kutluk O. (2019). Konser Salonlarının Akustik Ve Elektroakustik Performans Değerlendirmesinde Parametrelerin Karşılaştırılması (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [150] Gürsoy Ö. (2017). Tatil Köylerinde Gürültünün Tasarım Kriteri Olarak Alınmasının Önemi: Bir Örnek Kapsamında Değerlendirmeler (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [151] Şahin Ö. (2007). Konuşma Amaçlı Hacimlerde Kaynak Konumu Değişiminin Hacim Akustiği Parametreleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [152] Tokgöz Ö. G. (2019). Eskişehir Sanayi Mirasının Kentin İşıtsel Peyzajındaki Yeri Dönüşümü Ve Etkileri (Yüksek Lisans Tezi). Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- [153] Kabil Ö. (2018). Eğitim Yapılarındaki İç Mekânların Bilgisayar Simülasyon Yöntemi İle Akustik Açından İncelenmesi, Değerlendirilmesi Ve Düzenlenmesi: KTÜ Örneği (Yüksek Lisans Tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- [154] Dökmeçi P. N. (2009). Acoustical Comfort Evaluation In Enclosed Public Spaces With A Central Atrium: A Case Study In Food Court Of Cema Shopping Center, Ankara (Yüksek Lisans Tezi). Bilkent Üniversitesi, Ankara.
- [155] Kocaer R. (2018). Kılıç Ali Paşa Camii Akustik Mirası Değerlendirmesi & Modern Bir Camii İle Akustik Performans Karşılaştırması (Yüksek Lisans Tezi). Kadir Has Üniversitesi, İstanbul.
- [156] Altın R. M. (2019). Hastanelerde Akustik Konfor Koşulları İle İlgili Ölçütlerin Belirlenmesi Ve Örnek Bir İnceleme (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [157] Evli R. (2020). Üsküdar Merkezinde Kent Gürültüsünün İnsanlar Üzerindeki Etkisinin Belirlenmesi Ve Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [158] Tuna R. (2020). Anadolu Selçuklu Dönemi Mahalle Mescitlerinin Akustik Konfor Analizi: Konya Örneği (Yüksek Lisans Tezi). Konya Teknik Üniversitesi, Konya.
- [159] Alsanusi S. S. (2019). Effect Of Various Plan Types On Acoustical Characteristics Of Restaurants (Yüksek Lisans Tezi). Çankaya Üniversitesi, Ankara.
- [160] İlisulu S. G. (2010). Tiyatro Salonlarının Akustik Açısından Değerlendirilmesi Ve Bir Örnek Çalışma: İstanbul Büyükşehir Belediyesi Beyoğlu Sahnesi (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [161] Avgin S. (2014). A Pilot Study On The Development Of An Ecological, Unperforated Sound Absorptive Material (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [162] Kızıltepe S. (2017). Kütüphane Yapılarında Akustik Konfor Ve Bir Örnek İnceleme (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [163] Kulak S. (2019). Konutlardaki Akustik Performans Sınıflarının Özel Ve Nesnel Değerlendirmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [164] Meral S. S. (2019). Spor Salonlarının Çok Amaçlı Kullanımında Akustik Parametreler (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [165] Köse S. (2010). Havaalanı Çevresindeki Okullarda Gürültüden Rahatsızlığın Ve Sınıfların İç Akustik Koşullarının Saptanması (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [166] Bozğün S. T. (2008). Sanayi Tesislerinde Gürültünün Modellenmesi Ve Değerlendirilmesi Boru Fabrikası Örneği (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.



- [167] Soyaltı S. (2019). Yeraltı Metro İstasyonlarında Akustik Koşulların: Anonların Anlaşılabilirliğinin İncelenmesi Ve Bir Örneklem (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [168] Bahalı S. (2015). Gezi Parkı – Tünel Meydanı Güzergâhı Üzerinde Kentsel İşitsel Ortam – Soundscape – Araştırması (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [169] Sağın S. M. (2005). Ev Sineması Sistemlerinde Mekan Akustiğinin İrdelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [170] Çolak S. (2018). Konvolüsyon Yöntemi İle Elde Edilen Akustik Modellemelerin Gerçek Mekan Yansımaları İle Karşılaştırılması (Yüksek Lisans Tezi). Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul.
- [171] Erdoğan S. (2000). Vibration-Noise Control And Determine Of Materials (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [172] Habibi S. (2012). A Study On The Investigation Of The Energy Efficient Building Envelope In Terms Of Heat, Light And Sound (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [173] Macit S. (2007). Bilgisayar Destekli Mimari Tasarım Sistemlerinden Bir Hacim Akustiği Analiz Yazılımına İfxml İle Veri Aktarımı (Yüksek Lisans Tezi). Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir.
- [174] Pektaş S. (2014). Konser Salonlarında Ses Dağıtıcıların Kullanılması Ve Gazi Konser Salonu Örneği (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [175] Kader S. (2018). İstanbul Devlet Tiyatroları Üsküdar Tekel Sahnesinin Akustik Açısından İncelenmesi Ve Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [176] Korkmaz Ş. I. (2019). Alışveriş Merkezlerindeki Akustik Konforun İrdelenmesine Yönelik İç Mekan İşitsel Peyzaj Çalışması: Eskişehir Espark Avm Örneği (Yüksek Lisans Tezi). Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir.
- [177] Balcı Ş. E. (2017). Çift Kabuk Cephe Sistemlerinde İşitsel Konfor Koşulları Açısından Gereksinimler Ve Önlemler (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [178] Yılmaz T. (2005). Acoustical Analysis Of A Multipurpose Hall By Computer Simulation Method: Metu Northern Cyprus Campus Auditorium (Ncca) As A Case Study (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [179] Bozkurt T.S. (2010). Endüstriyel Gürültü Haritalarının Hazırlanması İstanbulda Bulunan DES Sanayi Sitesi Ve Yakın Çevresi Örneği (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [180] Kurt T. T. (2016). Açık Planlı Ofislerde Akustik Konfor Parametrelerinin Analizi Ve Bir Örnek Çalışma (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [181] Torun T. (2019). An Approach On Determining Optimum Acoustic Conditions For Turkish Classical Music (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [182] Serin Y. (2015). Hareketli Çatı Sistemine Sahip Yapılarda Akustik Koşulların İncelenmesi: İzmir Bostanlı Suat Taşer Açık Hava Tiyatrosu Örneği (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [183] Özgencil Y. (2015). Konservatuar Prova Odalarının Akustik İncelenmesi Ve Akustik Tasarımın İyileştirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul.
- [184] Öztürk Y. (2017). Simultaneous Improvement In Visual And Acoustic Performance By Modifying Common Design Components In Lecture Halls (Yüksek Lisans Tezi). İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir.
- [185] Bektaş Y. S. (2020). Metro İstasyonlarında Müzik İcrası İçin Kabul Edilebilir Akustik Koşulların Oluşturulması: Kadıköy Metro İstasyonu Örneği (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

- [186] Uzeyirli Z. (2019). İşitme Engelli Bireylerin Kaynaştırılmalı Eğitim Mekanlarının Akustik Açısından İncelenmesi Ve Bir Örnek Çalışma (Yüksek Lisans Tezi). Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- [187] Kurtulan Z. (2009). M.S.G.S.Ü. Sedad hakkı eldem oditoryumunun hacim akustiği açısından incelenmesi ve değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [188] Aktaş Z. (2016). Yeşil Alanların Kent Akustiğine Etkisi (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [189] Dal Z. (2007). Açık Hava Etkinliklerinden Kaynaklanan Gürültünün İncelenmesi-Stadyumlar (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [190] Küden Z. (2019). Acoustic Fatigue Procedure Validation And Application On Cavity Wall (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

İŞİTSEL PEYZAJ YAKLAŞIMININ MİMARİ SÜREÇ İLE İLİŞKİLENDİRİLMESİ ÜZERİNE BİR ÖN MODEL ÇALIŞMASI

Uğur Beyza Erçakmak Osma¹

Çankaya Üniversitesi, Etimesgut, Ankara, Türkiye
e-posta: beyzaercakmak@gmail.com

Papatya Nur Dökmeci Yörükoğlu²

Çankaya Üniversitesi, Etimesgut, Ankara, Türkiye
e-posta: papatya@cankaya.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma kapsamında, iç mekân akustik konforun günlük yaşantıdaki önemi de düşünülerek, iç mekân işitsel peyzaj ilkelerinin mimari tasarım ve uygulama süreçlerine entegrasyonunun araştırılması ve bu ilkelerin mimari sürecin aşamaları ile ilişkilendirilmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, iç mekân işitsel peyzaj yaklaşımının, mimari tasarımda uygulanabilirliğinin araştırılması için bir temel oluşturmak üzere (1) iç mekân işitsel peyzaj bileşenlerinin ve etkenlerinin belirlenmesi, (2) mimari tasarım ve uygulama süreçlerinin aşamalarının belirlenmesi ve (3) birbirleriyle olan ilişkilerinin araştırılması hedeflenmiştir. Bu çalışma kapsamında iç mekân işitsel peyzaj bileşenleri; ses, insan, yapı ve çevre olarak dört ana başlık altında tanımlanmıştır. Mimari süreçte ise; programlama, kavramsal tasarım, tasarım geliştirme, belgeleme, inşaat/uygulama ve değerlendirme olarak altı aşama belirlenmiştir ve iç mekân işitsel peyzaj bileşenleri ile mimari sürecin aşamaları arasındaki ilişkiler tartışılmıştır ve önerilen ön model çerçevesinde sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: İç mekân işitsel peyzaj, mimari süreç, mimari programlama

A PRELIMINARY MODEL PROPOSAL ON RELATING INDOOR SOUNDSCAPE APPROACH WITH ARCHITECTURAL PROCESS

ABSTRACT

Within the scope of this study, considering the importance of indoor acoustic comfort in daily life, it is aimed to investigate the integration of indoor soundscape components into architectural design and application processes and to associate these principles with the stages of architectural process. In this context, it is aimed to (1) identify the components and factors of indoor soundscape, (2) identify the stages of architectural design and application processes, and (3) investigate their relationships with each other, in order to establish a basis for investigating the applicability of indoor soundscape approach in architectural design. Within the scope of this study, indoor soundscape components; defined under four main headings as sound, human, building and environment. In architectural process; six stages were determined as programming, conceptual design, design development, documentation, construction/application and evaluation, and the relationships between the components of indoor soundscape and the stages of architectural process were discussed and presented within the framework of the proposed preliminary model.

Keywords: *Indoor soundscape, architectural process, architectural programming*

1. GİRİŞ

Yürürlükte olan ulusal gürültü yönetimi mevzuatları kapsamında, gürültüye maruz kalmanın bir sonucu olarak ortaya çıkabilecek fiziksel ve ruhsal sağlık sorunlarına karşı, maruz kalınan gürültü seviyelerinin belirlenmesine, gürültünün önlenmesine ve azaltılmasına yönelik eylem planları hazırlanmaktadır. İşitsel peyzaj alanı ise, ISO 12913-1 standardında tanımlandığı gibi 'bağlam içinde bir kişi veya insanlar tarafından algılanan veya deneyimlenen ve/veya anlaşılan akustik ortam' üzerine yapılan çalışmalara odaklanır [1]. Bu bağlamda, işitsel konforun sağlanması için gürültü yönetimi eylemleri ile işitsel peyzaj yaklaşımının bir bütün olarak ele alınmasının daha faydalı olduğu düşünülmektedir [2]. İşitsel peyzaj kavramının zaman içinde gelişmesiyle birlikte uygulanabilirliği ve standardizasyonu üzerine kentsel işitsel peyzaj ölçeğinde çalışmalar yürütülmüş, temel prensipleri, uygulama, veri toplama ve analiz yöntemleriyle ilgili ISO tarafından üç standart yayınlanmıştır [1, 3, 4]. Ancak, bu standartlar açık kamusal alanlar ölçeğinde çalışmalara yönelik ve henüz araştırma düzeyinde kullanılan dokümanlar olduğundan, iç mekân işitsel peyzaj uygulamaları kapsamında faydalı olmakla birlikte yetersiz kalabileceği düşünülmektedir. Önceki çalışmalardan [5, 6] elde edilen çıktılar ışığında mimari tasarım ve uygulama sürecindeki akustik uygulamaların gürültü yönetimi çerçevesinde kaldığı ve kullanıcı odaklı girişimlerin ulusal ve uluslararası ölçekte uygulanmadığı görülmüştür.

İşitsel peyzaj uygulaması için en uygun tutum, ilkelerin, tanımların, uygulamaların ve metodolojinin standartlaştırılmasından sonra, uygulamada kullanılacak bir yönetmelik hazırlanabilmesi yaklaşımı olacaktır [5]. İşitsel peyzaj üzerine yapılan çalışmalar, akustik ortamın algısal boyutuna yönelik veri toplama, ölçme ve değerlendirme yöntemlerini ortaya çıkarmış ve geliştirmiştir. Kentsel işitsel peyzaj için standartlaştırılmış bir metodoloji elde etmek için, ISO tarafından, kavram tanımları [1], veri toplama [3] ve veri analizi [4] üzerine üç bölüm standart yayınlanmıştır. Ancak, bu standartlar kentsel işitsel peyzaj uygulaması ve metodolojisi için kapsamlı ve bilgilendirici belgeler olmasına rağmen, iç mekân akustik ortamların işitsel peyzaj yaklaşımıyla değerlendirmesi için hala yetersiz kalmaktadır. Önceki çalışmalar [5, 7] ve literatürde yer alan birçok çalışma [8-12], iç mekânların değerlendirilmesi için toplanan verinin ve yapılan analizlerin, açık kamusal alanlara kıyasla daha farklı ve fazla parametrenin ve mimari etkenin göz önünde bulundurulması gerektiğini göstermektedir. Bu ön çalışma, literatürde bulunan (1) iç mekân işitsel peyzaj bileşenleri ve (2) mimari sürecin aşamalarını belirlemeyi ve (3) birbirleriyle olan ilişkilerini değerlendirip tartışarak iç mekân işitsel peyzajı ve mimari uygulama arasındaki bağı araştırmayı amaçlamaktadır.

2. İÇ MEKÂN İŞİTSEL PEYZAJ BİLEŞENLERİ

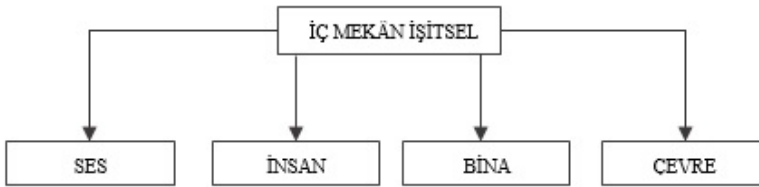
İç mekân işitsel peyzaj bileşenlerinin belirlenmesi, çalışmanın ilerleyen sürecinde mimari uygulamada kılavuz olarak kullanılacak teorik bir model geliştirmenin kilit aşamasıdır. Bu araştırma çerçevesinde ‘bileşenler’ bir bütün olarak ses ortamını oluşturan ve akustik ortam üzerinde algıyı etkileyen faktörleri kapsayan her bir unsuru ifade etmektedir. Çalışmanın kapsamı her ne kadar iç mekânlar üzerine olsa da, iç mekân işitsel peyzaj bileşenlerinin yapısının oluşturulmasında kentsel işitsel peyzaj teorik modelleri büyük önem taşımaktadır ve göz ardı edilmemesi gerekir. Bu bağlamda, iç mekân işitsel peyzaj bileşenleri için birleştirilmiş bir model ortaya çıkarmak için hem kentsel hem de iç mekân işitsel peyzaj yaklaşımlarına ilişkin önceki modeller değerlendirilmiştir.

Schafer [13] ses kaynaklarını akustik, psikoakustik, göstergebilim (semiotics) ve semantik (semantics), estetik olmak üzere dört açıdan sınıflandırmasıyla birlikte, farklı boyutlarda değerlendirilmesi gerekliliği ortaya çıkmış ve ekolojik işitsel peyzaj kapsamında ilk işitsel peyzaj terimi ve yaklaşımı ortaya konmuştur. Akustik parametreler, bir sesin fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan parametrelere, psikoakustik parametreler, seslerin bir dinleyici tarafından nasıl algılandığına, göstergebilim ve anlambilim, bir ses kaynağının işlevi ve anlamına, estetik ise dinleyicilerin bir ses kaynağına veya akustik ortama yüklediği duygusal veya duyusal niteliklerine odaklanmaktadır. Kavramın gelişmesiyle birlikte kentsel açık kamusal alanların işitsel peyzaj yaklaşımıyla iyileştirilmesi ve değerlendirilmesi yaklaşımı, gürültü yönetimine alternatif veya destekleyici bir tutum olarak ortaya çıkmıştır.

Kentsel işitsel peyzaj çerçevesini ve akustik ortam bileşenlerini etkileyen faktörleri belirlemek için farklı çalışmalar ortaya çıkmıştır. Çoğunluğu benzer temellere dayanmış, ancak kavramı ele alma yaklaşımları farklı olmuştur. Zhang and Kang [14], kentsel işitsel peyzaj kavramını; ‘ses kaynağı’ özellikleri, kaynak özelliklerinden etkilenmiş bir ortam olarak ‘mekân’, farklı kişisel özelliklere sahip ‘insanlar’ ve ısı, görsel, aydınlatma kalitesi gibi çevresel etkenleri içeren ‘çevreden’ oluşan bir sistem olarak tanımlamıştır. Herranz Pascual, Aspuru ve García [15], ISO 12913-1 standardında da ses ortamı bağlamının tanımında değinilen ‘kişi’, ‘aktivite’ ve ‘yer’ etkileşimleri arasındaki ilişkiler üzerine çalışmıştır. Özçevik ve Yüksel Can [16] kentsel akustik ortamlar için işitsel peyzaj bileşenlerini, ‘ses kaynakları’ (türleri, özellikleri, fiziksel özellikleri ve zamansal koşullar), ‘fiziksel çevre’ (fiziksel, mevsimsel, topografik koşullar), ve ‘insan’ (sosyal, psikolojik, duyusal ve kültürel özellikler) kapsa-

mında tanımlamışlardır. Kang ve ark. [17], işitsel peyzaj unsurlarını işitsel ve işitsel olmayan faktörler olarak iki ana başlığa ayırmıştır. İşitsel faktörler, ses kaynaklarının baskınlığı ve anlamı gibi konulara odaklanır. İşitsel olmayan faktörler, çevresel ve görsel veriyi içeren fiziksel faktörlere, sosyal faktörler ise insanların sosyo-ekonomik, kültürel yönleri ve ortamdaki etkinliklerine odaklanır.

İç mekân işitsel peyzaj yaklaşımı ise, kentsel işitsel peyzajdan farklı olarak kapalı alanlar özelinde tartışılması gereken ve farklı boyutları olan bir konudur. İç mekân işitsel peyzaj kavramı, Dökmeci tarafından 2013 yılında ortaya çıkmış ve sesin oluşumunu, buna bağlı olarak da işitsel peyzaj algısını etkileyen yapının mimari özelliklerine vurgu yapılmıştır [9, 18]. Bu bağlamda, ses seviyesi ve psikoakustik parametrelerin kullanıldığı kentsel işitsel peyzajdan farklı olarak, bina ve hacim akustiğinin iç mekân işitsel peyzaj yaklaşımındaki önemi vurgulanmıştır [2, 5, 19]. Bununla birlikte iç mekân işitsel peyzaj bileşenlerinden ‘ses’in fiziksel özelliklerini tanımlayan etkenler çeşitli çalışmalarda [5, 9, 18] ‘ses ortamı veya akustik faktörler’ olarak tanımlanmaktadır. Öte yandan, ‘bağlam’, insanı veya insanlarla ilgili etkenleri ifade eder ve ‘yapılı çevre veya mimari özellikler’, binaların mimari özelliklerini, karakterlerini ve aydınlatma, ısı ve hava kalitesi gibi iç ortam çevresel faktörlerini ifade eder. Aburawis ve Dökmeci Yörükoğlu [8], iç mekân işitsel peyzaj yaklaşımı içinde daha çok mekân deneyimini vurgulamış ve iç mekân işitsel peyzaj algı etkenlerini ‘sesle ilgili’, ‘mekânsal’, ‘zamansal’, ‘psikolojik’, ‘davranışsal’ ve ‘kişisel’ olarak sunmuştur. Acun ve ark. [20], iç mekân işitsel peyzajı kavramsal çerçevesini ‘ses ortamı’, ‘yapılı çevre’ ‘bağlam’, ‘beklenti ve tercih’ olarak belirtmektedir. Konutlarda işitsel peyzaj algısı üzerine yapılmış bir diğer çalışma ise iç mekân işitsel peyzajın algı etkenlerini ‘akustik’, ‘kentsel bağlam’, ‘evle ilgili’, ‘kişiyle ilgili’, ‘sosyo-ekonomik’, ‘durumsal’, ‘çevresel’ olarak tanımlamıştır [12].



Şekil 1. İç mekân işitsel peyzaj bileşenleri [1, 5, 7, 9, 10, 12, 14, 15, 16, 17, 18]

Kentsel ve iç mekân işitsel peyzaj kavramlarının literatürde yayınlanmış teorik modelleri incelendiğinde ve bütünsel bir yaklaşımla birleştirildiğinde iç mekân işitsel peyzaj bileşenleri 'ses', 'insan', 'bina' ve 'çevre' olarak dört ana başlık altında incelenebilir (Şekil 1). Bu şekilde, iç mekân işitsel peyzaj yaklaşımı kapsamında veri toplamak ve 'ses' bileşeninin değerlendirilmesi için ses kaynağının tanımlanması, ses ortamının veya kaynakların algılanan duygusal niteliği, kaynakların ortamdaki baskınlığı, ses seviyesi, psikoakustik, bina ve oda akustik parametreleri dikkate alınmalıdır. 'İnsan' bileşeni, bir alanının kullanıcılarının demografik, kişisel, sosyal, ekonomik, kültürel, psikolojik, davranışsal (beklenti, tercih) ve zamansal kullanım özelliklerini ifade eder. Bir iç mekânın işlevi, yapısal özellikleri, teknik alt yapısı, mekânsal özellikleri, bitiş malzemeleri ve görsel uyumu gibi fiziksel özellikleri ve kullanım amacı 'bina' bileşeni içinde değerlendirilmelidir. 'Çevre' bileşeni ise hava kalitesi, ısı kalite, aydınlatma kalitesi, nem seviyesi ve kullanım seviyesi gibi etkenleri içeren iç mekân çevresel kalite unsurları kapsamında dikkate alınmalıdır.

3. MİMARİ SÜREÇ

Bu çalışma, mimarlık alanında çalışan 'uzmanlar' tarafından takip edilen mimari evrelerin belirlenmesi ve iç mekân işitsel peyzaj bileşenleri ile mimari süreç arasındaki ilişkiyi araştırmayı amaçlamaktadır. 'Uzmanlar', iç mekânlar için tasarım ve uygulama yapan veya inşaat ve uygulama aşamalarında çalışan mimarları, iç mimarları ve/veya diğer ilgili mesleklerden profesyonelleri ifade eder.

'Royal Institute of British Architects'in (RIBA) 2020 yılı çalışma planı, mimari sürecin aşamalarını 'hazırlık', 'kavram' 'tasarım', 'mekânsal koordinasyon', 'teknik tasarım', 'imalat ve inşaat' ve 'teslim' olarak belirlemiştir [21]. İlk 'hazırlık' aşaması, müşteri gereksinimlerinin belirlenmesi, bütçenin kararlaştırılması ve onayı ve sonraki aşamalarda ihtiyaç duyulacak mimari/proje çıktılarının hazırlanmasını içerir. 'Kavramsal tasarım', mimari konseptin hazırlanmasını, müşteri ve paydaşlardan geri bildirim alınmasını ifade eder. Üçüncü aşama olarak 'mekânsal koordinasyon', mimari ve mühendislik bilgilerinin mekânsal organizasyona entegrasyonu olarak tanımlanır. 'Teknik tasarım', tesisat, mekanik, altyapı işleri gibi yapı sistemleri ile ilgilidir. Son olarak RIBA iş planında, işin tesliminden önce 'imalat ve inşaat' aşaması belirtilmiştir.

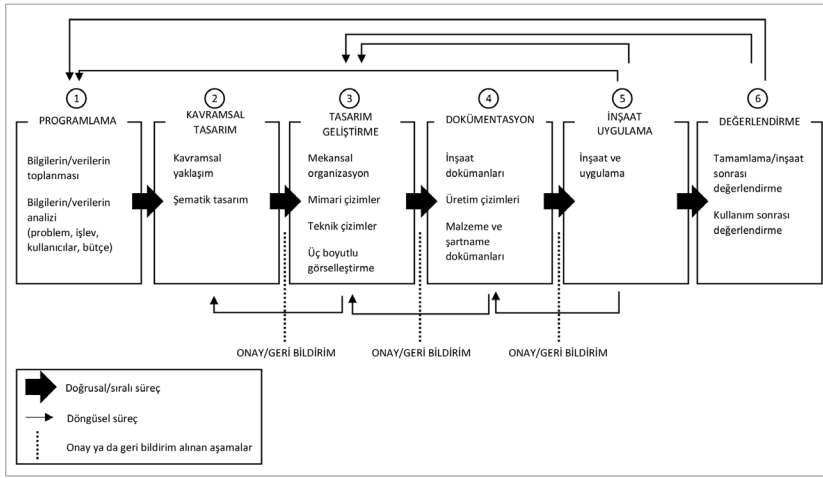
Succar'ın 'Proje Yaşam Döngüsü Aşamaları'nda (Project Lifecycle Phases) [22] mimari aşamalar 'tasarım aşaması', 'inşaat aşaması' ve 'işletim aşaması' olarak üç ana grupta sunulmaktadır. Bu üç aşama, alt aşamalar ile açıklanmıştır. 'Tasarım aşaması' kavramsallaştırma, programlama, bütçe analizi, mimari

strüktürel ve sistem tasarımı, analiz detay ve şartnamelerin hazırlanmasını içermektedir. ‘İnşaat aşaması’ inşaat işlerinin planlanması, üretim detayları, tedarik ve teslim aşamalarından oluşmaktadır. Üçüncü ve son aşama olan ‘işletim aşaması’ ise kullanım süreci, bakım ve devamlılık ile gerekli koşullarda tekrar programlamayı içermektedir. RIBA ve Succar’ın modellerinin yanı sıra, mimari süreci araştırmak için, üç farklı mimarlık firmasının projelerinde kullandıkları tasarım aşamaları da ele alınmıştır. İki firmanın [23, 24] tasarım aşamaları, mimari program, kavram geliştirme, bütçe analizi ve şematik plan çizimleri gibi konuları içeren; ‘kavramsal tasarım’ ve ‘şematik tasarım’ aşamaları ile birbirine benzemektedir. Bir diğer aşama ise ‘tasarım geliştirme’ başlığı altında kat planlarının hazırlanması ve belirlenmesidir. Bu aşama, kavramsal fikirlerin uygulanması, üç boyutlu modeller ve maliyet tahminleri ile ilgilidir. Tasarım geliştirme konusunda fikir birliğine varıldıktan sonra, tefrişat ve demirbaş detayları gibi tüm malzemeleri, diğer teknik çizimleri ve inşaat aşamasında kullanılacak detayları içeren inşaat dokümanları hazırlanır. ‘İnşaat teklif/ihale’ dokümantasyon aşamasını takip eder ve son olarak firmaların proje aşamalarında mimari uygulama aşaması olarak ‘inşaat yönetimi’ aşaması sunulur. Daha genel bir yaklaşıma sahip olan bir diğer örnekte ise ‘şematik tasarım’, ‘tasarım geliştirme’, ‘dokümantasyon’, ‘inşaat’ ve ‘kurulum/kullanım’ olmak üzere beş aşama belirtilmiştir [25].

İncelenen bu modeller ve öneriler [21-24] çoğunlukla aşamaları ve aşamaların hangi iş yükünü içerdiğini yansıtmayı amaçlayan doğrusal modellerdir. Ancak mimari tasarım ve uygulama süreci doğrusal değil döngüsel bir süreçtir. Literatürdeki farklı tasarım süreci modelleri döngüsel ilişkileri de temsil eder. Sanoff’un modelinde [26] ‘program geliştirme’ aşamasından ‘projenin tamamlanması sonrası değerlendirme’ aşamasına kadar bir tasarım akışı sunulmuştur. Bu aşamalar arasında sırasıyla ‘ön tasarım aşaması’, ‘üretim aşaması’ ve ‘inşaat aşamasıdır’. Bu model, değerlendirme aşamasına kadar doğrusal bir süreç önerir. Değerlendirme sonuçlarına göre ise program geliştirme içeriklerine (problem tanımlama, bilgi toplama, bilgi organizasyonu) geri dönüp değerlendirmek gerekebilir ve buna bağlı olarak da devamında gelen aşamaların da (tasarım, üretim, inşaat) tekrar ele alınması gerekebilir. Diğer bir model ise mimari tasarım sürecini ‘fizibilite’, ‘taslak önerileri’, ‘şema tasarımı’, ‘detay tasarımı’ ve ‘üretim bilgisi’ olmak üzere beş aşamada sunar ve sürecin yapısını gösterir. ‘Taslak önerileri’, ‘şema tasarımı’ ve ‘detay tasarımı’, aşamanın nihai kararından önce sentez ve değerlendirmeler arasında döngüsel bir süreçte sahip olan ‘analiz’, ‘sentez’, ‘değerlendirme’ ve ‘karar’ aşamalarını içerir [27]. Rozenburg ve Eekel’in [27, 28] temel tasarım döngüsüne ilişkin modeli ise ‘işlev analizi’ ile süreci başlatır ve ‘kriterlerin sentezi’, ‘geçici tasarım’, ‘simülasyon’,

'beklenen özelliklerin değerlendirilmesi', 'tasarımın değeri', 'karar aşaması' ile devam eder ve son olarak 'kabul edilebilir tasarım' ile sonlanır. Döngüsel bir yaklaşım olarak, 'kabul edilebilir tasarıma' ulaşmadan önce, karar aşamasında, geri bildirim ve değerlendirmelere göre 'sentez' ve 'analiz' aşamalarına dönüldüğü belirtilir.

İncelenen örneklerin ve mimari süreç önerilerinin değerlendirilmesi sonucunda (1) Programlama, (2) Kavramsal Tasarım, (3) Tasarım Geliştirme, (4) Dokümantasyon, (5) İnşaat ve Uygulama (6) Değerlendirme olmak üzere altı ana aşamada bütünlleştirici bir model oluşturulabilir (Şekil 2).



Şekil 2. Mimari süreç ve döngüsü üzerine bütünlleştirici bir model önerisi [20-27].

Bütünlleştirici model, bir projenin ve uygulamanın genel düzenini ve bunlar arasındaki döngüleri göstermek için bir mimari sürecin doğrusal aşamalarını önermektedir. Model, problem, işlev, kullanıcılar ve bütçe ile ilgili bilgileri ele alan 'programlama', bunların analizi ve organizasyonu ile başlar. 'Kavramsal tasarımdan', yapım ve uygulama aşamasına kadar olan aşamalar, karar vericilerden (müşteri, işveren vb.) gelen geri bildirimlere göre önceki aşamalara dönüşlere olanak sağlar. 'İnşaat uygulama' aşamasında, herhangi bir problem olması durumunda, 'tasarım geliştirme', 'dokümantasyon' ve tamamlama ve kullanım sonrası 'değerlendirmeleri' aşamaları sonrasında 'tasarım geliştirme' ve 'programlama' aşamaları yeniden değerlendirilebilir. Ancak bu öneri, bir mimari sürecin ön değerlendirmesidir ve müdahale tipine ve projenin ihtiyacına göre aşamalar arasındaki ilişkiler daha karmaşık olduğundan ve tüm süreç boyunca ortaya çıkabilecek farklı durumlar oluşabileceğinden daha ayrıntılı inceleme ve önermeler gerektirmektedir.

4. İÇ MEKÂN İŞİTSEL PEYZAJ BİLEŞENLERİ VE MİMARİ SÜREÇ İLİŞKİLERİ

Mimari sürecin değerlendirilmesi sonucunda, iç mekân işitsel peyzaj bileşenleri ile olası ilişkiler yorumlanabilir. Bu nedenle, bu ilişkilerin, iç mekân ses ortamının profesyonel uygulamaya entegrasyonunu araştırmak için bir ön çerçeve oluşturulması hedeflenmiştir. ‘Programlama’, mimari sürecin ilk aşamasıdır ve bir projenin ihtiyacına göre iç mekân işitsel peyzaj hakkında bilgi toplamak ve iç mekân işitsel peyzaj ile ilgili dokümanların gözden geçirilmesi için de başlangıç aşaması olarak düşünülebilir. Aynı zamanda ‘programlama’ aşaması, tasarım aşamalarını doğrudan etkileyecek veya şekillendirecek olan kullanıcı/müşteri hakkında beklenti, ihtiyaç ve kişisel bilgilerinin de toplandığı bir aşamadır. İşitsel peyzaj kavramı da kullanıcıların algısı üzerinden değerlendirildiğinden, ‘insan’ bileşeninin ve dolayısıyla kullanıcı profili hakkında toplanacak bilgilerin sonraki aşamalarda işitsel peyzaj çerçevesinde de değerlendirmeye alınacağı için önemli olduğu söylenebilir.

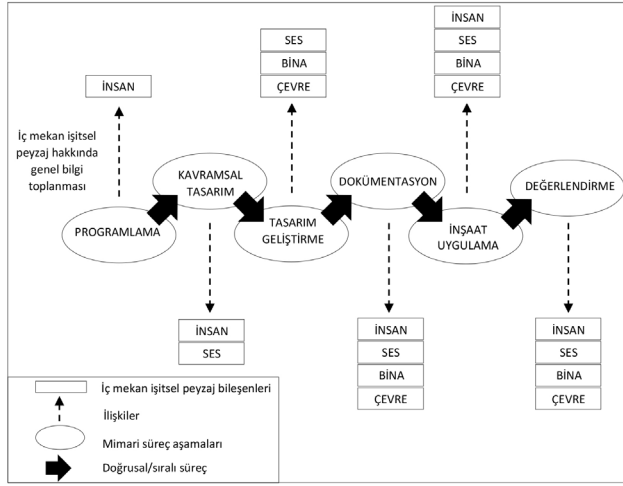
‘Kavramsal tasarım’, mimari sürecin ikinci aşamasıdır. Bu aşama, müşterilerin gereksinimleri ve mekânsal gereksinimlerinden oluşan kavramsal tasarım kararları ve şematik tasarımı içeren bir araştırma ve üretim aşamasıdır. Bu nedenle, ‘programlama’ aşamasından elde edilen bilgiler ışığında kullanıcıların beklenti, tercih ve kişisel bilgileri, ses ortamından da beklentilerini ana hatlarıyla oluşturabilir ve şematik tasarımda bir tasarım kriteri olarak değerlendirilmeye alınabilir. Kısaca, ‘insan’ ve ‘ses’ bileşenleri mimari sürecin ‘kavramsal tasarım’ aşamasının bir parçası olarak entegre edilebileceği söylenebilir.

Üçüncü aşama olarak ‘tasarım geliştirme’, mekânsal ve üç boyutlu organizasyonları ve mimari çizimlerin geliştirilmesini içeren proje aşamasını ifade eder. Bu aşama, ‘bina’, ‘ses’ ve ‘çevre’ bileşenlerinin bazı alt bileşenleriyle ilgili olabilir. Mekân organizasyonu, mimari ve teknik çizimler esnasında akustik konforun sağlanması için temel adımlar atılabilir ve inşaat aşamasından önce ana hatlarıyla uygun uygulama kararları alınabilir. Bununla birlikte, bu aşamada hazırlanacak olan üç boyutlu görsel sunumlara ses ortamının da entegre edilmesi kullanıcı/müşteriden daha sağlıklı geri bildirim veya onay alabilmek için önemli bir adım olacaktır.

‘Dokümantasyon’ aşamasına gelince, malzeme, tefriş, demirbaşlar, inşaat detaylandırma ve teknik resimlerle ilgili nihai kararları içeren inşaat ve uygulamaya hazırlık aşaması olduğundan daha fazla teknik detay ve bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır. Bir mimari projede işitsel peyzajı yaklaşımını dikkate almak için ‘insan’, ‘ses’, ‘bina’, ve ‘çevre’ alt bileşenleri entegre edilebilir. Doğrusal mimari süreçteki bir önceki aşama olan ‘tasarım geliştirme’ sürecinde ana hatlarıyla alınmış olan kararların üretime uygun hale getirilerek kullanıcı ve işlev

odaklı işitsel peyzaj kapsamında doğru malzeme seçimleri, üretim çizimleri ve şartname dokümanlarıyla 'inşaat ve uygulama' aşamasına geçmek için gerekli hazırlık yapılabilir.

Son olarak, inşaat aşamasında, önceki aşamalarda kullanılan tüm bileşenler ve parametreler test edilebilir veya doğrulanabilir ve mimari tasarım uygulama sürecinin sonunda değerlendirme aşamasında alınan ve uygulanan kararlar, paydaşlar (tasarım ve uygulama ekibi, işveren/müşteri, kullanıcılar) tarafından alınan geri bildirimler ile gözden geçirilerek gerekli görülen noktalarda iyileştirme yapılabilir.



Şekil 3. İç mekân işitsel peyzaj ve mimari süreç aşamalarının ilişkileri üzerine ön model önerisi

Bu değerlendirmeler ile birlikte, iç mekân tasarımlarında sadece görsel ve kullanıma yönelik tasarıma değil, akustik konforun da tasarlanması adına işitsel peyzaj bileşenlerinin de mimari sürece entegrasyonu tartışılmış ve bir ön model önerilmiştir (Şekil 3). Her ne kadar mimari tasarım ve uygulama süreci pratikte sadece doğrusal değil, döngüsel bir süreç olsa da görsel tasarım ile birlikte işitsel tasarım gibi farklı boyutların da sürece dâhil edilmesinin, döngüsel süreci en aza indirmeye yardımcı olacağı ve proje süreci boyunca zaman ve bütçe tasarrufuna katkı sağlayacağı söylenebilir.

5. SONUÇ

Bu ön çalışma kapsamında, iç mekân işitsel peyzaj kavramının mimari sürece entegrasyonu iki bölümde araştırılmıştır ve ilişkileri sunulmuştur. İlk bölümde iç mekân işitsel peyzaj bileşenleri 'ses', 'insan', 'bina' ve 'çevre' olmak

üzere dört ana başlık olarak belirlenmiştir. İkinci bölümde ise mimari tasarım ve uygulama sürecinin aşamaları araştırılmış ve bu aşamalar arasındaki döngüsel süreç incelenmiştir. Bunun sonucunda, mimari tasarım ve uygulama sürecinin aşamaları 'programlama', 'kavramsal tasarım', 'tasarım geliştirme', 'dokümantasyon', 'inşaat/uygulama', ve 'değerlendirme' olmak üzere altı ana başlık altında sunulmuştur. Son olarak iç mekân işitsel peyzaj bileşenleri ve mimari sürecin aşamaları arasındaki ilişkiler tartışılmış ve buna bağlı olarak bir ön model önerilmiştir. Ancak, hem işitsel peyzaj kavramının, hem de mimari sürecin dinamik yapıları göz önünde bulundurulduğunda, işitsel peyzaj yaklaşımının mimari süreç ile ilişkilerinin daha kapsamlı araştırılması gerektiği düşünülmektedir. Bunun için, ileriki çalışmalarda iç mekân işitsel peyzaj bileşenlerinin alt faktörlerinin ve mimari sürecin döngüsel yapısının daha detaylı incelenmesi, ve buna bağlı olarak daha kapsamlı ilişkilerin tartışılması planlanmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- [1] ISO, Acoustics-Soundscape-Part 1 : Definition and conceptual framework BS ISO 12913-1:2014 BSI, Genève, Switzerland, 2014.
- [2] S. Torresin, R. Albatici, F. Aletta, F. Babich, T. Oberman, J. Kang, Acoustic Design Criteria in Naturally Ventilated Residential Buildings: New Research Perspectives by Applying the Indoor Soundscape Approach, Applied Sciences, 9 (2019).
- [3] ISO, Acoustics-Soundscape-Part 2: Data collection and reporting requirements ISO / TS 12913 - 2 : 2018, Genève, Switzerland, 2018.
- [4] ISO, Acoustics-Soundscape-Part 3: Data analysis PD ISO/TS 12913-3:2019, Geneva, Switzerland, 2019.
- [5] U.B. Erçakmak, P.N. Dökmeci Yörükoğlu, Comparing Turkish and European Noise Management and Soundscape Policies: A Proposal of Indoor Soundscape Integration to Architectural Design and Application, Acoustics, 2019, pp. 847-865.
- [6] U.B. Erçakmak, P.N. Dökmeci Yörükoğlu, Ulusal ve uluslararası akustik standartların ve gürültü yönetmeliklerinin işitsel peyzaj odaklı irdelenmesi [Analysis of national and international acoustic standards and noise management policies within the scope of soundscape], 13. Ulusal Akustik Kongresi, (2019) 227-236.
- [7] U.B. Erçakmak, P.N. Dökmeci Yörükoğlu, The role of indoor soundscape methodology: From architectural design process to establishment of regulations, ICAAachen, Germany, 2019, pp. 1-8.
- [8] A.A.M. Aburawis, P.N. Dökmeci Yörükoğlu, An integrated framework on soundscape perception and spatial experience by adapting post-occupancy evaluation methodology, Building Acoustics, 25 (2018) 3-16.
- [9] P.N. Dökmeci Yörükoğlu, J. Kang, Development and testing of Indoor Soundscape Questionnaire for evaluating contextual experience in public spaces, Building Acoustics, 24 (2017) 307-324.
- [10] P.N. Dökmeci Yörükoğlu, J. Kang, Analysing Sound Environment and Architectural Characteristics of Libraries through Indoor Soundscape Framework, Archives of Acoustics, 41 (2016) 203-212.

- [11] S. Torresin, R. Albatici, F. Aletta, F. Babich, J. Kang, Assessment Methods and Factors Determining Positive Indoor Soundscapes in Residential Buildings: A Systematic Review, *Sustainability*, 11 (2019).
- [12] S. Torresin, R. Albatici, F. Aletta, F. Babich, T. Oberman, S. Siboni, J. Kang, Indoor soundscape assessment: A principal components model of acoustic perception in residential buildings, *Building and Environment*, 182 (2020).
- [13] R.M. Schafer, *Our Sonic Environment and the Soundscape the Tuning of the World*, Destiny Books, Rochester, Vermont, 1994.
- [14] Zhang, Kang, Towards the evaluation, description, and creation of soundscapes in urban open spaces, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 34 (2007) 68-86.
- [15] K. Herranz Pascual, I. Aspuru, I. García, Proposed Conceptual Model of Environmental Experience as Framework to Study the Soundscape, *Inter Noise 2010Lisbon, Portugal, 2010*, pp. 1-9.
- [16] A. Özçevik, Z. Yüksel Can, A laboratory study on the evaluation of soundscape, *Acoustics 2012Nantes, France, 2012*.
- [17] J. Kang, F. Aletta, T. Oberman, M. Erfanian, M. Kachlicka, M. Lionello, A. Mitchell, Towards soundscape indices, *ICA 2019Aachen, Germany, 2019*, pp. 2488-2495.
- [18] P.N. Dökmeci, *New Framework on Indoor Soundscaping through Built Entity, Sound Environment, and Contextural Experience*, The University of Sheffield, 2013.
- [19] U.B. Erçakmak, P.N. Dökmeci Yörükoğlu, Indoor soundscaping and its applicability in architectural practice, *Forum Acusticum 2020 (e-congress)Lyon, France, 2020*.
- [20] V. Acun, S. Yilmazer, C. Orhan, Indoor soundscape of historical spaces: The case of çengelhan caravanserai, *Euronoise 2018Crete, 2018*.
- [21] RIBA, *Plan of Work 2020 Overview*, RIBA, London, 2020.
- [22] B. Succar, Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders, *Automation in Construction*, 18 (2009) 357-375.
- [23] A.a.I. HMM, The design process <http://hmhai.com/design-phases/>.
- [24] I.a.A. Tailored, Design Process of Tailored Interiors and Architecture <https://tia-ltd.com/our-process/>.
- [25] I. Ruth Preucel, Interior design phases <https://ruthpreucelinteriors.com/design-process/>.
- [26] H. Sanoff, *Methods of Architectural Programming*, Dowden, Hutchinson & Ross1977.
- [27] N. Cross, N. Roozenburg, Modelling the Design Process in Engineering and in Architecture, *Journal of Engineering Design*, 3 (2007) 325-337.
- [28] T.J.v.d. Voordt, H.B.v. Wegen, *Architecture In Use: An Introduction to the Programming, Design and Evaluation of Buildings*, Architectural Press. Elseiver, Oxford, 2005.

İÇ MİMARLIK EĞİTİMİNDE SESİN BİR TASARIM ELEMANI OLARAK ELE ALINMASI: İŞİTSEL PEYZAJ ÇALIŞTAYI DENEYİMİ

Kıvanç Kitapçı¹

Çankaya Üniversitesi, Çankaya, Ankara, Türkiye

e-posta: kivanckitapci@canakaya.edu.tr

Papatya Nur Dökmeci Yörüköğlü²

Çankaya Üniversitesi, Çankaya, Ankara, Türkiye

e-posta: papatya@canakaya.edu.tr

ÖZET

Bu bildiride, Hacettepe Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı bölümünün düzenlediği Tasarım Eğitiminde Sıfır Atık Yaklaşımı Eğitim Çalıştayı II kapsamında yapılmış olan, ‘Sesin Kaynak Olarak Mekân Tasarımında Yönetimi ve Değerlendirilmesi’ başlıklı çalıştayı kurgusu ve uygulama süreci aktarılmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, katılımcılara mekan tasarımında işlev, konfor ve aidiyet gibi kavramlara da yön veren ses olgusunu nasıl yönetilebilir bir kaynak olarak ele alabileceklerini aktarmaktır. Toplam 24 katılımcı ile gerçekleştirilmiş olan bu çalıştayı oturumu, teori, uygulama ve tartışma olmak üzere toplam üç ana bölümden oluşmuştur. İlk bölümde katılımcılara, uygulamalı bölümün gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan mimari akustik, işitsel peyzaj ve ses tasarımı konularında teorik bilgiler özet olarak aktarılmıştır. İkinci, uygulamalı bölümde ise, aktarılan bu teorik bilgiler doğrultusunda 2 farklı işleve sahip, restoran ve ofis olarak belirlenmiş iç mekânların ses tasarımlarının, çalıştayı katılımcıları tarafından birbirleri ile etkileşimli olarak işitselleştirilmesi pratiği yapılmıştır. Bu çalıştayı oturumunda ortaya çıkan sonuç ürünlerin, iç mekân ses tasarımının görsel-işitsel deneyim üzerindeki katkısı hakkında farkındalık yaratması hedeflenmiştir. Katılımcıların hangi ses kaynaklarını, hangi mekânlarda ve işlevlerde, nasıl değerlendirecekleri çalıştayı ana çıktısını oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra, farklı katılımcıların aynı görsel için ürettikleri ses tasarımları arasındaki farklılıklar, tasarımcının işitsel çevre üzerindeki yaratıcı rolünü de vurgulamıştır.

Anahtar Kelimeler: Ses tasarımı, işitsel peyzaj, akustik eğitimi, tasarım eğitimi, ses tasarımı çalıştayı

**SOUND AS A DESIGN ELEMENT IN INTERIOR ARCHITECTURE
EDUCATION: SOUNDSCAPE WORKSHOP EXPERIENCE****ABSTRACT**

In this study, the planning and implementation process of a soundscape workshop entitled 'Management and Evaluation of Sound as a Resource in Space Design', which was held within the scope of Zero Waste Approach in Design Education Training Workshop II, organized by Hacettepe University, Faculty of Fine Arts, Department of Interior Architecture and Environmental Design. The aim of the study is to deliver the participants how phenomenon of sound, that also affect concepts of spatial design as function, comfort, and attachment, can be considered as a manageable resource. This workshop session, which was held with a total of 24 participants, consisted of three main parts: theory, practice and discussion. In the first part, the theoretical information on architectural acoustics, soundscape and sound design, which is necessary for the practical part to be realized, was briefly conveyed to the participants. In the second, applied section, in line with this theoretical information, the sound design of the interiors, which have 2 different functions, designated as restaurant and office, were made interactively by the workshop participants. It is aimed that the resulting products produced in this workshop session will raise awareness about the contribution of indoor sound design to the audio-visual experience. The main output of the workshop is how the participants will evaluate which sound sources, in which spaces and functions. In addition, the differences between the sound designs produced by different participant groups for the same visual also emphasized the creative role of the designer on the auditory environment.

Keywords: *Sound design, soundscape, acoustics education, design education, sound design workshop*

1. GİRİŞ

Atık denetimi ve yönetimi, iç mimarlık alanında, fiziksel çevre, kullanıcı konforu ve sürdürülebilirlik alt başlıkları kapsamında çalışılmakla beraber, farkındalığın daha da artırılması gereken önemli bir konudur. Fiziksel çevrenin mekansal bileşenlerine bakıldığında, ses, ışık, ısı, nem gibi değerlendirilmesi ve tasarlanması gereken faktörler görülmektedir [1]. Bu bileşenler özeline, tasarım eğitiminde ‘sıfır atık’ konusu, ses ve gürültü konuları ile bağlantılı olarak da ele alınmakta ve 1960’lı yıllarda literatürdeki yerini alan ‘işitsel peyzaj’ bilim alanı kapsamında da çalışılmaktadır [2]. İşitsel peyzaj bilim alanı, sesin yönetilebilir bir kaynak olarak değerlendirilmesinin önemine vurgu yapar ve gürültü denetimi çalışmalarının aksine, sesin denetlenmesi yerine sesin tasarlanması üzerine odaklanır.

İç mekan işitsel peyzaj bilim alanı, ses, kullanıcı deneyimi ve mimariyi bütünleştiren çok disiplinli bir alandır [3]. Özünde, herhangi bir kapalı akustik ortamı işitsel açıdan yeniden tanımlama potansiyeline sahiptir. Sadece mimari akustiğin teorilerine, yöntemlerine veya gürültü yönetimi tekniklerine dayanmaz, öncelikli olarak kullanıcı, algı, beklenti ve deneyim gibi konulara odaklanır. Bu boyutuyla, mekan tasarımı ve deneyimi konularında çalışan uzmanların ele alması gereken bileşenleri içinde barındırmaktadır [4]. İç mekan tasarımcısı atmosfer yaratırken, görsel veriler yalnızca gören gözün görme açısı ile sınırlıdır, ancak işitilebilir dünya çok daha geniş ve zengindir. Bu açıdan bakıldığında, iç mekan işitsel peyzaj tasarımı, herhangi bir sesi atık olarak değil, yönetilecek bir kaynak olarak kabul etme doğasına sahiptir [5].

2. SES VE MEKAN TASARIMI BAĞLANTISI

Sesin tasarım aşamasına entegrasyonu hem tasarımcı hem de kullanıcı için hayati önem taşımaktadır. Mekân tasarımcısı tarafından bu anlayışın içselleştirilmesi, ancak mesleki eğitim sırasında edinilmesi gereken yüksek düzeyde bir farkındalık ile mümkün olabilir [6]. İç mekân tasarımında görsel-işitsel verinin tutarlılığı esastır. Bu bağlamda, iç mekân deneyimine yön veren ve tasarım ögesi olarak nitelendirilebilecek çok sayıda ses kaynağı tipi bulunmaktadır. Bu tasarım öğelerinin hatalı, tutarsız veya bilinçsiz bir şekilde tasarlanması, değerli bir kaynağın boşa harcanması anlamına gelmektedir. İç mimarlar, bu ses kaynaklarının birçoğu üzerinde doğrudan veya dolaylı kontrole sahiptir. Tasarımcının ses tasarımı ve ses kaynağı yönetimi konularını derinlemesine anlamak ve içselleştirmek için yalnızca teorik bilgiyi dinlemeye ve öğrenmeye değil, aynı zamanda bu alanı diğer yöntem ve yaklaşımlarla keşfetmeye de ihtiyacı vardır ki bu ancak uygulamalı eğitim veya çalıştaylar ile

mümkündür. Bu çalışmada sunulan işitsel peyzaj çalıştayının birincil amacı, katılımcılara mekan tasarımında işlev, konfor ve aidiyet gibi kavramlara da yön veren ses olgusunu nasıl yönetilebilir bir kaynak olarak ele alabileceklerini aktarmaktır. Ayrıca bu çalıştay, benzer bir farkındalık yaratmak için katılımcılara interaktif bir platform sunmayı hedefler ve uygulamalı olarak işitsel peyzaj tasarımı konusunun ele alınmasını sağlar. Bu amaç doğrultusunda, katılımcılara farklı ses kaynaklarının iç mekanların işlevleri bağlamında doğru değerlendirilmesini ve tasarlanmasını deneyimletilmiştir. Bu sayede, işitsel çevrenin atığı olarak nitelendirilebilecek öznel bir kavram olan gürültünün azaltılması ve farkındalık yaratılması hedeflenmiştir.

Yalnızca görsel ürüne odaklanmak, bütüncül kullanıcı deneyiminde tutarsızlıklara sebebiyet verir [7]. İç mimar tarafından tasarlanan bir iç mekânda, hangi seslerin kaynak olarak nitelendirilebileceği, interaktif işitselleştirme yöntemleriyle deneyimlenebilir. Tasarımcı, ürettiği iç mekân tasarımını işitsel çevresiyle birlikte deneyimlediğinde, mekân tecrübesini ve atmosferi bütünüyle değerlendirebilmektedir [8]. Bu nedenle çalıştay katılımcılarının, çeşitli işlevlere sahip iç mekân tasarımlarını, işitsel çevre üzerinde doğrudan ve tam kontrol sahibi olarak tamamlama fırsatına sahip olmaları en önemli unsurlardan biridir.

3. ÇALIŞTAYIN PLANLANMA VE UYGULANMA SÜREÇLERİ

'Sesin Kaynak Olarak Mekân Tasarımında Yönetimi ve Değerlendirilmesi' başlıklı çalıştay, Hacettepe Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı bölümünün düzenlediği Tasarım Eğitiminde Sıfır Atık Yaklaşımı Eğitim Çalıştayı II kapsamında, 23 Şubat 2021 tarihinde çevrimiçi olarak gerçekleştirilmiştir. Çevrimiçi paylaşım platformu olarak Zoom yazılımı (Zoom.us) kullanılmıştır.

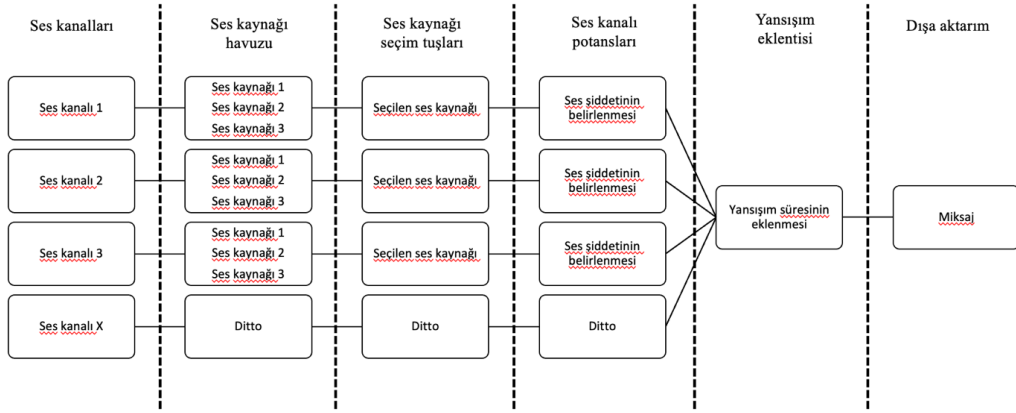
Toplam 24 katılımcı ile gerçekleştirilmiş olan çalıştay, teori (60 dakika), uygulama (90 dakika) ve tartışma (30 dakika) olmak üzere toplam üç saat (180 dakika) süren üç ana bölümden oluşmuştur. Çalıştay katılımcılarının iç mimarlık eğitimi aldıkları kurumlar çeşitlilik gösterdiğinden, mimari akustik konusuyla ilgili teorik altyapıları da kurumların müfredatları doğrultusunda farklılaşmaktadır. Bu sebeple, çalıştayın ilk bölümünde katılımcılara uygulamalı bölümün gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan yer duygusu, mimari akustik ve işitsel peyzaj konularında teorik bilgiler özet olarak aktarılmıştır. Teorik bölümün konu içeriği Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. ‘Sesin Kaynak Olarak Mekân Tasarımında Yönetimi ve Değerlendirilmesi’ çalıştay, teorik bölüm (birinci bölüm) konu içeriği.

1	Yer duygusu	Yer ve mekân Fenomenoloji Yer duygusu ve sosyokültürel süreç Yer yapıları
2	Akustik	Akustiğin kökeni Ses nedir? Mimari akustik Kapalı hacimlerde ses Gürültü nedir?
3	Algı ve gözlem	Algı ve gözlem
4	İşitsel peyzaj	İşitsel peyzaj tanımı İşitsel peyzaj çalışma alanları İşitsel peyzaj teorik modelleri Ses aileleri ve ses sınıfları

Çalıştayın ikinci bölümünde katılımcılardan beklenen, ilk bölümde aktarılmış olan teorik bilgiler doğrultusunda, sunulan iç mekân görselleri ile tutarlı işitsel çevrelerin tasarlanması olarak kurgulanmıştır. İşitsel çevrelerinin tasarlanması (işitselleştirme) için iki farklı işleve sahip (restoran ve ofis) iç mekân tipi belirlenmiştir. Öncelikle, hedeflenen atmosfer ve yer duygusunun tanımlanabilmesi için, belirlenen restoran ve ofis iç mekanlarının yüksek çözünürlüklü fotoğrafları katılımcılara sunulmuştur. İşitselleştirme sürecinde ve ön hazırlık aşamalarında, ses tasarımı disiplinlerinde dünya genelinde sıklıkla tercih edilen ve kabul görmüş olan Ableton Live Digital Audio Workstation (DAW) yazılımı ve eklentilerinden faydalanılmıştır. Ana yazılım mikraj aşamasında kullanılırken, yazılım paketine dahil olan eklenti programlar işitselleştirmede kullanılacak tekil ses dosyalarının kullanım öncesi temizlenmesi, normalizasyonu ve işitselleştirme sırasında ise yansıma süresinin belirlenmesi aşamalarında kullanılmıştır. Yazılım toplamda 32 ses kanalının eş zamanlı mikrajına izin vermekte olup, çalıştay sürecinde toplam 8 kanal kullanılmıştır. İşitselleştirme süreci toplam üç adımdan oluşmaktadır: (1) her bir ses kanalı için üç alternatif ses kaynağından birinin tercih edilmesi, (2) her bir ses kaynağının ses şiddetlerinin belirlenmesi ve (3) oda etkisinin yansıma eklentisi aracılığı ile ses kanallarına verilmesi (Şekil 1). İlk aşamada, kullanılan her kanalda üç farklı alternatif ses kaynağı bulunmaktadır ve katılımcılardan her bir ses kaynağını dinleyerek, içlerinden mekânın atmosferine ve yer duygusuna uygun buldukları tek bir ses kaynağını tercih etmeleri istenmiştir. Bu sekiz ses kanallının dördünde arka plan tipi ses havuzundan

(örn., doğa sesleri, anlaşılmayan konuşma, mekanik sistemler, HVAC), diğer dördünde ise sinyal tipi ses havuzundan (örn., malzeme temasları, alarmlar, uyarı sesleri, anlaşılabilir konuşma, elektronik/dijital cihaz sesleri, sentezlenmiş sesler) seçilmiş olan sesler yer almaktadır. İşitselleştirme sürecinin ikinci aşamasında, sekiz kanalın her birinin ses şiddeti, kanallara komşu potansiyometreler kullanılarak katılımcılar tarafından yine mekânların işlevleri (restoran veya ofis) ve hedeflenen atmosferler ve yer duygusu bağlamında değerlendirilerek ayarlanmıştır. Son aşamada ise, Ableton Live DAW yazılımının bütünleşik eklentisi kullanılarak seçilen seslerin bütününe yansımam süresi uygulanmıştır. Bu sayede, mekân hacminin büyüklüğünün de ses tasarımına dahil edilmesi sağlanmıştır. Süreç boyunca katılımcıların interaktif ses ortamlarının tasarımı üzerinde tam kontrolü bulunmuştur.



Şekil 1. Ableton Live DAW yazılımında işitselleştirme süreci şeması (Aşama 1: Ses kaynaklarının seçilmesi [ses kanalları, ses kaynağı havuzu ve ses kaynağı seçim tuşları]; Aşama 2: Ses şiddetlerinin belirlenmesi [ses kanalı potansları]; Aşama 3: Yansımam süresinin belirlenmesi [yansımam eklentisi]).

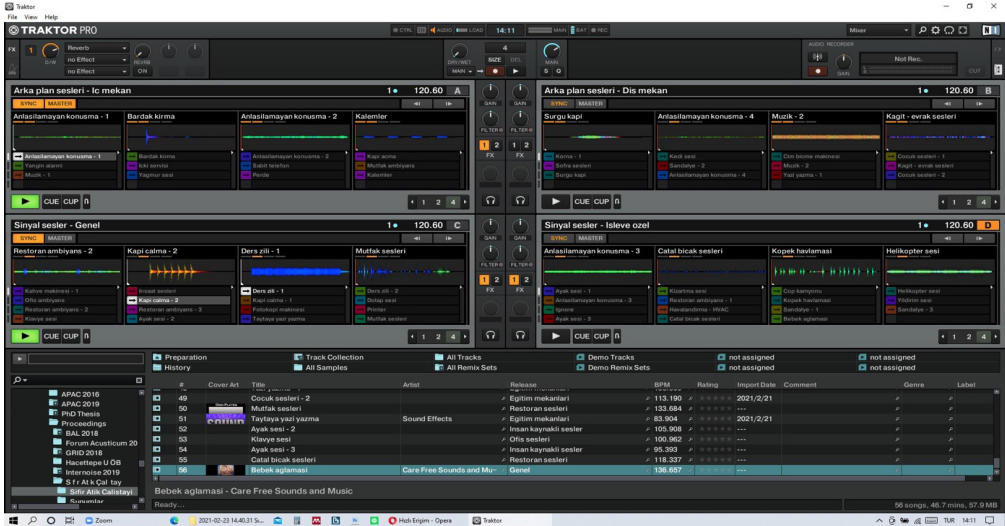
Katılımcılar ortalama 4 kişiden oluşan gruplar halinde bu 8 katmanda yer alan sesleri, belirlenen ses havuzlarından kendi aralarında tartışarak dedikleri gibi seçmiş, ses şiddetlerini ve mekanların ortalama yansımam sürelerini belirlemişlerdir. Çalıştayın uygulama bölümünün kısıtlı süresi (90 dakika) sebebiyle, her katılımcının bireysel olarak işitselleştirme sürecini gerçekleştirmesi mümkün olmadığından, grup içerisinde belirlenen bir katılımcı, yazılımın kontrolünü Zoom yazılımı üzerinden uzaktan alarak istenilen seçimlerin ayarlanması görevini üstlenmiştir (Şekil 2). Üretilen ses tasarımları, hedef görsel ile aynı anda deneyimlenmiş ve çıktılar Ableton Live DAW yazılımında dışa aktararak kaydedilmiştir.

Çalıştay katılımcıları, restoran ve ofis ortamları üzerinden kendilerine sunulan ses kaynaklarına odaklanarak ses tasarımlarını yapmışlardır. Bu sa-
yede, her tasarım kararının işitsel karşılığını değerlendirerek bütüncül bir iç
mekân tasarımına ulaşmayı amaçlamışlardır.

Bu bağlamda çalıştay kapsamında aşağıdaki hedefler belirlenmiştir;

- İç mekânların işitsel çevre tasarımında, hangi ses kaynaklarının, hangi
mekanlarda ve işlevlerde, nasıl değerlendirilebileceğini araştırmak.
- Ses kaynaklarının iç mimarlar tarafından nasıl kontrol edilebileceğini
tartışmak.
- İç mekân ses tasarımı yöntemlerini incelemek.
- İç mimarların işitsel çevreye yaklaşımları arasındaki farklılıkların, iç
mekân atmosferine etkisini gözlemlemek.

Tartışma süreci, çalıştayın son bölümünü oluşturmuştur. Bu bölümde, ikin-
ci bölümde tasarlanan işitsel çevre ürünleri görselleriyle eş zamanlı olarak arka
arkaya dinlenmiştir. İşitsel çevre ile görsel arasındaki tutarlılık ve tutarsızlıklar,
aynı görsel için farklı katılımcıların üretimleri arasındaki farklılıklar ve bu farklı-
lıkların sebepleri ve tasarım kriterleri çalıştay yürütücülerinin moderatörlüğünde
tartışılmıştır. Hem pratik esnasında, hem de sonrasında bu farklı işlevlere sahip iç
mekanların işitsel tasarımında tasarımcıların kararlarını tartışması, bu yöntemle
bilgi alışverişinin ve farkındalığın artırılması hedeflenmiştir.



Şekil 2. Çalıştay sırasında katılımcıların kullandığı ses düzenleme yazılımının ekran görüntüsü.

Bu çalıştayda ortaya çıkan sonuç ürünlerin, iç mekân ses tasarımının görsel-işitsel deneyim üzerindeki katkısı hakkında farkındalık yaratması hedeflenmiştir. Katılımcıların hangi ses kaynaklarını, hangi mekanlarda ve işlevlerde, nasıl değerlendirecekleri çalıştayın ana çıktısını oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra, farklı katılımcıların aynı görsel için ürettikleri ses tasarımları arasındaki farklılıklar, tasarımcının işitsel çevre üzerindeki yaratıcı rolünü de vurgulamıştır. Mekânsal ses tasarımının teorik çerçevesi [9] üzerine kurgulanmış bu çalıştay bir pilot çalışma niteliğindedir. Gelecekte gerçekleştirilecek çalışmalarda, tasarımcılar tarafından mekanların işlevleri ve yer duygusu doğrultusunda üretilen mimari ses tasarımlarının, işitsel peyzaj bağlamında dinleme testleri üzerinden ampirik veriler toplanarak değerlendirilmesi planlanmaktadır. Bu sayede, tasarımcıların tercihleri doğrultusunda alacakları kararların toplum üzerindeki olumlu ve olumsuz etkilerinin gözlemlenmesi mümkün görülmektedir.

3. SONUÇ

Mimarlıkta ses nasıl tasarlanır? Gürültü yalnızca yüksek ses şiddeti anlamına mı gelir? Bu sorular üzerine on yıllardır süregelen bilimsel çalışmalar, gürültü tanımının ancak mekanların bağlamıyla birlikte bir anlam ifade edebildiğini söylemektedir. İç mimarların ses tasarımı bağlamında amacı, yalnızca yüksek ses şiddetini engellemek değil, aynı zamanda yapılarda ve yapı çevreinde duymak istediğimiz sesleri de planlamak olmalıdır. Planlanmamış işitsel çevreinde kontrolsüzce oluşacak, bağlamına uygun olmayan her tür ses, iç mimarlar ve tasarımcılar tarafından tasarlanmalıdır.

Çalıştay katılımcıları öncelikle arka plan gürültüsünü yürütücüler tarafından sunulan üç alternatif arasından seçerek belirlemiştirler. Mekânsal ses tasarımında arka plan gürültüsü, mekanların işlevleri, coğrafi/bölgesel konumları ve hacimsel geometri ve büyüklükleri bağlamında yüksek miktarda bilgi taşımaktadır. Tasarımcıların iç mekânlardaki arka plan gürültüsü tercihleri mimari tasarım kararlarını doğrudan etkilemektedir. Örnek olarak yapıların cephe tasarımında yapılacak tercihler çevresel gürültünün iç mekâna iletimini doğrudan etkilemektedir. Buna ek olarak hacim büyüklüğü ve geometrisi, iç mekân yüzeylerinin yansım, saçılım ve yönlülük özelliklerini büyük oranda etkilemektedir.

Çalıştay katılımcıları bir sonraki adımda tekil ses kaynaklarını yürütücüler tarafından belirlenen alternatifler arasından seçerek belirlemiştirler. İç mekânlarda tekil ses kaynakları, bitiş malzemeleri ve mekanik/dijital cihazların işleyişleri hakkında mekân kullanıcılarına bilgi aktarmaktadır. Bu bağlamda değerlendirildiğinde, katılımcılar tarafından yapılan tekil ses kay-

nağı tercihleri, özellikle zemin bitiş malzemeleri (örn. ayak sesleri), mobilya (örn. ofis sandalyeleri, kapı kilit ve menteşeleri) ve mekanik/dijital ekipman seçimleri (örn. sabit telefonlar, okul zilleri, canlı veya kayıtlı müzik yayınları) gibi mimari ve iç mimari kararlarına etki etmektedir.

İşitselleştirme sürecinin üçüncü adımında, tekil ses kaynakların ses şiddetlerinin mekânın işlevine uygun olarak belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. Tekil ses kaynaklarının ses şiddetleri, öncelikle mekânsal kurgu ve ses kaynaklarının konum/yönü tarafından doğrudan etkilenmektedir. Tasarımcılar öngördükleri ses şiddeti seviyelerine göre mimari anlamda ses kaynaklarının konumlarına, her bir işlevin diğerlerine olan göreceli uzaklığına ve son olarak cephe tasarımına karar verebilmektedir.

Çalıştayın işitselleştirme sürecinin son adımında, yansım sürelerinin mekânın işlevine uygun olarak belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. Yansım süresi temelde bir iç mekânın akustik parmak izi niteliğindedir. Bu sebeple, yansım süresi, mekanların hacimsel büyüklükleri ve yüzey bitiş malzemeleri hakkında bilgi vermektedir. Çalıştay katılımcıları öngördükleri yansım süresi doğrultusunda mimari bağlamda yüzey malzemelerini seçebilir ve hacimsel büyüklüğe karar verebilmektedirler.

Çalıştay sonrasında yapılan görüşmelerde katılımcılar farklı bağlamlara ait seslerin doğrudan kontrol ve tasarımını üstlendiklerinde, bugüne kadar bildikleri ses ve gürültü tanımlarının değiştiğini ifade etmiştir. Katılımcıların çalıştay üzerine yaptığı yorumlardan bir kısmını aşağıda sunulmaktadır:

- *Bir Çevre Mühendisi olarak “ses-gürültü” temalarının “doğal kaynak-atik” teması odağında “işitsel peyzaj” kavramı altında değerlendirilmesinin multidisipliner yaklaşım bağlamında önemli olduğunu düşünüyorum.*
- *...açıkçası gürültü kavramının algılanışında altında yatan nedenleri bireysel olarak hiç sorgulamamıştım. Benim için büyük bir zevkti.*
- *...kafamdaki gürültü, mimari akustik gibi kavramların farklılaştığını ve farklı tanımlamaya başladığımı fark ettim. Bu anlamda ses ve işitsel peyzaj konusunda farkındalığının arttığını söyleyebilirim.*

Sonuç olarak, işitme duyusu olmadan iç mekân tasarımı eksik kalır, çünkü insan eylemlerinin gerçekleştiği her mekânda ses vardır. Bu sebeple, iç mekânda yaratılacak işitsel çevreyi öngörmeksizin, yalnızca görsel estetiği merkeze koyarak yapılan yapı ve fiziksel çevre tasarımı eksiktir. İç mimarlıkta amaç, duyarlar arası tutarlılık sağlayan bütüncül ve insan odaklı tasarım olmalıdır. Teori, uygulama ve tartışma üzere toplam üç bölümden oluşan bu çalıştay, iç mimarların tasarım yöntemlerine farklı bir perspektiften bakmalarını katkı sağlamıştır.

4. KAYNAKLAR

- [1] Alkabashi AHA, Dokmeci Yorukoğlu PN. Evaluating indoor environmental quality of a wellness center through objective, subjective and architectural criteria. *Megaron* 14:4 2019.. DOI:10.14744/MEGARON.2019.47113
- [2] Schafer M. *The soundscape: Our sonic environment and the tuning of the world*. New York: Alfred Knopf; 1977.
- [3] Dokmeci Yorukoğlu PN, Kang J. Analysing Sound Environment and Architectural Characteristics of Libraries through Indoor Soundscape Framework. *Archives of Acoustics* 41: 2 2016;203–212. DOI:10.1515/aoa-2016-0020
- [4] Ercakmak UB, Dokmeci Yorukoğlu PN. Comparing Turkish and European noise management and soundscape policies: a proposal of indoor soundscape integration to architectural design and application. *Acoustics* 1 2019; 847–865. DOI:10.3390/acoustics1040051
- [5] Al-bayyar Z, Kitapci K. An acoustic sense of place evaluation framework based on the room acoustic indicators. *e-Forum Acusticum Proc.*, Lion, France: 2020.
- [6] Kitapci K. Room acoustics education in interior architecture programs: A course structure proposal. *Inter-noise – 48th International Congress and Exhibition on Noise Control engineering.*, Madrid: 2019, p. 6997–7995.
- [7] Kitapci K, Galbrun L. Perceptual analysis of the speech intelligibility and soundscape of multilingual environments. *Appl Acoust* 2019; 151. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.03.001>.
- [8] Aburawis AAM, Dokmeci Yorukoğlu PN. An integrated framework on soundscape perception and spatial experience by adapting post-occupancy evaluation methodology. *Building Acoustics* 25:1 2018;3-16. DOI: 10.1177/1351010X18758478
- [9] Kitapci K, Ozdemir D. An interdisciplinary sound source categorization framework for environmental sound design. *Inter-noise – 50th International Congress and Exhibition on Noise Control engineering*, Washington: 2021 (In press).

RÜZGAR TÜRBİNİ GÜRÜLTÜSÜNÜN ÇGDYY KAPSAMINDA DEĞERLENDİRİLMESİ

M. Akif EMEKLİ¹

Siemens Gamesa Renewable Enerji A.Ş., Gürültü Mühendisi, İzmir, Türkiye
e-posta: emekliakif@gmail.com

Burak Ahmet TUNA²

Siemens Gamesa Renewable Enerji A.Ş., Aerodinamik Mühendisi, İzmir, Türkiye
e-posta: buraka.tuna@gmail.com

ÖZET

Rüzgar türbini kaynaklı gürültünün, gürültüyü oluşturan etmenlerin karmaşık etkileşimi ve ortam koşullarına göre ciddi farklılıklar göstermesi sebebiyle diğer kaynakların oluşturduğu gürültülerden farklı olarak ele alınması gerekmektedir. Küçük ölçekli ekipmanların ses gücü düzeyinin belirlenmesi için kullanılan laboratuvar test yöntemleri, rüzgar türbinlerinin boyutlarının çok büyük olması sebebiyle uygulanabilir değildir. Bununla birlikte diğer endüstriyel tesisler için yoğunlukla kullanılan ISO 8297 ve ISO 3746 gibi ses gücü tayini yöntemleri de ihtiyacı tam olarak karşılayamamaktadır. Bu durumun başka bir sebebi de rüzgar türbininin ses gücü düzeyinin, türbinin karşıladığı rüzgar hızına bağlı olarak değişen aerodinamik ve mekanik karakteristikler ile önemli farklılıklar göstermesidir. Çalışma kapsamında; Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği'nce belirlenen sınır değerlerin rüzgar türbinleri kaynaklı gürültü ile uyumluluğuna, yöntemlerin eksik kalan yönlerine, global uygulamalara, ÇGDYY kapsamında dikkate alınabilecek iyileştirmelere ve önerilere yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar Türbini Gürültüsü, Rüzgar Enerji Santrali Gürültüsü, Çevresel Gürültü, Ses Gücü Düzeyi Tayini, Rüzgar Türbini

EVALUATION OF WIND TURBINE NOISE BASED ON ÇGDYY REGULATION

ABSTRACT

Fundamental elements of wind turbine noise have a very complex dynamics and are significantly impacted from the working environment characteristics. Therefore, wind turbine noise needs special care compared to other noise sources. General methods used in laboratory tests that are suitable for regular sized equipment are not good enough for the wind turbine noise due to the wind turbine physical scales. In addition, ISO 8297 and ISO 3746 standards that are employed to measure sound power level in other industrial sites do not fully satisfy the requirements for wind turbine sound power level measurements. The main reason behind that is drastic variations in wind turbine sound power level with the incoming wind speed which yields significant changes in the aerodynamic and mechanical characteristics. In this study, the coherence of wind turbine noise limits that are defined in ÇGDYY regulation will be evaluated. Also, the measurement methods and noise levels that are available globally in various standards will be summarized and the potential improvements that are not part of ÇGDYY regulation will be discussed.

Keywords: *Wind Turbine Noise, Wind Farm Noise, Environmental Noise, Determination of Sound Power Level, Wind Turbine*

1. GİRİŞ

Nüfus artışı ve buna bağlı olarak ihtiyaç duyulan enerjinin tüm dünya genelinde artış yöneliminde olması sebebiyle bilinen tüm enerji kaynaklarının kullanımının önemi yadsınamazdır. Bununla birlikte fosil kaynaklı yakıtların gelecekte tükenme ihtimalinin olması ve çevreyi kirleten atıklar bırakması yeni enerji kaynaklarının arayışını gündeme getirmiştir. Bu tür enerji kaynaklarının en başında ise rüzgar enerjisi gelmektedir. Rüzgar enerjisinden faydalanılarak elektrik üretimi aşamasında her ne kadar hava kirliliği oluşmasa da, gürültü problemlerinin yaşanması muhtemeldir. Rüzgar enerji santralleri gürültüsü kaynaklı şikayetlerin azaltılabilmesi için bir çok sivil toplum kuruluşu, hükümetler ve çevre örgütleri ile birlikte üreticiler birçok çalışma gerçekleştirmektedir. Bu çalışma kapsamında, dünyada uygulanan rüzgar türbini gürültüsü değerlendirme kriterleri temel alınarak oluşturulan öneriler yer almaktadır.

2. RÜZGAR TÜRBİNİ GÜRÜLTÜSÜ VE ÖLÇÜMÜ

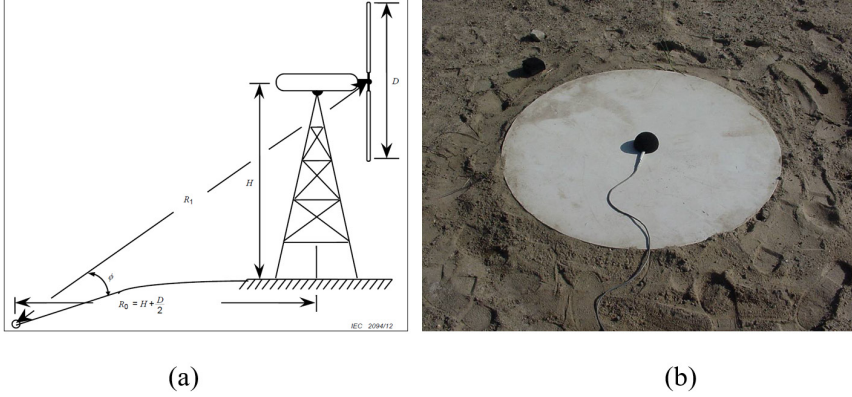
2.1. Rüzgar türbini gürültüsü

Rüzgar türbini gürültüsü diğer gürültü kaynaklarından farklı değerlendirilmelidir. Ölçüleri uygun herhangi bir ekipmanın ses gücü düzeyinin belirlenmesi için kullanılan laboratuvar deneyleri rüzgar türbini için uygulanabilir değildir. Bununla birlikte endüstriyel tesisler için sahada yoğunlukla kullanılan ses gücü tayini yöntemleri de (ISO 8297, ISO 3746) ihtiyacı tam olarak karşılayamamaktadır. Bu ihtiyacın karşılanamamasının en önemli sebebi rüzgar türbininin ses gücü düzeyinin, türbinin karşıladığı rüzgar hızı ile değişmesidir. Diğer çevresel gürültü ölçümlerinde karşılaşılan en yüksek rüzgar hızlarına göre rüzgar türbinlerinde 3-4 kat daha yüksek hıza sahip rüzgar sebebiyle özel ölçme teknikleri, mikrofon filtreleri, ölçüm düzlemlerinin tanımlanması ve doğrulanması gerekmektedir.

Artan rüzgar hızı ile ortamın arkaplan gürültü düzeyi de artış gösterecektir. Böylece en yüksek ses gücü düzeyinin oluşacağı rüzgar hızlarında, arkaplan düzeyleri kaynaklı belirsizlikler artacaktır. Arkaplan gürültü düzeylerindeki bu artış alıcı konumlarda oluşan rüzgar türbini kaynaklı ses basıncı düzeyinin maskelenmesine de sebep olacaktır. Bir başka deyişle, alıcı konumlardaki en büyük etkinin, rüzgar türbininin en yüksek ses gücü düzeyinde oluşmaması, çevre koşullarına, türbinin aeroakustik özelliklerine ve mekanik bileşenlerine bağlı olması beklenmektedir.

2.2. IEC 61400-11 ses gücü düzeyi ölçme standardı

Ses gücü düzeyi ölçümleri dolaylı ölçme tekniği olarak düşünülmelidir. Temel olarak, ölçülen ses basıncı düzeylerinin standartlarca belirlenen hesaplama metodları ile işleme sokulması ile elde edilir. Bu amaç doğrultusunda Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) tarafından IEC 61400-11 kodlu, “Bölüm 11: Akustik Gürültü Ölçüm Teknikleri” standardı yayınlanmıştır.



Şekil 1. IEC 61400-11 Ölçüm Konumu (a) ve Mikrofon Bağlantısı (b) [1]

Hızlı ve güvenilir bir yöntem olması ile birlikte benzer türbinlerin karşılaştırılması için uygulanabilir olması bu ölçme yönteminin sektör tarafından tercih edilmesinin en önemli sebeplerinden biridir. IEC 61400-11 standardı gereğince yapılan ölçümler rüzgara karşı yapılır. Bu ölçümler 10 saniyelik periyotlarla en az 1 metre çapında yansıtıcı bir yüzeyin ortasına sabitlenmiş mikrofonun zemine yerleştirilmesi ile gerçekleştirilir. Ölçme konumları Şekil 1’de detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

Ölçümler, en az %85 maksimum gücün üretildiği rüzgar hızınının 0.8 ve 1.3 katı aralığını gerçekleştirilmelidir. Bu aralık yaklaşık olarak 6-10 m/s rüzgar hızlarına (10 metre yükseklikte) denk gelmektedir. Ölçüm adetleri ilgili standardta detaylı bir şekilde belirlenmiş olup; her bir $\frac{1}{2}$ m/s’lik rüzgar hızı aralıklarında en az 10 adet ölçümün alınması gerektiği vurgulanmıştır.

3. YASAL ZORUNLULUKLAR

3.1. Türkiye’de uygulanan yasal zorunluluklar ve değerlendirmeler

Kentlerde artan gürültü kirliliğinin önlenmesi adına, Avrupa Birliği 1990’lı yılların sonunda çalışmalarına başlamış ve 25 Haziran 2002 tarihinde çevresel gürültüye ilişkin kapsamlı bir direktif olan END (Environmental No-



ise Directive) yayınlanmıştır. Bu yayınlanan belge ile üye ve uyum sürecindeki ülkelerde müşterek bir yaklaşımın belirlenmesi amaçlanmıştır. Endüstriyel alanlar, ulaşım yolları ve diğer faaliyetlerden kaynaklanan gürültünün etkisinin en aza indirilmesi amacıyla ülkemizde de END doğrultusunda çalışmalar yapılmış, 4 Haziran 2010 tarihinde 27601 sayılı Resmi Gazetede “Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği (ÇGDYY)” yayınlanmıştır [2].

Rüzgar Enerji Santralleri kaynaklı gürültü özelinde net bir karar olmamasına karşın endüstriyel tesislere ilişkin gürültü düzeyleri ÇGDYY’ye göre aşağıdaki hükümler ile sınırlandırılmıştır [3].

Madde 22 – (1) İşletme, tesis, atölye, imalathane ve işyerlerinden çevreye yayılan gürültü seviyesine ilişkin kriterler aşağıda belirtilmiştir:

- Her bir işletme ve tesisten çevreye yayılan gürültü seviyesi Ek-VII’de yer alan Tablo-4’te verilen sınır değerleri aşamaz.
- Gürültüye hassas kullanımları etkileyebilecek şekilde yakınında, bitişiğinde, altında veya üstünde faaliyetini sürdüren; her bir işyeri, atölye, imalathane ve benzeri işletmelerden hava yoluyla çevreye yayılan veya ortak bölme elemanları, ara döşemeler, tavan veya bitişik duvarlar aracılığıyla hassas kullanımlara iletilen çevresel gürültü seviyesi Leq gürültü göstergesi cinsinden arka plan gürültü seviyesini 5 dBA’dan fazla aşamaz.
- Birden fazla işyeri, atölye, imalathane gibi işletmeler ile organize sanayi bölgesi veya küçük sanayi sitesinden çevreye yayılan toplam çevresel gürültü seviyesi Leq gürültü göstergesi cinsinden arka plan gürültü seviyesini 7-10 dBA aralığından fazla aşamaz. Bu aralık esas alınmak kaydıyla, toplam çevresel gürültü seviyesi; gürültüye maruz kalınan alandaki etkilenen kişi sayısı, gürültü kaynağı ile gürültüye hassas mekânlar arasındaki mesafe ve benzeri faktörler göz önünde bulundurularak İl Mahalli Çevre Kurulu Kararı ile belirlenir. Bu bentte verilen sınır değerini aşılması halinde, arka plan gürültü seviyesine katkısı olan her bir işyeri sınır değer aşımından eşit olarak sorumludur. Gürültüye katkı oranları belirlendikten sonra her bir işletme gerekli tedbirleri alır.
- İşletme, tesis, atölye, imalathane ve işyerlerinin faaliyeti sonucu oluşabilecek darbe gürültüsü LCmax gürültü göstergesi cinsinden 100 dBC’yi aşamaz.

Tablo 1. ÇGDYY EK-VII Tablo-4

Alanlar	L _{gündüz} (dBA)	L _{akşam} (dBA)	L _{gece} (dBA)
Gürültüye hassas kullanımlardan eğitim, kültür ve sağlık alanları ile yazlık ve kamp yerlerinin yoğunluklu olduğu alanlar	60	55	50
Ticari yapılar ile gürültüye hassas kullanımların birlikte bulunduğu alanlardan konutların yoğun olarak bulunduğu alanlar	65	60	55
Ticari yapılar ile gürültüye hassas kullanımların birlikte bulunduğu alanlardan işyerlerinin yoğun olarak bulunduğu alanlar	68	63	58
Endüstriyel alanlar	70	65	60

Bu hükümlere ek olarak, “Çevre ve Orman Bakanlığı” tarafından 2011 yılında yayınlanan “Çevresel Gürültü Ölçüm ve Değerlendirme Kılavuzu” dokümanında da belirtildiği üzere; tonalite, darbesellik ve düşük frekans içeriği (Özel Akustik Karakteristik (ÖAK)) açısından da değerlendirmelerin yapılması gerekliliği vurgulanmıştır [4]. ÖAK bulunması durumunda tonalite için +6 dB, darbesellik için +12 dB ve düşük frekans içeriği için ise +5 dB düzeyine kadar düzeltme teriminin uygulanması önerilmektedir. Bu bölüme kadar bahsedilen tüm sınır değerler, Rüzgar enerji santrallerinin işletme aşaması ile ilgilidir. İnşaat aşamasında ÇGDYY Ek-VII Tablo 5’teki sınır değerler sağlanmalıdır.

Tablo 2. ÇGDYY EK-VII Tablo-5

Faaliyet türü (yapım, yıkım ve onarım)	L _{gündüz} (dBA)
Bina	70
Yol	75
Diğer kaynaklar	70

Yukarıda belirtilen hükümlerin sonucu olarak Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından sunulan rapor formatları kullanılarak akustik raporların hazırlanması gerekmektedir. Bu raporlar, her ne kadar rüzgar enerji santralleri “Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmelik” kapsamında bulunmasalar da, genellikle kapasite artırımı veya tesis kurulumu süreçlerinde “Planlanan Tesisler için Çevresel Gürültü Analizi ve Akustik Raporu” başlığı ile hazırlanmakta olup; ÇGDYY’de belirtilen ilgili ölçüm (ISO 1996 serisi standartlar) ve hesaplama metotları (ISO 9613-2) ile değerlendirilmektedir. Bu raporların kanuni dayanağı ise ÇGDYY Madde-33’te belirtilen;

“...çok hassas ve hassas kullanımlardan itibaren en az 500 metre mesafede olan veya bu Yönetmelik çerçevesinde gürültü haritaları hazırlanması gereken yerleşim yerleri dışında bulunan işletme ve tesisler için çevre izni veya çevre izin ve lisans belgesine esas değerlendirme yapılmaz. Ancak, yetkili idarenin talep etmesi halinde işletme ve tesisler için akustik rapor hazırlanması zorunludur.” ve Madde 34’te belirtilen “...yetkili idare tarafından çevresel gürültü yönünden değerlendirme yapılır, gerektiğinde çevresel gürültü seviyesi değerlendirme raporu talep edilir ve bu rapora ilişkin yetkili idarenin uygun görüşü esas alınır.” ibaresidir.

3.2. Dünya genelinde yasal zorunluluklar ve değerlendirmeler

Dünya genelinde kullanılan, rüzgar enerji santrali gürültüsü özelinde hazırlanmış birçok yönetmelik ve rehber doküman mevcuttur. Bu dokümanlar gerek yerel yönetimler gerekse uluslararası kuruluşlarca oluşturulmuştur. Rüzgar türbini teknolojisinin her geçen gün gelişmesi sonucunda gürültü düzeylerindeki değişimler, bu dokümanların sürekli olarak geliştirilmesi ve güncellenmesini gerektirmektedir. Ülkeler arasında akustik düzeyler açısından farklı yaklaşımlar mevcuttur. Bunlar; ses gücü düzeyi ve ses basıncı düzeyi sınırlandırmalarıdır.

Bunlara ek olarak tonal duyulanma, genlik modülasyonu, darbesellik ve düşük frekans içeriği gibi Özel Akustik Karakteristiklere de sınırlamalar getirilmektedir. Tüm bu sınırlamalar tanımlanırken rüzgar hızı verisi (kule yüksekliği veya 10 metre yükseklik) de bir indis olarak kullanılmaktadır. Örnek vermek gerekirse, Danimarka’da kaynak ses gücü ölçümüne bağlı olarak alıcı konumlarda hesaplanan ses basınç düzeyi sınırlandırmaları vardır. Bu sınırlandırmalar rüzgar hızı 10 metre yükseklikte 8 m/s ve 6 m/s için ayrı ayrı tanımlanmıştır. Avustralya Viktorya eyaletinde ise arkaplan gürültü düzeyine bağlı olarak alıcı konumlarda ölçülen değerlere bazı sınırlandırmalar getirmiştir. Bazı ülkeler L90, bazı ülkeler L95 bazı ülkeler ise Leq göstergesini baz almaktadır. Tüm yaklaşımlar kendi içlerinde teknik olarak geçerli açıklamalar barındırmaktadır.

Ülkeler, bünyesinde bulunan ölçüm firmalarının kapasitesi, arazi yapısı, bina yoğunlukları, genel olarak kullanılan türbin tipleri, tecrübeleri ve mevcut yasal düzenlemeleri dikkate alarak, RES kaynaklı gürültüye farklı indislerde, düzeylerde ve konumlarda sınırlandırmalar getirmiştir.

4. ÇGDYY KAPSAMINDA RÜZGAR ENERJİ SANTRALLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ ÜZERİNE ÖNERİLER

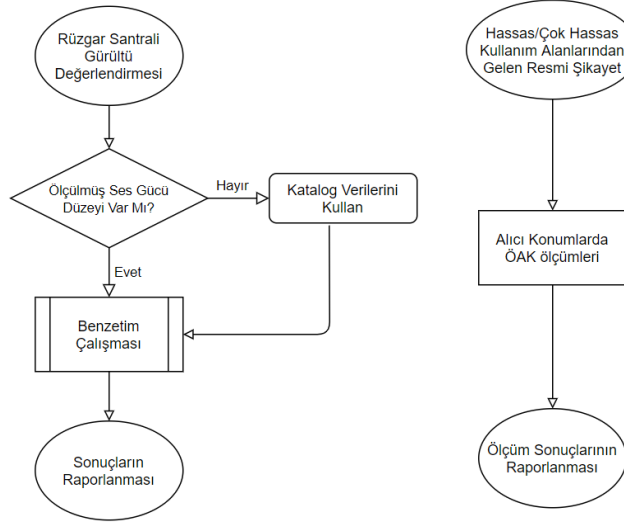
Daha önceki bölümlerde de anlatıldığı üzere dünya genelinde çoğu ülke, rüzgar enerji santralleri kaynaklı gürültünün denetlenebilmesi için mevcut yönetmeliklerine uyumlu olacak şekilde mevzuat düzenlemeleri yapmaktadır.

Daha önce gerçekleştirilmiş birçok çalışma dikkate alınarak bu bölümde bazı önerilere yer verilecektir. Bu öneriler, dünya çapında hali hazırda uygulanan yöntemlerin mevcut ÇGDYY hükümleri ile uyumluluğu dikkate alınarak oluşturulmuştur.

4.1. Öneri 1: Bilgisayar benzetim çalışmalarının baz alınarak değerlendirilmelerinin gerçekleştirilmesi

Bu öneri, rüzgar türbinlerine yönelik üreticilerin sağladığı katalog verileri ve/veya daha öncesinde akredite kuruluşlarca gerçekleştirilen ölçümlerin baz alınmasını ve bu veriler ile gürültü benzetim çalışmalarının yapılmasını içermektedir. Benzetim çalışması sonucunda alıcı konumlarda hesaplanan ses basınç düzeyleri farklı rüzgar hızlarında belirlenen sınır değerler ile karşılaştırılabilir. Elde edilen sonuçlar baz alınarak rüzgar enerji santrallerinde türbin gücüne yönelik düzenlemeler yapılabilir. Bu konsept Danimarka'da uygulanmaktadır. Danimarka Çevre Bakanlığı'nun internet sitesinde yer alan "Gürültü düzeylerine hesaplanarak ulaşılmalıdır çünkü kesin sonuç verecek ölçme çalışmalarını gerçekleştirmek zordur." cümlesi yer almaktadır [5]. Bildirinin ilk bölümlerinde açıklanan değişken ses gücü düzeyi, farklı rüzgar karakterlerinde farklı sonuçların olması bu hipotezin en önemli dayanağıdır. Bu öneride Özel Akustik Karakteristikler (ÖAK) olarak adlandırılan tonal duyulanma, darbesellik, düşük frekans içeriği, genlik modülasyonu gibi özellikler, komşu yapılardan gelecek resmi şikayetler dikkate alınarak, santralin faaliyet süresi içinde ölçüm çalışmaları ile belirlenmelidir. Rüzgar enerji santrali sözleşme aşamasında, alımı gerçekleştirilecek rüzgar türbinlerinin alıcı konumlarda ÖAK içermemesi üreticinin sorumluluğuna bırakılabilir.

Önerilen konseptin iş akış şeması Şekil 2'de sunulmaktadır.



Şekil 2. Öneri 1'in İş Akış Şeması

Danimarka özelinde belirlenen sınır değerler açık alanda bulunan konutlar için 44 dBA (10 metre yükseklikte ölçülen 8 m/s rüzgar hızında) ve 42 dBA (10 metre yükseklikte ölçülen 6 m/s rüzgar hızında) düzeyindedir.

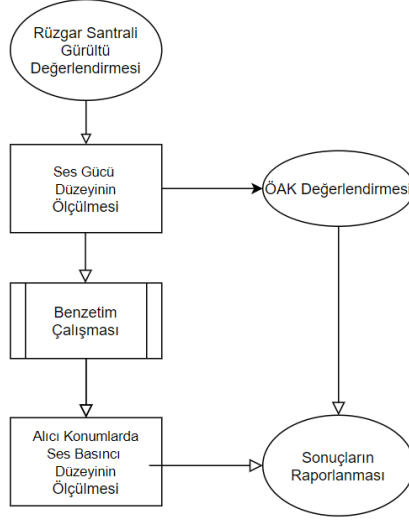
Türkiye’de planlanan tesislerin konumları ve mevcut ÇGDYY hükümleri dikkate alınarak, mevcut arkaplan gürültü düzeylerinin belirlenen sınır değerlerden yüksek olması durumunda, “Arka Plan Gürültü Düzeyi + 5 dBA” şeklinde bir gereklilik ortaya konabilir. Bu gerekliliğin olması durumunda ise, benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar, inşa faaliyetleri öncesi gerçekleştirilecek uzun dönem arkaplan gürültü ölçüm sonuçları ile kıyaslanabilir.

Bu öneri kapsamında, rüzgar türbini gürültü değerlendirmesi çalışmalarında ölçümü en zor veri olan rüzgar hızı verisinin ölçümü mevcut değildir. Bu sebeple fayda ve/veya uygulanabilirlik oranı en yüksek öneri olarak karşımıza çıkmaktadır.

4.2. Öneri 2: Bilgisayar benzetim çalışmalarının alıcı konumlarda ölçümler ile doğrulanması

Bu öneri, rüzgar türbinlerine yönelik üreticilerin sağladığı katalog verileri ve/veya ilgili sahada akredite kuruluşlarca gerçekleştirilen ses gücü düzeyi ölçümlerinin baz alınmasını, bu veriler ile gürültü benzetim çalışmalarının yapılmasını ve ardından alıcı konumlarda ölçümler ile kıyaslanmasını içermektedir.

Buna benzer konsept Avustralya'nın bazı eyaletlerinde uygulanmaktadır. Otoriteler tarafından belirlenen bazı bilgisayar benzetim parametrelerine uygun olarak geliştirilen hesaplama sonuçları, sahada ölçümler ile elde edilen ses basıncı düzeyi verileri ile kıyaslanmaktadır. Türbine yakın konumlarda gerçekleştirilen ses gücü düzeyi ölçüm sonuçları ve ÖAK içeriği ile katalog verilerinde sunulan ses gücü düzeylerinin doğruluğu araştırılmaktadır.



Şekil 3. Öneri 2'nin İş Akış Şeması

Yalnızca bu öneriye bağlı olmaksızın, tonal duyulanma için hangi ceza / santral faaliyeti durdurma yöntemi, hangi ölçüm yöntemi izlenecek gibi bilgilerin tanımlanması için çalışma gruplarının kurulması önerilmektedir.

4.3. Öneri 3: Alıcı Konumlarda Ölçümler ile Değerlendirmelerin Yapılması

Bu öneri, alıcı konumlarda yalnızca ses basıncı düzeyi değerlerinin ölçülmesini içermektedir. Farklı rüzgar hızlarında türbinlerin açılıp kapanması ile oluşan arka plan gürültü düzeyleri ve operasyonel gürültü düzeylerinin belirlenecek sınır değerler ile karşılaştırılması temel yaklaşımdır.

Bu öneri, uluslararası literatürde "ON/OFF Test" olarak da geçmektedir. İlgili önerinin en güçlü yanı, Türkiye'de hizmet veren çevre laboratuvarlarının aşına olmadığı IEC 61400-11 standardına ihtiyaç duymadan alıcı konumlarda maruziyet değerlendirmesine izin vermesidir. Benzer yaklaşım diğer endüstriyel tesislerin "Çevresel Gürültü Seviyesi Değerlendirme" çalışmalarında da uygulanmaktadır. Ancak, rüzgar türbini gürültüsünün özellikleri rüzgar hızına



bağlı olarak değişiklik göstereceğinden, daha uzun süreli ölçüm çalışmaları ve hassas rüzgar hızı verilerinin kullanılması gibi faktörler ilgili önerinin sahada uygulanabilirliğini zorlaştırmaktadır. Bu önerinin uygulanması durumunda rüzgar hızı verisinin nasıl elde edileceğinin (güç eğrisi, nacelle anemometresi, 10 metre ölçüm direği verisi) detaylı olarak belirlenmesi gerekmektedir. Buna ek olarak rüzgar türbini gürültü karakteristiği dikkate alınarak, yeni sınır değerlerin belirlenmesi gerekmektedir.

5. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında rüzgar türbini kaynaklı çevresel gürültü değerlendirilmiş ve rüzgar enerji santralleri çevresinde gürültünün yönetimi ile ilgili yerel ve uluslararası yönergeler incelenmiştir.

Rüzgar enerji santrallerinde oluşan gürültü düzenlemelerinin insan sağlığı ve çevresel gürültü kriterleri baz alındığında, hassas olarak ele alınan ülkelerde hali hazırda kullanılan farklı uygulamalara uyumlu öneriler getirilmiş ve yerel olarak uygulanması için detaylandırılmıştır. Bu öneriler ÇGDYY kapsamında dikkate alınarak gürültü düzenlemelerinde iyileştirmelere referans olabilir. Mevcut ÇGDYY kapsamında sunulan gürültü sınır değerleri 60 dBA ve üzerindedir. Bu değerler, dünyada uygulanan diğer yönetmeliklere göre oldukça yüksek değerlerdir. Bu sebeple rüzgar türbini gürültüsü özelinde yönetmelik eki veya farklı bir madde oluşturulması gerekmektedir.

Çalışma kapsamında sunulan öneriler, en iyi uygulama yöntemleri dikkate alınarak hazırlanmıştır. Gelecek çalışmalarda detaylandırılması gereken konuların olduğu unutulmamalıdır. Bu konulardan birini örnek vermek gerekirse; benzetim çalışmasında kullanılacak parametrelerdir. ÇGDYY kapsamında hesaplamalar için kullanılan ISO 9613-2 standardı, rüzgar türbini gibi 30 metreden daha yüksek konumda bulunan kaynaklarda görece daha yüksek belirsizlik değerlerine sahiptir. Örneğin, Siemens Gamesa firması tarafından geliştirilmekte olan 5X platformuna ait rüzgar türbinleri 170 metre rotor çapına ve 165 metre kule yüksekliğine sahiptir [6]. Dolayısıyla ISO 9613-2 standardı yerine, rüzgar türbini gürültüsü için geliştirilmiş veya doğrulaması yapılmış hesaplama yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir.

Geliştirilen önerilerin detaylandırılması, ülkemizde uygulanabilirliğinin sorgulanması ve diğer altyapı çalışmalarının gerçekleştirilebilmesi için Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, meslek örgütleri ve sivil toplum kuruluşlarınca çalışma gruplarının oluşturulması tavsiye edilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- [1] IEC (International Electrotechnical Commission), IEC 61400-11: Wind turbine generator systems- Part 11: Acoustic noise measurement techniques. Document No. 88/141/CDV.
- [2] Emekli M. A., (2019). Havalimanı Çevresindeki Yapılarda Gürültü Denetiminde Kaynağa İlişkin Özelliklerin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] T.C. Resmi Gazete, Çevresel Gürültünün Denetimi ve Yönetimi Yönetmeliği, (27601), 4.06.2010.
- [4] Çevresel Gürültü Ölçüm ve Değerlendirme Kılavuzu, <https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/icerikler/cevresel-gurultu-olcum-ve-degerlend-rme-klavuzu-20180209145104.pdf>, 25 Temmuz 2021.
- [5] Ministry of Environment of Denmark, Noise From Wind Turbines, <https://eng.mst.dk/air-noise-waste/noise/wind-turbines/noise-from-wind-turbines/>, 25 Temmuz 2021
- [6] SG 5.8-170 Onshore Wind Turbine, <https://www.siemensgamesa.com/products-and-services/onshore/wind-turbine-sg-5-8-170>, 25 Temmuz 2021

İSTANBUL HANLAR BÖLGESİNDEKİ AVLU VE BAHÇELERİN SESSİZ ALAN OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİ ÜZERİNE BİR ALAN ÇALIŞMASI

Gülşen Akın Güler¹

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, Tepebaşı, Eskişehir, Türkiye,
e-posta: gulsenakinguler@gmail.com

Aslı Özçevik Bilen²

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, Tepebaşı, Eskişehir, Türkiye,
e-posta: asliozcevik@hotmail.com.

ÖZET

Ülkemizde yürürlükte olan Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği'nde yer verilen "yerleşim alanı içindeki sessiz alan"lar, gürültülü kent ortamında yaşayan ve günlük streslerle baş etmeye çalışan kentlinin dinlenme, rahatlama ve zihinsel olarak yenilenme için ihtiyaç duyduğu kentsel açık alanlardır. Bu nedenle günümüz kentlerinde bu tür alanların varlığı ve gündelik yaşama katılarak kullanılabilmesi önem kazanmaktadır. Ancak bilindiği gibi günümüz Türk kentlerinde bu amaçla kullanılacak kentsel yeşil alanlar yeterli değildir. Bu durum, sıkışık kent dokusunda kentlileri, nefes alacağı alternatif sessiz alanlar aramaya yöneltmektedir. Bu çalışmada, yoğun turistik ve ticari faaliyetleriyle ön plana çıkan İstanbul Tarihi Yarımada Hanlar Bölgesi'ndeki han avluları ve cami bahçelerinin sessiz alan olarak değerlendirilmesi ve kullanılabilirliği, alan çalışmalarında gerçekleştirilen akustik ölçüm ve anket verileri doğrultusunda irdelenmiştir. Çalışma sonucunda, düzey, düzey farkı, ses kaynaklarının türü gibi alana ait akustik özellikler ile birlikte alandaki işlevler, engel durumu, bakım, kullanıcı sayısı ve yeşil doku gibi özelliklerin de sessiz alan olma durumu ve alanların bu amaçla kullanılabilirliği üzerinde etkili olduğu ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yerleşim alanı içindeki sessiz alan, Sessiz alan, Gürültü.

A CASE STUDY ON USABILITY OF KHAN COURTYARDS AND MOSQUE GARDENS AS QUIET AREA IN ISTANBUL KHANS REGION

ABSTRACT

The “quiet areas in agglomerations” included in the Regulation on Assessment and Management of Environmental Noise in force in our country are urban open spaces that the city dweller living in a noisy urban environment and trying to cope with daily stresses need for rest, relaxation and mental restoration. For this reason, the existence of such areas and their usability by participating in daily life gain importance in today’s cities. But as is known, urban green spaces that can be used for this purpose in today’s Turkish cities are not enough. This situation leads the citizens in the dense urban fabric to seek alternative quiet spaces to freshen up. In this study, the evaluation of the khan courtyards and mosque gardens in the Istanbul Historical Peninsula Khans Region, which stands out with its intense touristic and commercial activities, as a quiet area and its usability are examined in line with the acoustic measurements and survey data carried out in the field studies. As a result of the study, it was revealed that the acoustic characteristics of the area such as level and level difference, the types of sound source as well as features such as functions, noise barrier effect, maintenance, number of users and green feature in the area have an effect on the status of being quiet area and the usability of the areas for this purpose.

Keywords: Quiet areas in agglomerations, Quiet areas, Noise.

1. GİRİŞ

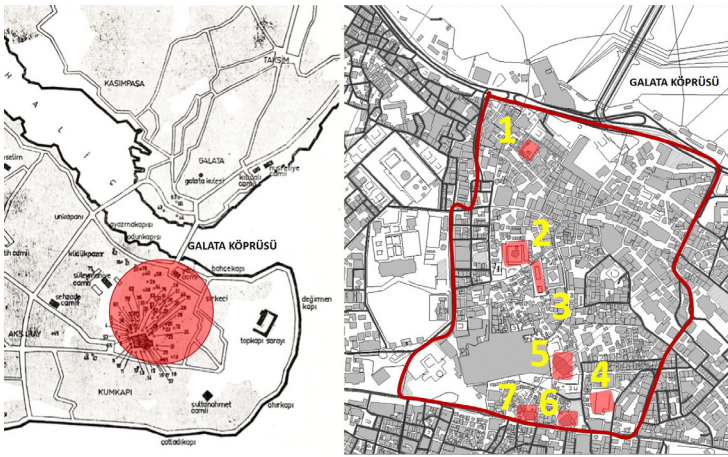
Çevresel gürültünün değerlendirilmesi ve yönetilmesine ilişkin 2002/49/EC sayılı Direktif, AB’de gürültü kirliliği seviyelerini belirlemek ve gerekli eylemleri hayata geçirmek için ana araçtır [1]. Bu direktif doğrultusunda hazırlanan ve ülkemizde yürürlükte olan “Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği” [2], çevresel gürültüye maruziyetin belirlenmesi, çevresel gürültü ve etkileri hakkında bilgilerin kamuya açıklanması ve gerekli yerlerde çevresel gürültünün önlenmesi ve azaltılması, gürültü düzeyinin düşük olduğu yerlerde çevresel gürültü kalitesinin korunması olmak üzere üç eylem alanına odaklanır. Ayrıca yönetmelikte gürültü düzeyinin düşük olduğu alanlardan “açık arazideki sessiz alan” ve “yerleşim alanı içindeki sessiz alan” tanımlanmıştır. “Yetkili idare tarafından gürültü kaynakları için belirlenen sınır değerlerin üstüne veya yetkili idare tarafından konulmuş belli bir değerden daha büyük bir gürültü gösterge değerine maruz kalmayacak şekilde ayrılan bir alan” şeklinde tanımlanan “yerleşim alanı içindeki sessiz alan”lar yönetmelik kapsamında “parklar veya yerleşim bölgelerindeki diğer sessiz alanlar” olarak ifadelendirilmiştir [2]. Hızlı tempoda akan ve uzun çalışma saatleriyle geçen kent yaşamında, kentsel bölgelerdeki parklar gibi sessiz alanlarda vakit geçirmek insanların yoğun ve stresli kent yaşamından uzaklaşarak, zihinsel yenilenme sağlamasına imkan sunması açısından önem taşımaktadır [3]. Ancak özellikle ticari işlevlerin yoğun olduğu, sıkışık ve kalabalık kent dokularında insanlara dinlenme ve rahatlama olanağı sunan geniş park alanlarının bulunması her zaman mümkün olamamaktadır. Bu durum araştırmacıları yoğun ticari ve turistik faaliyetlerle kalabalıklaşan alanlarda parklara ve alternatif sessiz alan arayışına itmiştir. Bu bağlamda İtalya’nın Napoli kentinde tarihi ve turistik bölgede yer alan tarihi avluların sessiz alan olarak değerlendirilme potansiyelini araştıran çalışmalar yürütülmüştür [4,5,6]. Literatürdeki konuya özgü araştırmalarda avlu ve bahçelerin sadece binalardan bakıldığında görsel açıdan estetik bir görüş sunmadığı, aynı zamanda çevresel gürültüden daha düşük bir düzeye sahip bir alan olarak dinlenmek, rahatlamak, kitap okumak, güneşlenmek, çevredeki insanlarla temas kurmak gibi etkinlikler için kullanılabilir alanlar olarak değerlendirilebilir alanlar olduğuna dair önemli bulgular elde edilmiştir [7]. Bu bağlamda bu çalışmada, İstanbul Tarihi Yarımada Hanlar Bölgesi’ndeki han avluları ve cami bahçeleri, sessiz alan olma potansiyeli ve kullanıcılar (bölgede çalışanlar ve ziyaretçiler) için dinlenme ve rahatlama amacıyla kullanılabilirliği açısından analiz edilmiştir:

2. YÖNTEM

Bu çalışmada İstanbul Tarihi Yarımada Hanlar Bölgesi'nde bulunan sessiz alan olarak değerlendirilme ve kullanılma potansiyeline sahip olan alanlar (tarihi han avluları ve cami bahçeleri) alan çalışmalarında gerçekleştirilen akustik ölçüm ve anket çalışması yapılarak incelenmiştir.

2.1. Alan seçimi ve özellikleri

Hanlar Bölgesi, İstanbul'da geçmişten günümüze tarihi ve ticari kimliğini koruyan bir alandır. Ticari işlevi dolayısıyla bölgede birçok tarihi çarşı ile avlulu ve avlusuz han binaları bulunmaktadır. Osmanlı Dönemi'nde bölgeye ayrıca Yeni Camii, Beyazıt Camii, Nuruosmaniye Camii gibi önemli camiler inşa edilmiştir. Toptan ve perakende satış birimleri ve depolama alanlarıyla ticari işlevini sürdüren bölge, tarihi dokusuyla da yerli ve yabancı turistlerin yoğun ilgisini çekmektedir. Eğimli ve organik sokak dokusuna sahip alan, yapılan yayalaştırma çalışmaları ile yoğun yaya trafiğine ev sahipliği yapmaktadır. Bölgede sessiz alan özelliği gösterebilecek kentsel park bulunmama ile birlikte han avluları ve cami bahçeleri, etrafını çevreleyen duvar ve binalar sayesinde dış ortama karşı korunaklı bir sessiz alan oluşturma potansiyelini barındırmaktadır. Bu bağlamda avlu içi perakende ticaretle kalabalıklaşmamış, avlu genişliği 500 m² den büyük olan, içerisinde oturup dinlenme imkanı sunan han avluları (1.Balkapanı Han, 2.Büyük Valide Han, 3.Büyük Yeni Han, 4. Vezir Han) ile alanda bulunan cami bahçeleri (5.Nuruosmaniye Camii, 6.Gazi Atik Ali Paşa Camii, 7.Çorlulu Ali Paşa Camii) alan çalışmaları için seçilmiştir (Şekil 1). Alan çalışması sırasında restorasyonda olan Yeni Camii, Beyazıt Camii ve Mahmutpaşa Camii bahçeleri çalışma kapsamı dışında tutulmuştur.



Şekil 1. İstanbul Tarihi Yarımada'da Hanlar Bölgesi'nin konumu (solda) ve alan çalışması için seçilen potansiyel sessiz alanların konumu (1.Balkapanı Han, 2.Büyük Valide Han, 3.Büyük Yeni Han, 4. Vezir Han, 5.Nuruosmaniye Camii, 6.Gazi Atik Ali Paşa Camii, 7.Çorlulu Ali Paşa Camii)



Balkapanı Han'ın giriş kapısı yoğun bir perakende ticaret aksı olan yayalaştırılmış yola açılmaktadır. Dolayısıyla dış ortam sesleri; ticaret (alışveriş sesi, müzik yayını) ve ulaşım (adım sesi, el arabası ve motosiklet) kaynaklı sesler yanı sıra insan seslerinden oluşmaktadır. Binanın avlusunda ticaret birimleri (çoğunluğu toptan olmak üzere), yeme içme birimleri, üretim atölyeleri bulunmaktadır. Avlunun ortasında küçük bir mescit ve içine dikilmiş birkaç küçük ağaç fidanı, sarmaşık ve saksıda yetiştirilen bitkiler mevcuttur (Şekil 2). Avlu içi ses ortamı, ticaret (alışveriş sesleri, tekerlekli el arabası sesi, yeme içme sesleri) ve insan eylemlerinden kaynaklanmaktadır.

Büyük Valide Han'ın giriş kapısı Balkapanı Han'da olduğu gibi yoğun bir perakende ticaret aksı olan yayalaştırılmış yola açılmaktadır ve dolayısıyla dış ortam ses kaynakları benzerdir. Avlu içine belli saatlerde araç giriş çıkışı yapılabilmektedir. Binanın avlusuna hizmet veren (çoğunluğu toptan olmak üzere) ticaret birimleri ve depolar bulunmaktadır. Avlunun ortasında bir mescit bulunmaktadır ve avluya çok yıllık ağaçlar ile saksı bitkileri ve çiçekler dikilmiştir (Şekil 2). Avlu içi ses ortamı ticaret sesleri (toptan alışveriş sesleri, tekerlekli el arabası sesi, sohbet sesleri), doğal sesler (kuş sesleri) ve dini sesler (ezan sesi) oluşturmaktadır.

Büyük Yeni Han'ın ana giriş kapısı Balkapanı Han ve Büyük Valide Han ile aynı aksta yer almaktadır ve dolayısıyla dış ortam ses kaynakları diğer iki han ile benzemektedir. Avlu içine belli saatlerde araç giriş çıkışı yapılabilmektedir. Binanın avlusuna hizmet veren (çoğunluğu toptan olmak üzere) ticaret birimleri, üretim atölyeleri ve depolar bulunmaktadır. Üst katlardaki kapalı mekanların çoğu boştur. Avlu içerisinde büyük ağaçlar, saksıda yetiştirilen bitki ve çiçekler ile çeşme bulunmaktadır (Şekil 2). Avlu içi ses kaynakları, ticaret (toptan alışveriş sesleri, sohbet sesleri, tekerlekli el arabası sesi), üretim sesleri (çekiç sesi, ambalajlama sesi gibi), doğal sesler (kuş sesleri ve su sesi) ile ezan sesinden oluşmaktadır.

Vezir Han'ın giriş kapısı ana ticaret ve turizm aksı olan Divanyolu'nu Kapalı Çarşı'ya bağlayan araç trafiğine açık yola açılmaktadır. Dolayısıyla dış ses ortamı, ulaşım sesleri (araç sesi, korna ve siren sesleri, tramvay ve motosiklet sesleri), ticareten kaynaklanan seslerden (alışveriş sesi, müzik yayını, tekerlekli el arabası sesi) oluşmaktadır. Giriş kapısı araçların geçişine elverişlidir, bu durum avlunun otopark olarak kullanılmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle alan kullanımına o bölgede çalışanlarla birlikte otopark kullanıcıları da katılmaktadır. Binanın avlusuna hizmet veren (çoğunluğu toptan olmak üzere) ticaret birimleri, üretim atölyeleri ve depolar bulunmaktadır. Ayrıca avlu içerisinde birkaç tane çok yıllık ağaç bulunmaktadır (Şekil 2). Avlu içi ses kaynakları, ticaret (alışveriş sesi, el arabası sesi), üretim (çekiç, makine, klima

fanı, kompresör sesleri vb.), otopark kullanımını (araç ve korna sesleri), ve doğal seslerden (kuş ve rüzgar sesleri) oluşmaktadır.



Şekil 2. Han avlularının içinden görüntüleri (soldan sağa sırasıyla Balkapanı Han, Büyük Valide Han, Büyük Yeni Han, Vezir Han)

Nuruosmaniye Camii'nin giriş kapısından biri Vezir Han ile aynı caddeye açılırken diğeri, yayalaştırılmış olan Nuruosmaniye Caddesi'ne açılmaktadır. Nuruosmaniye Camii'nin ön bahçesi Kapalı Çarşı'ya geçişin sağlandığı aksı tanımladığı için bu kısımda sürekli bir insan yoğunluğu oluşmaktadır. Ancak arka bahçe ön bahçeye göre daha sakin bir ortam sunmaktadır (Şekil 3). Bahçe içerisinde yetişmiş ağaçlarla birlikte çalı tipi bitkiler yanı sıra ibadet amaçlı abdest almak için çok sayıda çeşme bulunmaktadır. Bahçeye yapılan toplu turist ziyaretleri nedeniyle insan seslerinin baskın olduğu bahçede kuş ve rüzgar sesi gibi doğal sesler, dini sesler (ezan sesi) ile siren ve korna sesleri de duyulmaktadır.

Gazi Atik Ali Paşa Camii'nin ön girişi Divanyolu'na açılmaktadır. Tramvay hattının geçtiği yayalaştırılmış yol, yoğun ticari ve turistik faaliyetler nedeniyle kalabalık bir akstır. Bu nedenle dış ses ortam, ulaşım sesleri (tramvay ve motosiklet sesleri, siren sesi), ticaretten kaynaklanan seslerden (alışveriş sesi, müzik yayını) oluşmaktadır. Bahçe içerisinde birkaç tane yetişmiş ağaç ve ticaret birimleri bulunmaktadır (Şekil 3). Alan içerisinde insan sesleriyle birlikte doğal sesler baskın iken siren, dini sesler (ezan sesi) ve tramvay zili gibi sesler de duyulmaktadır.

Çorlulu Ali Paşa Camii'nin ön girişi Gazi Atik Ali Paşa Camii ile aynı aksta bulunmaktadır ve dolayısıyla alan dışı ses ortam benzerlik göstermektedir. Bahçe içerisinde birkaç tane yetişmiş ağaç ve turistlere hitaben genellikle halı-kilim satışı yapılan ticaret birimleri bulunmaktadır (Şekil 3). Alan içi ses

ortam da yine Gazi Atik Ali Paşa Camii ile benzerlik göstermekte olup, insan sesleriyle birlikte doğal sesler baskın iken dini sesler (ezan sesi) ve siren, tramvay zili gibi sesler de duyulmaktadır.



Şekil 3. Cami bahçelerinin içinden görüntüler (soldan sağa sırasıyla Nuruosmaniye Camii, Gazi Atik Ali Paşa Camii, Çorlulu Ali Paşa Camii)

2.2. Akustik ölçüm

Alanda yapılan ölçümler, avlu içindeki ses basınç düzeylerini ve avlu içi ile dışı arasındaki ses basınç düzeyi farklarını belirlemek amacıyla daha önce Maffei, Masullo ve Oliviero tarafından tarihi alanlarda sessiz alanları belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada kullanılan yöntem doğrultusunda gerçekleştirilmiştir [4].

2018 yılı, sonbaharda, alan kullanım yoğunluğunun öğleden sonra arttığı göz önüne alınarak, 14.00-17.00 saatleri arasında gerçekleştirilen ölçüm ve ses kayıtları, avlu ve bahçe içlerinde noktasal olarak (her noktada min 3 dk), avlu ve bahçelerin dışında ise ses yürüyüşü yöntemiyle [8] yapılmıştır.

Avlu veya bahçe içerisinde kaç noktadan ölçüm alınacağı, alanın büyüklüğü, işlevler ve ses kaynaklarının durumuna göre alanda yapılan gözlemler sonucu belirlenmiştir. Alan dışında yapılan ölçümler ise alana ulaşmak için takip edilen yol boyunca, alanın giriş kapısından her iki yöne gidiş (A1, B1) ve geliş olmak üzere (A2 ve B2) takip edilen 2 rotada (her biri için min. 3 dk.) eşzamanlı akustik ölçüm ve ses kayıtları yapılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). Ölçüm ve kayıtlar için 2270 Brüel Kjaer iki kanallı ses ölçüm cihazı kullanılırken, elde edilen akustik veriler Pulse Reflex 20.0.0 programında analiz edilmiştir.



Şekil 4. Balkapanı Hanı için avlu içi ölçüm noktaları ve avlu dışı ölçüm yapılan ses yürüyüşü rotalarının harita üzerinde gösterimi

2.3. Anket

Bu çalışmada avluların sessiz alan olma potansiyelinin öznel olarak nasıl değerlendirildiğini anlamak amacıyla anket çalışmaları yapılmıştır. Anket soruları, genel kişisel bilgiler, alanların öznel olarak nasıl tanımlandığını anlamak üzere sıfat çiftlerinden yararlanılarak oluşturulan [9] anlamsal fark testleri (yapay-doğal, sesli-sessiz, rahatsız edici-memnun edici, stres yaratıcı-dinlendirici, heyecandırıcı-yatıştırıcı, sıkıcı-ilgi çekici, tercih etmem-tercih ederim, açık-sarmalayıcı, ahenksiz-ahenkli, sert-yumuşak, keskin değil-keskin, kalabalık-tenha, düzensiz-düzenli, uzak plan ses-yakın plan ses, devamsız-devamlı, monoton-değişken, terk edilmiş-yaşayan, durgun-neşeli, iç karartıcı-çoşturucu, zayıf- güçlü, yavaş-hızlı, boğucu-ferah, keskin-donuk, ağır-hafif, pürüzlü-pürüssüz, karışık-ayrıt edilebilir, alışılmış- farklı, sakin- hareketli) ve ses türüne (teknolojik sesler, insan sesleri, doğal sesler) göre rahatsızlık durumunu sorgulamaya yönelik olarak hazırlanmıştır. Anketler ilgili alanlarda çoğunluğu çalışanlar, ibadet için gelen kullanıcılar ve turistlerden oluşan katılımcı grubuna akustik ölçümler ile eş zamanlı olarak uygulanmıştır.

3. BULGULAR ve DEĞERLENDİRME

3.1. Akustik ölçüm sonuçları ve değerlendirme

Avrupa'da yapılan çalışmalarda direktifte bahsedilen sınır değerler için çeşitli tavsiyeler (Lgündüz 45-55 dB) yapılırken [10], ülkemizde yapılan mevzuat uygulamalarında (eylem planlarında) genellikle Lgündüz 55 dB'in altındaki alanlar, "sessiz alan" olarak kabul edilmiştir. Bununla birlikte literatürde bulunan çeşitli çalışmalar, sessizlik algısının arka plan ses düzeyleriyle (L90) yakın ilişkili olduğunu göstermektedir [11,12].

Alanların içinde ölçülen arka plan ses düzeyleri (background sound-LA90) Vezirhan'da 59 dB, Büyük Yeni Han avlusu ve Nuruosmaniye Camii bahçelerinde 55 dBA iken, diğer alanlarda 55 dB'in altındadır (46 ile 50 dB arasında). Ön plan ses düzeyleri (foreground sound-LA10) tüm alanlarda 53 ile 69 dB arasında değişirken, A ağırlıklı eşdeğer ses basınç düzeyi (LAeq) 49 dB'den 63 dB'e kadar değişmektedir (Tablo1). Alanların dışında (çevresinde) yapılan ölçme sonuçları, tüm alanlar için benzerlik göstermektedir. Arka plan ses düzeyleri (LA90) 60 ile 62 dB arasında, ön plan ses düzeyleri 73 ile 78 dB arasında değişirken; A ağırlıklı eşdeğer ses basınç düzeyi (LAeq) 63 dB'den 68 dB'e kadar değişmektedir (Tablo1). Alan dışı ve içlerinde ölçülen düzeylerin farkları, ön plan sesleri için daha yüksek çıkarken (10 dB ile 21 dB arası); LA90 (2 dB ile 14 dB arası) ile LAeq düzeylerinin farkları (2 dB ile 16 dB arası) benzerlik göstermektedir. Alanlara göre alan dışı ve içi arasındaki düzey farkı değerlerine bakıldığında; Çorlulu Ali Paşa Camii, Gazi Gazi Atik Ali Paşa Camii ve Balkapanı Han'ında alan dışı ve içi arasındaki düzey farkı değerlerinin diğer alanlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir (Tablo1).

Tablo 1. Çalışma alanlarının dışında (çevresinde) ve içinde ölçülen ses basınç düzeyleri(dBA)

ÖLÇÜM YERİ	ALAN İÇİ			ALAN DIŞI (ÇEVRESİ)			DIŞ-İÇ FARK		
	Leq	L10	L90	Leq	L10	L90	Δ Leq	Δ L10	Δ L90
1. Balkapanı Han	52,06	69,63	50,93	68,81	73,29	62,33	16,75	13,66	11,40
2. Büyük Valide Han	60,53	62,77	50,93	66,13	73,33	60,77	5,6	10,56	9,84
3. Büyük Yeni Han	60,54	62,66	55,43	67,54	73,64	61,96	7	10,98	6,53
4. Vezir Han	62,29	65,59	59,58	64,43	78,51	62,35	2,14	12,92	2,77
5. Nuruosmaniye Camii	63,97	61,57	55,43	66,91	77,025	62,77	2,94	15,46	7,35
6. Çorlulu Ali Paşa Camii	49,43	53,85	46,25	64,46	75,36	60,66	15,04	21,51	14,42
7. Gazi Atik Ali Paşa Camii	51,63	60,07	48,81	63,53	75,78	62,09	11,90	15,71	13,29

Düzeğe göre değerlendirme: Araç trafiğinin yoğun olmadığı ancak kalabalık yaya hareketlerinin olduğu bir bölge olan Hanlar Bölgesi'nde alanların dışında birbirine yaklaşık düzeylerin görülmesi beklenen bir durumdur; ancak alanların içinde ses düzeylerinde 10 dB'e yakın düzey farklılıkları görülmektedir (en düşük 49 dB, en yüksek 63 dB). Alanların içlerindeki düzeylerin yüksek çıkmasının sebebi, yoğunlukla alan içindeki ses kaynaklarının sayısının, çeşitliliğinin ve düzeyinin fazla olmasıdır. Nuruosmaniye Camii'nde yoğun yaya sirkülasyonunun olması ve toplu turist ziyaretleri (kullanıcı sayısı) etkili olurken; Vezir Han'da alan içerisindeki klima fanı, kompresör sesleri ile araç

sesleri etkili olmaktadır. Büyük Valide Han'da ve Büyük Yeni Han'da ticaret ve üretim sesleri ses düzeyini arttıran başlıca seslerdir. Balkapanı Han'da ses düzeyi alan içerisindeki mescit kullanımı sırasında insan yoğunluğunun artmasından dolayı yükselirken, mescit kullanımının olmadığı sırada alınan düzey ölçüm sonuçları (Leq:52 dB, L90:50 dB) daha düşüktür.

Alan dışı ve içindeki düzey farkına göre değerlendirme: Tüm alanlarda dış ortam ile avlu veya bahçe arasında bina-duvar gibi engeller bulunmasından dolayı alanların içindeki ses ortam, alan dışındaki gürültü kaynaklarına karşı korunaklıdır. Dış ve iç ortam arasındaki farkı arttıran sebep, yine iç ortamdaki ses düzeyinin düşük olması iken; azaltan sebep ise iç ortamdaki ses düzeyinin alandaki işlevlerden dolayı yüksek olmasıdır.

3.2. Anket sonuçları ve değerlendirme

Her alanda 10'ar anket olmak üzere toplam 70 anket gerçekleştirilmiştir. Ankete katılan kullanıcılarının yaş ortalaması 42 iken, çoğunluğu erkek kullanıcılar oluşturmaktadır (%74). Han avlularında ve cami bahçelerinde akustik ölçümlerle eş zamanlı olarak gerçekleştirilen anketler sonucunda, han avlularının daha çok o bölgede çalışan kişiler tarafından kullanıldığı ve hanlara neredeyse her gün geldikleri; cami bahçelerinin ise bölgede çalışanlarla birlikte ibadet yapmak için ve turist olarak ziyaret etmeye gelenlerin oluşturduğu tespit edilmiştir.

Anketteki anlamsal fark testi sonuçlarına göre tüm avlular ve bahçeler yüksek oranda "sakin" (Vezir Han ve Nurusmaniye Camii hariç- %71 ile %85 arasında) ve "rahatlatıcı" (Vezir Han ve Nurusmaniye Camii hariç - %86 ile %94 arasında) olarak değerlendirilmiştir. Vezir Han'ın avlusu %56 oranında "sakin", %28 oranında "dinlendirici" bulunurken; Nuruosmaniye Camii bahçesi %45 oranında "sakin", %32 oranında "dinlendirici" bulunmuştur. Bu durum üzerinde Nuruosmaniye Camii'de kullanıcı sayısının fazla olması etkili olurken, Vezir Han'da teknolojik seslerin yoğun bir şekilde duyulması etkili olmuştur.

Bu durum üzerinde alan içi düzey ve ses kaynaklarının türü etkili olmuştur. Çünkü alan içindeki ses kaynaklarından çıkan seslerin bazıları (doğal sesler) "dinlendirici" bulunurken, bazıları (teknolojik sesler) "rahatsız edici" olarak değerlendirilmiştir. Alan içlerinde "dinlendirici" olarak değerlendirilen sesler, kuş sesi, rüzgar sesi gibi **doğal sesler** ve ezan sesi gibi **sembol sesler** olmuştur. Sembol sesler, tüm alanlarda mevcutken, doğal sesler ağaç ve bitkilerin daha yoğun olduğu Büyük Valide Han ve cami bahçelerinde daha belirgin işitilmektedir. "Rahatsız edici" bulunan teknolojik sesler (makine sesleri, fan sesleri ve araç sesi), Vezir Han'daki işlevler ve avlu kullanımı nedeniyle ortaya çıkarken; Nuruosmaniye Camii'nde ise "rahatsız edici" bulunan insan sesleri (sohbet etme), insanların yoğun bir şekilde alanda bulunmasından kaynaklanmaktadır.

4. SONUÇ

Tarihi kent merkezlerinde özellikle ticari ve turistik faaliyetlerden dolayı yoğunlaşan bölgelerde bulunan binaların kamusal avluları ve bahçeleri, alan içi ses düzeyi 55 dB'in altında ya da üzerinde olsa bile avlu ve bahçelerin etrafındaki duvarların alan içi ve dışı arasında gürültü engeli görevi görmesiyle çevresine göre daha düşük düzeyli ses ortama sahip olması sayesinde “sessiz alan” olma potansiyeline sahip olabilmektedir. Buna ek olarak, düzey, düzey farkı ve ses kaynaklarının türü gibi alana ait akustik özellikler ile birlikte alandaki işlevler, engel durumu, bakım, kullanıcı sayısı ve yeşil doku gibi özelliklerin de sessiz alan olma durumu ve alanların bu amaçla kullanılabilirliği üzerinde etkili olduğu ortaya çıkmıştır. Bu doğrultuda; avlu ve bahçelerde engel durumunun korunması ve/veya sağlanması, ticari işlevlerin -ticari birimlere sayıca sınırlılıklar getirilerek- azaltılması, bu sayede insan yoğunluğunun -kısmen- kontrol edilmesi, yeşil dokunun arttırılması, alan içi ses kaynaklarının kontrol edilerek mekanik sesler gibi “rahatsız edici” seslerin alandan -mümkünse- kaldırılması ve/veya düzeyinin azaltılması ve/veya tercih edilen sesler (su sesi vb) ile maskelenmesi, alanlarda temizlik ve bakıma özen gösterilmesi gibi düzenlemeler yapılması önerilmektedir. Çalışma alanlarında yapılan akustik ölçüm ve anket sonuçlarına göre yukarıda yapılan öneriler doğrultusunda düzenlemelerin yapılması, han avluları ve cami bahçelerinin Hanlar Bölgesi'nde ve benzer kentsel alanlarda dinlenme ve rahatlama imkanı sunan “sessiz açlık alanlar” olarak da kullanılabilirliğini arttıracaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Eskişehir Teknik Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından kabul edilen 20DRP008 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

5. KAYNAKLAR

- [1] Directive, E.U. Directive 2002/49/EC relating to the assessment and management of environmental noise. Off. J. Eur. Commun. 2002, 189, 12-25.
- [2] Yönetmelik, Çevresel Gürültünün Değerlendirmesi ve Yönetimi Yönetmeliği 2005. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=14012&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>
- [3] Kaplan, S. The restorative benefits of nature: Toward an integrative framework. *Journal of Environmental Psychology*, 15(3), 169–182,1995.
- [4] Maffei, L., Masullo, M., Oliviero, A., (2017), “Quiet areas inside historical city centers”, Proc INTER-NOISE 2017; 27-30 August 2016; Hong Kong, China 2017.
- [5] Maffei, L.; Toma, R.A.; Masullo, M. Objective and subjective assessment of pockets of quiet inside historical urban areas. In Proceedings of the INTER-NOISE 2018 Impact of Noise Control Engineering, Chicago, IL, USA, 26-29 August 2018.

- [6] Masullo, Massimiliano; Castanò, Francesca; Toma, Roxana Adina; Maffei, Luigi. Historical Cloisters and Courtyards as Quiet Areas Sustainability; Basel Vol. 12, Iss. 7, 2020: 2887. DOI:10.3390/su12072887, 2020.
- [7] Gidlöf-Gunnarsson, A. ve Öhrström, E. Attractive “Quiet” Courtyards: A Potential Modifier of Urban Residents’ Responses to Road Traffic Noise? International Journal of Environmental Research and Public Health vol 7, no 9, 3359-3375, 2010.
- [8] ISO (International Organization for Standardization). ISO/TS12913-2. Acoustics–Soundscape–Part 2: Data Collection and Reporting Requirements; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2018.
- [9] Özcevik A. İşitsel Peyzaj –Soundscape’ Kavramı ile Kentsel Akustik Konforun İrdelenmesinde Yeni Bir Yaklaşım, Doktora Tezi, İstanbul, Türkiye, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
- [10] Good practice guide on quiet areas, European Environment Agency, EEA Technical report No 4/2014.
- [11] D. Botteldooren, S. Decloedt, J. Bruyneel, S. Pottie, ‘Characterisation of quiet areas: subjective evaluation and sound level indices’, proceedings of the 137th Meeting of the ASA and the 2nd Forum Acusticum, integrating the 25th DAGA Conference, Berlin, Germany, Mar. 1999.
- [12] D. Botteldooren, Bert De Coensel, Quality Assessment Of Quiet Areas: A Multicriteria Approach, Euronoise 2006, Tampere, Finland, 30May-1June, 2006.

KONUT BALKONLARININ MİMARİ VE AKUSTİK ÖZELLİKLERİNİN KULLANICILARININ AKUSTİK KONFORUNA KATKILARI

Hilal Üstüner¹

Gazi Üniversitesi, Maltepe, Ankara, Türkiye
e-posta: hil.ustuner@yahoo.com.tr

Füsun Demirel²

Gazi Üniversitesi, Maltepe, Ankara, Türkiye
e-posta: fusund@gazi.edu.tr

ÖZET

Kentsel alanlardaki gürültü kirliliği ciddi fiziksel ve psikolojik sağlık etkileri ile bağlantısı bilinen en büyük çevresel sorunlardandır. Bu çalışmada, özellikle konut yapılarında yaygın kullanılan, balkon elemanlarının çevresel gürültünün etkisini azaltarak yapılı çevrenin akustik kalitesini iyileştirmeye katkısı incelenmiş, yönetmelikler ile standartlar tarafından belirlenen mimari ve akustik tasarım prensipleri üzerine yoğunlaşmıştır. Bildiri kapsamında, mevcut kaynak ve alıcı koşullarının doğru tespit edildiği durumlarda uygun balkon geometrisi, malzeme özellikleri ve yerleşimleri ile kullanıcılarının akustik konforunu arttırmaya nasıl katkıda bulunacağı araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda yeni bina cephelerinin tasarımında veya mevcut olanların yenilenmesinde kritik öneme sahip uygulamalar ayrıntılandırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çevresel gürültü, konut balkonları, akustik konfor.

CONTRIBUTION OF THE ARCHITECTURAL AND ACOUSTIC FEATURES OF RESIDENTIAL BALCONIES TO THE ACOUSTIC COMFORT OF THE INHABITANTS

ABSTRACT

Noise pollution in urban areas is one of the biggest environmental problems known to be associated with serious physical and psychological health effects. In this study, the contribution of balcony elements, which are widely used in residential buildings, to improving the acoustic quality of the built environment by reducing the effect of environmental noise, has been examined and focused on the architectural and acoustic design principles determined by regulations and standards. In this paper, it has been investigated how the appropriate balcony geometry, material features, and proper placements of these materials can contribute to increasing the acoustic comfort of the users when the current source and receiver conditions are determined correctly. In line with the results obtained, critical applications in the design of new building facades or in the renovation of existing ones were detailed.

Keywords: *Environmental noise, residential balconies, acoustic comfort.*



1. GİRİŞ

Çevresel gürültü insan faaliyetlerinin yarattığı, bireylerin yaşam kalitesine zarar veren, istenmeyen zararlı dış ortam sesleridir [1]. Ekonomik, sağlık, eğitim gibi sebepler ile kentleşmenin artması ve nüfusun genişlemesi, yeni yerleşim alanları yaratmak ihtiyacı, plansız yapılaşmayı beraberinde getirmiştir. Gürültüye karşı hassasiyet seviyeleri farklı olan yapı tiplerinin büyük ölçekli bir kentsel planlama yapılmadan aynı bölgelerde kurgulanması, gürültü sorununu daha da büyütülmektedir. Büyük ve yoğun ana yolları, kent içi raylı ulaşım sistemleri ve sürekli inşaat gürültüsünün arasında kalan konutlar, çevresel gürültüden en çok etkilenen yapılardandır. Gürültüye karşı çok hassas olan konut yapılarının sakinlerinde, gürültünün zararlı etkilerinin azaltılması için akustik kalite seviyelerini arttırmayı hedefleyen çalışmalar önem kazanmaktadır. Bu doğrultuda bildiri kapsamında, konut yapılarında yaygın kullanılan balkon elemanlarının öncelikle balkon içi alanı olmakla beraber dış çevresi ve komşu olduğu iç mekanlarla aralarındaki akustik kaliteyi iyileştirmede, gürültü bariyeri olarak potansiyeli araştırılmıştır. Konut balkonlarının, yapılı çevrenin koşullarına (topoğrafya, kaynak tipi, yapılı çevrede maruz kalınan gürültü seviyesi, kaynak ve alıcının birbirine göre konumu gibi) uygun olarak tasarlanmasıyla kullanıcılarının işitsel konforunun arttırabileceği savunulmaktadır.

2. YÖNTEM

Bildiri kapsamında akademik çalışmalar, ulusal/uluslararası yasal düzenlemeler ve standartlar konut balkonları özelinde incelenmiş ve balkonların tasarım kriterleri belirlenmiştir. Belirlenen bu kriterlerin test edilmesi için yoğun ulaşım yollarıyla çevreli yüksek katlı bir konut yapısı örneklem olarak seçilmiş, yapının çevresinde ve örneklem olarak belirlenen bir dairede maruz kalınan gürültü seviyesi ISO 1996-2 standardına uygun olarak ölçülerek elde edilen veriler analiz edilmiştir. Bir sonraki aşamada 3 boyutlu modellenen örneklem alanı, Odeon 15.16 Combined simülasyon programında yerinde ölçüm verileriyle uyumlu hale getirilmiş ve örnek dairedeki mevcut balkon tasarımının akustik performans analizi yapılmıştır. Son aşamada ise balkon alanında akustik konforun iyileştirilmesi için belirlenen tasarım kriterleri doğrultusunda öneriler geliştirilmiş ve Odeon programında simüle edilmiştir. Balkon tasarım önerilerinin performans analizi, önerilerin ses basınç seviyesinde (SPL) sağladığı azalmalar karşılaştırılarak yapılmıştır.

3. ÇEVRESEL GÜRÜLTÜ KARŞISINDA BALKONLARIN AKUSTİK PERFORMANSINI ETKİLEYEN TASARIM KRİTERLERİ

Balkonların yapılı çevre ile binaların iç mekanları arasındaki bölgede kullanıcısına özel bir rekreasyon alanı sunarlar ve iklim özellikleri karşısında tampon bölge işlevi gösterirler. Bunların yanı sıra, cephedeki kapı ve pencere gibi gürültüye toleransı düşük elemanlara kaynaktan doğrudan gelebilecek ses dalgalarını engelleyerek akustik bariyer olarak performans göstermesi uzun yıllardır çalışılan önemli bir araştırma konusudur [2]. Balkonlar, döşeme, tavan, bariyer (parapet ve/veya korkuluk) elemanlarıyla beraber bütün bir sistemdir ve bu elemanların pek çok farklı kombinasyonu ile geniş tasarım seçeneği sunar. Balkonların, geometrileri ve ses dalgalarının bu geometrilerle bulunduğu davranışları, çevresel gürültüye karşı akustik performansını etkileyen bir kriterdir [3]–[6]. Maruz kalınan gürültü kaynaklarının tipi ve kaynak ile alıcının birbirlerine göre konumları balkonun akustik kalitesini etkileyen diğer önemli kriterlerdir [7]–[9]. Ayrıca balkon elemanlarında tercih edilecek malzemeler, belirlenen kritik yüzeylerine yutucu malzeme ve özel tasarım elemanlar eklenmesi de balkonların akustik verimlilikleri önemli seviyede arttırılabilmektedir [10]–[14]. Detaylı literatür araştırması sonucunda balkonların akustik performansını belirleyen faktörler şu şekilde sıralanabilir:

- Ses dalgalarının balkon yüzeylerindeki davranışı,
- gürültü kaynağının türü ve konumu,
- balkon alanındaki alıcının konumu ve gürültünün alıcıya geliş açısı,
- balkon geometrisi ve boyutları,
- balkon elemanlarında kullanılan malzemeler.

4. YERİNDE ÖLÇÜM VE SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

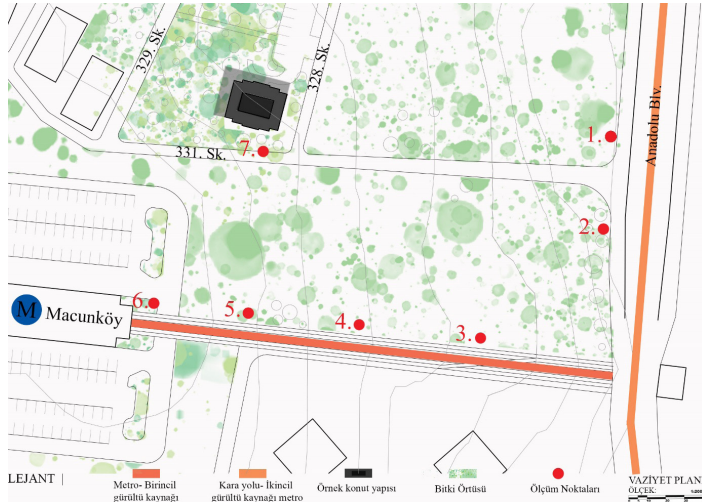
Bu araştırma kapsamında, ana gürültü kaynağı ön cephesindeki metro gürültüsü olan ve doğu/yan cephesinde de yoğun kara yolu gürültüsünün hâkim olduğu bir konut binasının örneklem olarak seçilen bir dairede ve çevresinde belirlenen noktalarda yerinde ölçüm yöntemiyle gürültü seviyeleri tespit edilmiştir. Bunlara ilave olarak, balkon hacminde akustik koşulların iyileştirilmesi amacıyla farklı balkon geometrileri ve ses yutucu malzemenin farklı yüzeylere konumlandırılması ile öneriler geliştirilmiştir.

4.1. Örneklem alanındaki gürültü seviyelerinin tespiti

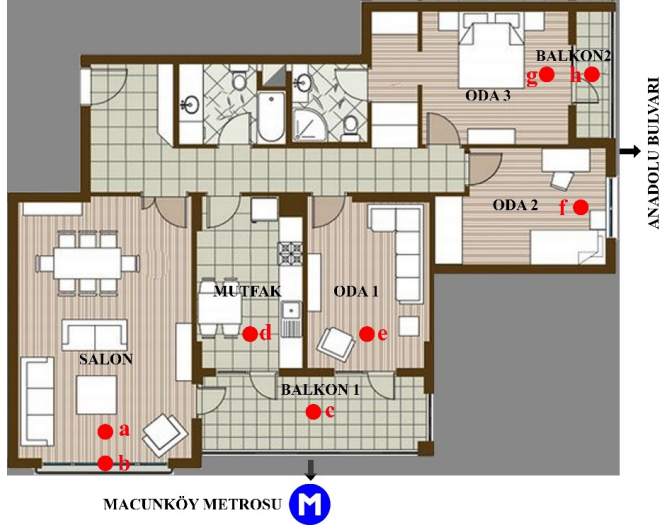
4.1.1. Mevcut durumun yerinde ölçüm yöntemiyle tespiti

Örneklem için seçilen site içerisindeki konut yapısı, Ankara'nın Yenimahalle ilçesinde yer almakta ve zemin kat dahil 15 kattan oluşmaktadır (Şekil 1). Kat yüksekliği 2,8 m ve bina yüksekliği ise yaklaşık 42 m'dir. Binada ölçümlerin yapıldığı örnek daire, 11. Katta ve ulaşım yollarını doğrudan karşılayan şekilde binanın köşesindedir (Şekil 2). Bina, Kızılay-Batıkent metro hattının Macunköy durağından yaklaşık 116 m uzaklıkta, rayların uzanışına göre paralel olarak konumlanmıştır. Arazi topografisinden kaynaklı olarak viyadük ayakları üzerine yerleştirilen 3 rayın olduğu metro, doğu-batı hattında çalışmaktadır (Şekil 3). Aynı zamanda bina, 8 şeritten oluşan yaklaşık 48 m genişliğindeki Anadolu Bulvarı'na 185 m mesafede ve paralel olarak konumlanmıştır. Ulaşım yolları ile bina arasında herhangi bir engel bulunmamaktadır.

Örnek dairede ve binanın çevresinde maruz kalınan gürültünün tespiti için, bu ulaşım yollarının belirlenen noktalarında ISO 1996-2-2017 (TS ISO 1996-2-2020) standardına uygun olarak Reten Electronic RS 104 ses seviyesi ölçer ile yavaş modda (langs) eşdeğer sürekli ses seviyesi (L_{Aeq}) ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Ölçüm saatleri, pandemi koşullarından dolayı metronun operasyon saatlerine (06:00-21:45) ve kara yolu trafiğinin yoğunluğuna göre belirlenmiştir. Ölçümlerde ses seviyesi ölçer zeminden 1,5 m yüksekliğinde, gürültü kaynaklarına doğru çevrilmiş şekilde konumlanmıştır.



Şekil 1. Örneklem alanının ve yerinde ölçüm noktalarının 1:200 ölçekli vaziyet planında temsili gösterimleri



Şekil 2. 11. Kat örnek daire planı; kırmızı ile işaretli alanlarda ölçümler yapılmıştır



Şekil 3. Viyadük türünde inşa edilen Macunköy metro hattı yerinde ölçüm görselleri

Tablo 1. Örneklem alanında yapılan ölçüm sonuçları (L_{gag})

	Ölçüm noktaları						
	1	2	3	4	5	6	7
L_{gag}	79,5	81,7	71,6	69,9	70,2	71,0	56,8

Tablo 2. Örnek dairede yapılan ölçüm sonuçları (L_{gag})

	Ölçüm noktaları								
	a	b	c	d	e	f	g	h	h*
L_{gag}	40,8	61,2	60,8	44,6	33,8	32,8	30,6	59,8	42,8

Örneklem alanındaki ve örnek dairede yerinde ölçüm yöntemiyle tespit edilen gürültü seviyeleri Tablo 1 ve 2’de verildiği şekildedir (h noktası*, balkon pencereleri kapalıyken balkonda alınan ölçüm değerleridir).

4.1.2. Mevcut durumun akustik simülasyon yöntemiyle tespiti

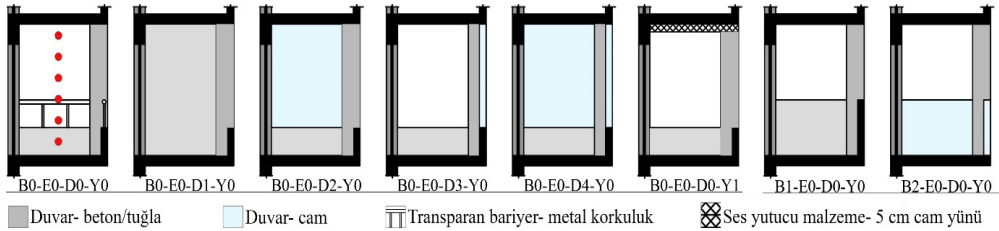
Örneklem alanının basitleştirilmiş 3 boyutlu modeli, topoğrafyaya dair bilgilerin de alındığı, Sketchup Pro 2021 programıyla hazırlanmış olup akustik simülasyonların yapılması için Odeon (v.15.16) programına aktarılmıştır. Örneklem alanındaki yüzeylerin malzemelerini temsil eden ve aynı zamanda, simülasyon sonucunda elde edilen değerlerin ölçülen değerlere göre kabul edilebilir bir uyumunu sağlayan ses yutuculuk ve saçılım katsayıları literatüre göre belirlenmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. Simülasyonda kullanılan malzemelerin yutuculuk ve saçılım katsayıları

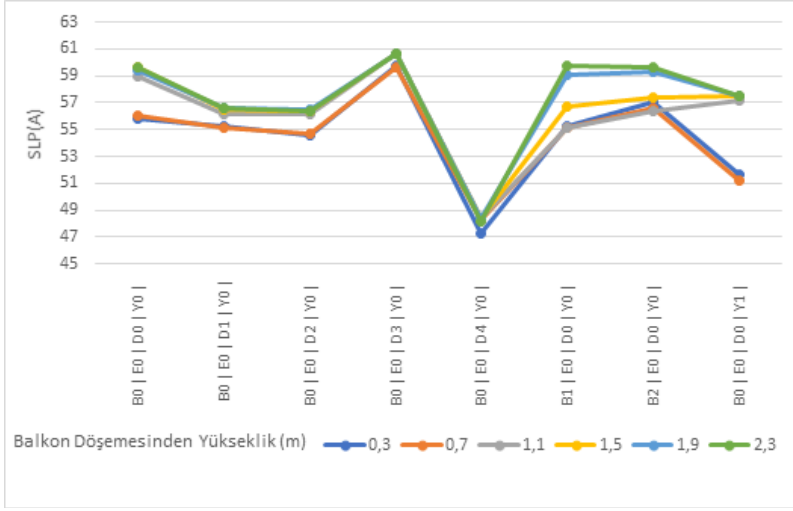
Malzemeler	Yutuculuk katsayısı	Saçılım katsayısı
Asfalt [15]	0,10	0,10
Kaldırım [16]	0,35	0,20
Toprak (%20 bitki örtüsü) [17]	0,85	0,00
Cam (pencereler ve cam parapet) [18]	0,05	0,00
	0,30	0,10

Model yerinde ölçüm sonuçlarına göre kalibre edildikten sonra balkon hacmindeki (c noktası) ses alanının da incelenmesi için yerinde ölçüm yapılan alıcı noktasına ilave olarak döşeme seviyesinden itibaren belirli aralıklar-

la alıcılar yerleştirilmiş ve balkonun akustik kalitesini arttırabilecek 7 farklı tasarım önerisi getirilmiştir (Şekil 4). Öneriler, 4 ayrı tasarım adımıyla sınıflandırılmıştır. (1) Balkon bariyerinde (B) yapılan değişikliklerde B0; 0,55 m beton parapet ve 0,55 m metal korkuluktan oluşan mevcut durumu temsil eder. Mevcut bariyer tasarımına alternatif olarak 1,10 m yüksekliğinde beton/tuğla (B1) ve cam (B2) parapetlerin balkon alanındaki gürültü azaltma etkileri de incelenmiştir. (2) Balkon bariyerinin döşemeye dik olduğu durum E0 (bariyer eğimi- E) olarak sınıflanır. Araştırmanın ileri aşamalarında eğimli tasarlanan bariyerlerin etkisi de incelenecektir. (3) Kaynakla alıcının birbirine göre konumuna uygun yerleştirilen ve döşemeden tavana kadar tasarlanan balkon duvarları (D) ile alıcıya doğrudan gelen ses dalgalarının engellenmesi hedeflenir. Beton/tuğla (D1) ve cam (D2) duvarların gürültüyü azaltma etkisi araştırılmıştır. (4) Balkon tavanından yansıyacak dalgaların etkisini azaltmak amacıyla yutucu malzeme (Y) eklenen tasarım adımı ise Y1 olarak sınıflandırılmıştır. Önerilen senaryolarla mevcut tasarımdaki (B0-E0-D0-Y0) balkon elemanlarında yapılacak tekil geometri ve malzeme değişikliklerinin balkon akustiğine etkisi karşılaştırılmıştır (Şekil 5).



Şekil 4. Mevcut balkon tasarımı ve önerilen geometri alternatiflerinin balkon kesitindeki gösterimi, (Kırmızı noktalar, simülasyonda ölçüm yapılan alıcı konumlarını temsil etmektedir.)



Şekil 5. Mevcut balkon tasarımı ve önerilen balkon tiplerinin karşılaştırılması

Mevcut balkon tasarımıyla balkon alanındaki ortalama SPL değeri 58 dB(A) ölçülürken arazi koşulları ve kaynak konumları dikkate alınarak önerilen balkon tasarımlarıyla gürültü seviyeleri 1 ile 11 dB(A) arasında azaltılmıştır.

5. SONUÇ

Yapılan çalışmada karşılaştırmalar sonucunda, örneklem olarak seçilen balkon için önerilen tasarımların balkon alanındaki gürültü seviyelerini önemli düzeyde azalttığı görülmüştür. İki ayrı çevresel gürültü kaynağına maruz kalan örneklem olarak seçilen balkonda, kaynakların alıcıya göre konumlandırılışının balkonda ölçülen gürültü seviyelerini önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmıştır. Önerilen tasarımlarda, ses enerjisinin izlediği yayılma yolunda yapılan değişikliklerle alıcıya doğrudan gelen sesin engellenmesi ve alıcı ile kaynak arasındaki görüş hattının azaltılarak balkon alanındaki gölge bölgenin artırılması sağlanmıştır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda tekil geometri değişikliklerinin bir arada denendiği tasarımlar ile balkonun akustik kalitesi daha fazla artırılabilirliği düşünülmektedir.

Araştırma sonucunda; çevresel ve yapısal gerekliliklerden taviz vermeden özellikle balkon geometrilerinde yapılacak minör değişiklikler ile balkon alanı ve iç mekân akustik kalitesini önemli ölçüde geliştirilebileceği gözlemlenmiştir. Balkonların bulunduğu bölge koşullarının ve gürültü kaynaklarının doğru tespit edilmesi, şartlara uygun tasarım aşamasında gösterilecek hassasiyet ile ekonomik olarak zorlayabilecek büyük sistem değişiklikleri olmadan önemli ölçüde gürültüden korunumun sağlanabileceği görülmüştür.

6. KAYNAKLAR

- [1] E. Murphy, E. A. King, ve H. J. Rice, “Estimating human exposure to transport noise in central Dublin, Ireland”, *Environment International*, c. 35, sayı 2, ss. 298–302, 2009.
- [2] E. A. Mohsen ve D. J. Oldham, “Traffic noise reduction due to the screening effect of balconies on a building façade”, *Applied Acoustics*, c. 10, sayı 4, ss. 243–257, 1977.
- [3] S. K. Tang, “Noise screening effects of balconies on a building facade”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, c. 118, sayı 1, ss. 213–221, 2005.
- [4] H. H. El Dien ve P. Woloszyn, “Prediction of the sound field into high-rise building facades due to its balcony ceiling form”, *Applied Acoustics*, c. 65, sayı 4, ss. 431–440, 2004.
- [5] H. H. El Dien ve P. Woloszyn, “The acoustical influence of balcony depth and parapet form: experiments and simulations”, *Applied Acoustics*, c. 66, sayı 5, ss. 533–551, 2005.
- [6] D. Naish, A. C. C. Tan, ve N. Demirbilek, “Predictions of road traffic noise on residential balconies using a specular & diffusion model”, *20th International Congress on Acoustics 2010, ICA 2010 - Incorporating Proceedings of the 2010 Annual Conference of the Australian Acoustical Society*, c. 3, ss. 2431–2437, 2010.
- [7] S. K. Tang, “Scale model study of balcony insertion losses on a building façade with non-parallel line sources”, *Applied Acoustics*, c. 71, sayı 10, ss. 947–954, 2010.
- [8] H. H. El Dien, “The influence of an inclined line source close to building facades with balconies”, *Noise Control Engineering Journal*, c. 60, sayı 4, ss. 363–373, 2012.
- [9] E. Badino, R. Manca, L. Shtrepi, C. Calleri, ve A. Astolfi, “Effect of façade shape and acoustic cladding on reduction of leisure noise levels in a street canyon”, *Building and Environment*, c. 157, sayı 4, ss. 242–256, 2019.
- [10] D. C. Hothersall, K. V. Horoshenkov, ve S. E. Mercy, “Numerical modelling of the sound field near a tall building with balconies near a road”, *Journal of Sound and Vibration*, c. 198, sayı 4, ss. 507–515, 1996.
- [11] P. J. Lee, Y. H. Kim, J. Y. Jeon, ve K. D. Song, “Effects of apartment building façade and balcony design on the reduction of exterior noise”, *Building and Environment*, c. 42, sayı 10, ss. 3517–3528, 2007.
- [12] T. Ishizuka ve K. Fujiwara, “Traffic noise reduction at balconies on a high-rise building façade”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, c. 131, sayı 3, ss. 2110–2117, 2012.
- [13] X. Wang, D. Mao, W. Yu, ve Z. Jiang, “Acoustic performance of balconies having inhomogeneous ceiling surfaces on a roadside building facade”, *Building and Environment*, c. 93, sayı P2, ss. 1–8, 2015.
- [14] British Standards Institution, “BS 8579:2020 Guide to the design of balconies and terraces”, *BSI Standards Publication*, BS 8579:2020, s. 56, 2020.
- [15] W. Hupeng, J. Kang, ve J. Hong, “Effects of urban street spatial parameters on sound propagation”, *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, c. 46, sayı 2, ss. 341–358, 2019.
- [16] C. Calleri, L. Shtrepi, A. Armando, ve A. Astolfi, “Evaluation of the influence of building façade design on the acoustic characteristics and auditory perception of urban spaces”, *Building Acoustics*, c. 25, sayı 1, ss. 77–95, 2018.
- [17] T.J. Cox, P. D’Antonio, *Acoustic Absorbers and Diffusers Theory, Design and Application*, Third Edition, Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2017.
- [18] Odeon A/S. (2019). *Odeon Room Acoustics Software, Version 15.16 Combined Edition: User Manual & Global Material Library*. Odeon A/S Report, Denmark.

DARBE SESİ DÜZEYİ BAKIMINDAN AKUSTİK KONFORUN SAĞLANABİLMESİ İÇİN YÜZER DÖŞEME UYGULAMASI

Mehmet OKAY¹

Yıldız Teknik Üniversitesi, Beşiktaş, İstanbul, Türkiye

e-posta: okaymehmet92@gmail.com

Mehmet Nuri İLGÜREL²

Yıldız Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi, Beşiktaş, İstanbul, Türkiye

e-posta: milgurel@yildiz.edu.tr

Rahmi GÜÇLÜ³

Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi, Beşiktaş, İstanbul, Türkiye

e-posta: guclu@yildiz.edu.tr

ÖZET

Mimari yapılar, işlevleri gereği gürültünün insanlar üzerindeki fizyolojik ve psikolojik etkilerinden dolayı asgari akustik konfor şartlarını sağlamalıdır. Akustik konfor şartlarının sağlanmasına yönelik, 'Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik' doğrultusunda yapılan akustik tasarım süreçlerinde bazı eksikliklerin ve aksaklıkların yaşandığı görülmektedir. Özellikle darbe sesi yalıtımı konusu, döşeme kaplaması altında değerlendirilmesi gerektiği için, bu konuda yapılan değişiklikler şantiye planlamasını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu durumun önüne geçmek amacıyla tasarım aşamasında yönlendirici bir kılavuz niteliğinde, darbe sesi düzeyi bakımından akustik konforun sağlanabilmesi için uygulanması gereken sistem belirlenmiş ve yüzer döşeme uygulamasının gerekliliği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ses Yalıtımı, Darbe Sesi Yalıtımı, Yüzer Döşeme Sistemi

FLOATING FLOORING APPLICATION TO PROVIDE ACOUSTIC COMFORT IN TERMS OF IMPACT SOUND**ABSTRACT**

Buildings, due to their functions, must meet the minimum acoustic comfort conditions due to the physiological and psychological effects of noise on people. It is observed that there are some deficiencies and malfunctions in the acoustic design processes made in line with the “Regulation on the Protection of Buildings Against Noise” aimed at providing acoustic comfort conditions. Since the issue of impact sound insulation should be evaluated under the floor covering, the changes made on this issue significantly affect the planning of the construction site. In order to prevent this situation, the system to be applied in order to provide acoustic comfort in terms of impact sound level is determined as a guiding guide at the design stage and the necessity of floating floor application is evaluated.

Keywords: *Sound Insulation, Impact Sound Insulation, Floating Floor System*

1. GİRİŞ

İnsanların barınma ve korunma ihtiyacı, beraberinde mimariyi gerekli hale getirmiştir. Artan nüfus, değişen ve gelişen yaşam koşulları, mimari yapıdan da beklentilerin artmasına neden olmaktadır. Günümüz dünyasında mimari yapıdan, ekonomi, sağlamlık, estetik ve işlevsel olması beklentilerinin yanı sıra, ısı, görsel ve işitsel olmak üzere fiziksel konfor koşullarının da sağlanması beklenmektedir. İşitsel konfor, tiyatro salonu, konferans salonu gibi hacimlerde duyulan sesin kalitesini artırmanın amaçlandığı “hacim akustiği” ve iki hacim arasındaki gürültü geçişinin kontrol altına alınmaya çalışıldığı “gürültü denetimi” olarak iki başlık altında değerlendirilmektedir. Gürültü denetimi de kendi içinde hava doğuşlu ve katı doğuşlu olmak üzere iki başlıkta incelenmektedir.

Gürültü denetimi açısından, hava doğuşlu ses yalıtımı (bölme duvarlarda, dış yapı elemanlarında, döşemelerde), darbe sesi (katı doğuşlu) ses yalıtımı (özellikle döşemelerde), servis ekipmanlarından kaynaklı iç gürültü düzeyleri, servis ekipmanlarından kaynaklı titreşimlerin kontrolü, yansımış ses düzeyinin azaltılması açısından hacimlerde yansıma süresi değerlendirilmektedir [1,2]. Uygun akustik konfor koşullarının sağlanabilmesi için hesaplama ve ölçüm standartları geliştirilmiş, sınır konfor koşulları ise yönetmelikler ile belirlenmiştir. Bu bağlamda ülkemizde 2017 yılında “Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik” yayımlanmıştır [1].

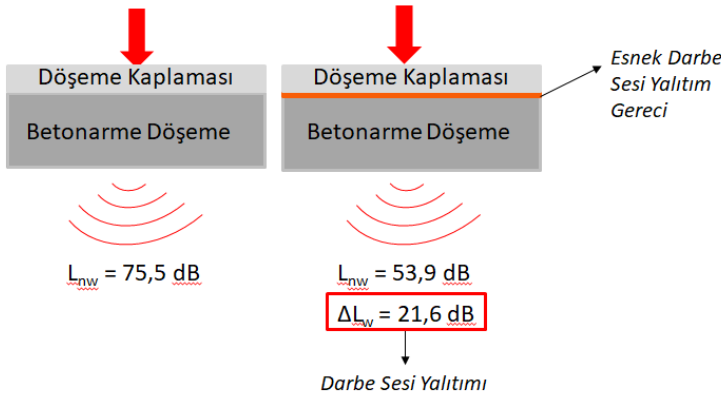
Gürültü denetiminin Türkiye’de yeni bir konu olması, mimari tasarım aşamasında akustik konfor konusunun dikkate alınmaması, yeterli sayıda deneyimli ve yetişmiş akustik uzman olmayışı, akustik değerlendirmenin şantiye aşamasında yapılması veya hiç yapılmaması nedenleriyle akustik konfor değerlendirmesinde eksiklikler ve aksaklıklar yaşanabilmektedir. Darbe sesi düzeyine karşı alınan darbe sesi yalıtım önlemleri, döşeme kaplaması altında alınmakta, darbe kuvvetinin, taşıyıcı döşemeye olan aktarımının, asgari konfor koşullarını sağlayacak şekilde azaltılması hedeflenmektedir [3]. Darbe sesi yalıtımında, döşeme kaplaması altında önlem alındığı için, tasarım aşamasında yapılan eksik veya yanlış değerlendirmelerin, inşaat aşaması tamamlandıktan sonra düzeltilmesi, fayda-maliyet dengesinden dolayı pek mümkün olmamaktadır. Şantiye aşamasında yapılan tasarımsal değişiklikler ise öngörülmemiş zaman ve maliyet kayıplarına neden olmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada darbe sesi düzeyi konusu üzerinde durulmuştur.

Gürültü denetimi hesaplamaları TS EN ISO 12354 standartları doğrultusunda yapılmaktadır. Darbe sesi düzeyi hesaplamaları standardın ikinci bölümünde ele alınmaktadır. Bu çalışmada, ilgili standart doğrultusunda

hesaplamalar yapılarak, darbe sesi düzeyini etkileyen değişkenler belirlenmiş ve sonuca etkisi irdelenmiştir. Buna göre darbe sesi düzeyi hesaplamalarının yapıldığı model yaşama hacmi, en elverişsiz durumun olduğu şekilde kurgulanmış ve kaplamasız durumdaki farklı kalınlıklarda betonarme ve asmolen döşemeler için darbe sesi düzeyi hesaplamaları yapılmıştır. Yönetmeliğe göre akustik konforun sağlanabilmesi için döşeme kaplamasının sağlanması gereken darbe sesi yalıtım değerleri bulunmuş, bu değerler Türkiye'deki ve Dünyadaki darbe sesi yalıtım gereci üreticilerinin laboratuvar ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda, darbe sesi düzeyi bakımından akustik konforun sağlanabilmesi için yapılması gereken uygulama belirlenmiş ve yüzey döşeme uygulamasının gerekliliği irdelenmiştir. Çalışmanın sonucunun, mimari tasarım aşamasında, darbe sesi düzeyi bakımından uygun bir döşeme tasarımı yapılabilmesi için, yönlendirici bir kılavuz olması hedeflenmiştir. Çalışmanın bu yönüyle literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2. DARBE SESİ DÜZEYİ DEĞERLENDİRMESİ

Yapı döşemesi üzerinde oluşan darbe etkileri –topuk, koşma, top sekmesi, eşya düşmesi ve sürüklenmesi gibi- nedeniyle bir alt katta duyulan sesler darbe (katı) doğuşlu sesler olarak adlandırılır [1]. Darbe etkisinin, alt hacimde neden olduğu katı doğuşlu gürültünün, olumsuz etkilerin en aza indirgenmesi için, döşeme kaplaması altında esnek darbe sesi yalıtım gereci kullanılması ve taşıyıcı döşemeye geçen darbe kuvvetinin asgari düzeye indirgenmesi gerekmektedir [3]. Darbe sesinin azaltılması yönünde yapılan tüm çalışmalar ise darbe sesi yalıtımı olarak ifade edilmektedir [1]. **Şekil 1**'de darbe sesi düzeyi ve darbe sesi yalıtımı görsel olarak ifade edilmiştir.



Şekil 1. Darbe sesi düzeyi ve darbe sesi yalıtımı

2.1. İlgili Standartlar

Darbe sesi düzeyi değerlendirmesi birçok ülkede **Tablo 1**'de gösterilen ISO veya ASTM standartları doğrultusunda, ülkelerin yönetmelikleri ile çizilmiş olan sınırlar çerçevesinde yapılmaktadır. Ülkemizde darbe sesi düzeyi değerlendirmesi için yapılan hesaplama ve ölçümlerde ISO standartları dikkate alınmaktadır. Bu çalışma, ülkemizde olduğu gibi TS EN ISO 12354-2 standardındaki yöntemler izlenerek yapılmıştır.

Tablo 1. Darbe sesi düzeyi değerlendirmesinde izlenen standartlar [4]

ISO	Standart Kullanımı	ASTM
TS EN ISO 12354-2	Hesap Standardı	-
TS EN ISO 10140-3	Laboratuvar Ölçüm Standardı	ASTM E492
TS EN ISO 16283-2	Saha Ölçüm Standardı	ASTM E1007
TS EN ISO 717-2	Sonuçların Tek Sayı Derecelendirilmesi	ASTM E989

2.2. Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik

Ülkemizde yapılarda akustik konforun sağlanmasına yönelik “Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik” 2017 yılında Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yayımlanmış, 2018 yılında kısmen, 2019 yılında tamamen yürürlüğe girmiştir. Yönetmelik, binaları A-B-C-D-E-F olmak üzere altı performans sınıfına ayırmış, yeni yapılacak binalarda en az C sınıfı, mevcut binalarda kullanım amacının değişmesi veya esaslı tadilat bulunması durumunda ise en az D sınıfı akustik performansı zorunlu hale getirmiştir. Sağlanması gereken en yüksek darbe sesi düzeyleri **Tablo 2**'den elde edilebilmektedir. Yönetmelikte belirlenen sınır koşullar, TS EN ISO 16283-2 standardına göre yerinde yapılacak saha ölçümü sonucunda elde edilmesi gereken değerlerdir [1].

Tablo 2. Kaynak ve alıcı odası özelliklerine göre sağlanacak en yüksek darbe sesi düzeyleri ($L'_{nt,w}$, dB) [1]

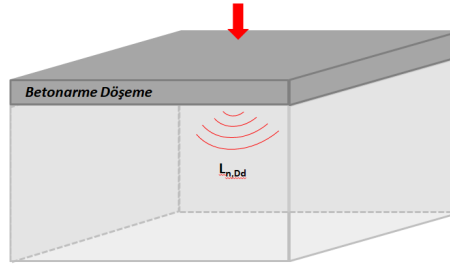
KAYNAK ODASI GÜRÜLTÜLÜK DERECESESİ	AKUSTİK PERFORMANS SINIFI					
	A	B	C	D	E	F
Yüksek Seviye Gürültü (YG)	40	44	48	52	56	60
Orta Seviye Gürültü (OG)	46	50	54	58	62	66
Düşük Seviye Gürültü (DG)	50	54	58	62	66	70

2.3. TS EN ISO 12354-2

Darbe sesi düzeyi hesaplamaları TS EN ISO 12354-2’de belirlenmiş yöntemlere göre yapılmaktadır. Standart içerisinde iki hesaplama modeli bulunmaktadır; detaylı yöntem, basitleştirilmiş yöntem. Bu çalışma detaylı yöntem kullanılarak, 50-5000 Hz frekansları arasında 1/3 oktav bandında yapılmıştır. Hesaplamalar, TS EN ISO 10140-5 standardında belirlenmiş standart darbe makinası tarafından oluşturulan darbe kuvvetine göre yapılmıştır [3,5].

2.3.1. Doğrudan iletim

Doğrudan iletim, döşeme üzerinde oluşan darbeyle, döşemenin gövdesinin titreşmesiyle oluşan ses düzeyini ifade etmektedir ve $L_{n,Dd}$ indisiyle gösterilmektedir. Şekil 2’de doğrudan iletim görsel olarak ifade edilmiştir.



Şekil 2. Doğrudan iletim temsili görsel (TS EN ISO 12354-2 standardı doğrultusunda oluşturulmuştur.)

Doğrudan iletim ile oluşan darbe sesi düzeyi aşağıda paylaşılan **Denklem 1** ile hesaplanmaktadır [3,6];

$$L_{n,Dd} = 155 - \left(30 * \log(m') + 10 * \log(T_s) + 10 * \log(\sigma) + 10 * \log\left(\frac{f}{f_{ref}}\right) \right) \quad (1)$$

$L_{n,Dd}$ = Doğrudan iletim ile oluşan darbe sesi düzeyi (dB)

m' = Döşemenin birim alan kütlesi (kg/m^2)

T_s = Yapısal çınılama süresi (sn)

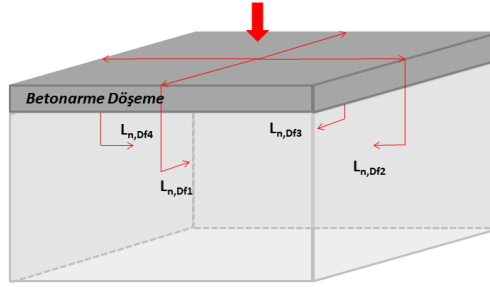
σ = Serbest kırılan dalgalar için yayılma faktörü

f = Frekans (Hz)

f_{ref} = Referans frekans; 1000 Hz

2.3.2. Yanal iletim

Darbe etkisi dolayısıyla döşemede oluşan titreşim, bağlı olduğu yapı elemanlarına aktarılır. Yaşama hacimleri düşünüldüğünde, dört tarafı duvarlarla çevrili olduğundan ve bu duvarlar döşemeye bağlı olduğu için, darbe sesi düzeyi değerlendirmesinde en az dört farklı yanal iletim yolu bulunmaktadır. Yanal iletim yolu üzerinden oluşan darbe sesi düzeyleri $L_{n,Df}$ indisiyle ifade edilir. **Şekil 3**'te yanal iletim görsel olarak ifade edilmiştir.



Şekil 3. Yanal iletim temsili görsel (TS EN ISO 12354-2 standardı doğrultusunda oluşturulmuştur.)

Yanal iletim ile oluşan darbe sesi düzeyi aşağıda paylaşılan **Denklem 2** ile hesaplanmaktadır [3,6];

$$L_{n,Df} = L_{n,Dd} - \Delta L + \frac{R_D - R_{f,i}}{2} - \Delta R_f - \overline{D_{v,Df,n}} - 10 * \log \sqrt{\frac{S_D}{S_f}} \quad (2)$$

$L_{n,Dd}$ = Doğrudan iletim ile oluşan darbe sesi düzeyi (dB)

ΔL = Yüzer döşemenin darbe sesi azaltımı (dB)

R_D = Döşemenin hava doğuşlu ses azaltımı (dB)

R_f = Yanal iletim elemanının hava doğuşlu ses azaltımı (dB)

ΔR_f = Yanal iletim elemanı üzerindeki ek katmanın hava doğuşlu ses azaltımı (dB)

$D_{v,Df,n}$ = Gerçek saha durumunda eleman D ve f arasındaki yöne göre ortalaması alınmış hız seviye farkı (dB)

S_D = Döşeme alanı (m²)

S_f = Yanal iletim elemanının alanı (m²)

2.3.3. Toplam darbe sesi düzeyi

Darbe sesi düzeyi değerlendirmesinde bir doğrudan iletim, dört de yanal iletim olmak üzere toplam beş ses iletim yolu bulunmaktadır. Toplam darbe sesi düzeyi, **Denklem 3**'te gösterildiği gibi bu beş iletim yolunun toplamından elde edilmektedir [3].

$$L'_{nT} = 10 * \log \left(10^{\frac{L_{n,Dd}}{10}} + \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_{n,Df,j}}{10}} \right) \quad (3)$$

Alıcı odanın yansım süresi, duyulan sesi artırıcı veya azaltıcı etki yapabilir. Hacmin yansım süresi aşağıda paylaşılan **Denklem 4** ile değerlendirmeye alınır [3].

$$L'_{nT} = L'_n - 10 * \log \left(\frac{C_{sab} * V}{A_0 * T_0} \right) \quad (4)$$

L'_{nT} = Sahadaki standard hale getirilmiş darbe ses basınç düzeyi (dB)

L'_n = Sahadaki normalize edilmiş darbe ses basınç düzeyi (dB)

C_{sab} = Sabine sabiti (0,16 s/m)

V = Hacim (m³)

A_0 = Referans eşdeğer ses absorpsiyon alanı (10 m²)

T_0 = Referans yansım süresi (0,5 s)

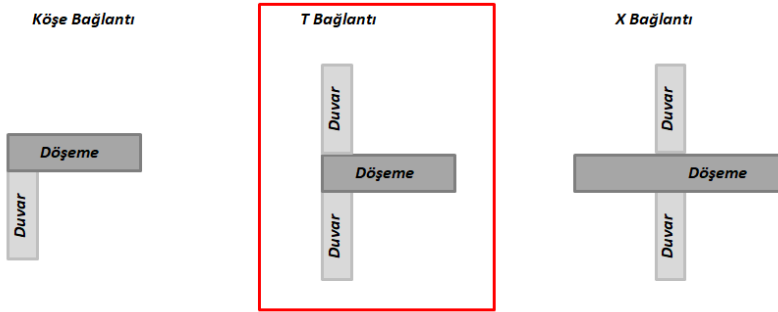
50-5000 Hz arasında 1/3 oktav bantta elde edilen değerler TS EN ISO 717-2 standardına göre ağırlıklandırılarak, yönetmelikte istenilen saha ölçümü sonucunda elde edilmesi gereken, ağırlıklı standardize edilmiş darbe sesi basınç düzeyine ($L'_{nT,w}$, dB) ulaşılır [3,7].

3. HESAPLAMA YÖNTEMİNE GÖRE DEĞİŞKENLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE EN ELVERİŞSİZ DURUMUN ELDE EDİLMESİ

Çalışmanın sonucunda tasarım aşamasında kullanılabilir kılavuz niteliğinde bir çıktı elde edilmek istendiği için, hesaplamaların yapılacağı hacmin en elverişsiz duruma göre kurgulanması, sahada karşılaşılabilecek birçok durumu kapsayacağından dolayı tercih edilmiştir. Bu nedenle sonucu etkileyen değişkenler ele alınmış ve en elverişsiz durum oluşacak şekilde model yaşama hacmi oluşturulmuştur.

3.1. Bağlantı şekli

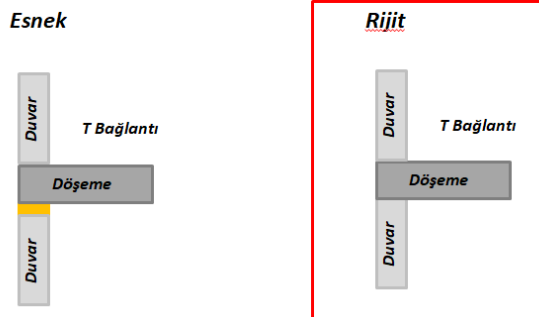
Döşemenin, yanal iletim elemanları olan duvarlarla yaptığı bağlantı şeklinin sonucu etkileyen bir değişken olduğu görülmüştür. Döşeme ile duvarların bağlantısı, **Şekil 4**'te gösterildiği gibi, köşe, T veya X bağlantı şeklinde olabilir [3]. Köşe bağlantı sadece çatı katında olacağından dolayı değerlendirmeye alınmamıştır. T ve X bağlantı arasında ise T bağlantısının daha elverişsiz olduğu gözlemlenmiştir. Buna göre, detaylı hesaplamaların yapılacağı modelde, en fazla T bağlantı içerebilecek olan, binanın köşesinde yer alan hacim için hesaplamaların yapılması tercih edilmiştir. Binanın köşesinde yer aldığı için dış cephe elemanları T bağlantı yaparken, iç bölme elemanlar X bağlantı yapıyor olacaktır.



Şekil 4. Bağlantı şekilleri (TS EN ISO 12354-2 standardı doğrultusunda oluşturulmuştur.)

3.2. Bağlantı tipi

Duvarlar ve döşemeler, **Şekil 5**'te gösterildiği gibi birbirine esnek veya rijit olarak bağlanabilmektedir [3]. Yapılan hesaplamalar sonucunda rijit bağlantının daha elverişsiz olduğu görülmüştür.



Şekil 5. Bağlantı tipi (TS EN ISO 12354-2 standardı doğrultusunda oluşturulmuştur.)

3.3. Eleman özellikleri

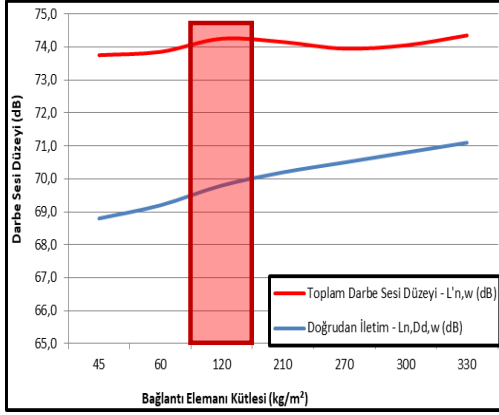
Doğrudan ve yanal olmak üzere, ses iletimine dahil olan tüm elemanlar için **Tablo 3**'te yer alan değişkenler kullanılarak hesaplamalar yapılmaktadır. Bu değişkenler birbirini etkilemekle birlikte, toplam darbe sesi düzeyini etkileyen iki önemli etken olduğu görülmüştür; tüm elemanların birim alan kütlesi ve döşeme alanı.

Tablo 3. Ses iletim yollarına katılan elemanların hesaplamalarda kullanılan değişkenleri

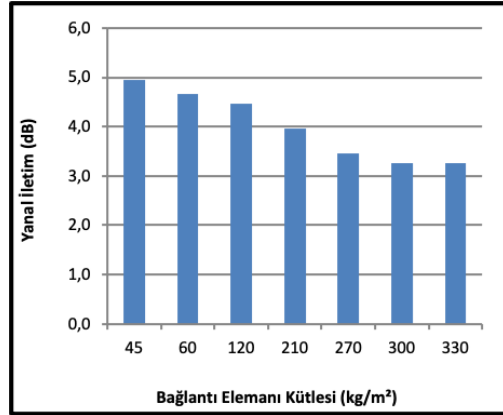
DEĞİŞKENLER
Uzunluk (m)
Genişlik (m)
Alan (m ²)
Kalınlık (m)
Yoğunluk (kg/m ³)
İç Kayıp Faktörü (η_{int})
Boyuna Hız (c_L , m/s)
Sesin Havadaki Hızı ($c_0 = 340$ m/s)
f_c (kritik frekans, Hz)
f_{11} (Hz)

3.3.1. Bağlantı elemanının birim alan kütlesi

Bağlantı elemanının birim alan kütlesi **Şekil 6**'de gösterildiği gibi, 45 kg/m² - 330 kg/m² arasında değiştirilerek –birim alan kütlesinin değişimine bağlı olarak iç kayıp faktörü ve boyuna hız da literatüre uygun şekilde değiştirilmiştir- yedi farklı hesaplama yapılmış, doğrudan iletim ($L_{n,DD,w}$) ve toplam darbe sesi düzeyi ($L'_{n,w}$) elde edilmiş, bunların farkından yanal iletimler hesaplanmış ve **Şekil 7**'de sonuçlar gösterilmiştir. Detaylı hesaplamaların yapılacağı model, bir binanın köşesinde, iki tarafı yapı kabuğu olan hacim olduğundan, modelde en elverişsiz durumun elde edilebilmesi için, genel uygulamaya paralel olarak 120 kg/m² (20cm, 600 kg/m³) birim alan kütlesine sahip yanal iletim elemanları tercih edilmiş, **Şekil 6**'da kırmızı sütun ile gösterilmiştir.



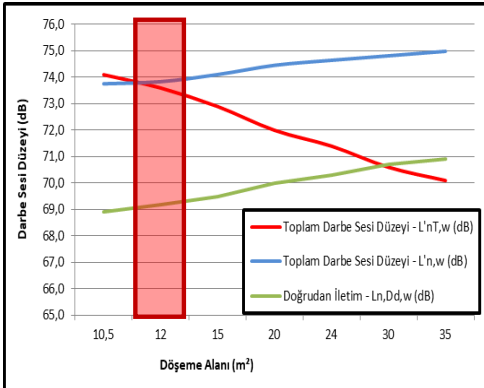
Şekil 6. Bağlantı elemanının birim alan kütesine göre en elverişsiz olan bölge seçimi



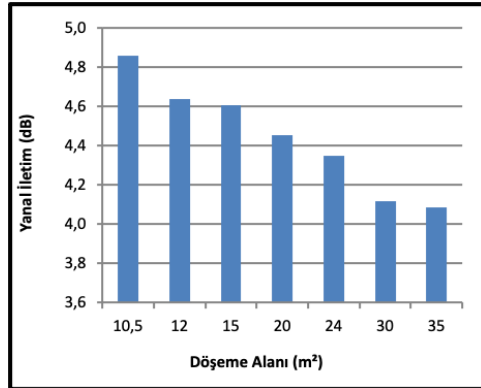
Şekil 7. Bağlantı elemanının birim alan kütesine bağlı yanal iletimlerin (Ln,Df) değişimi

3.3.2. Döşeme alanı

Diğer tüm değişkenler sabit kalmak koşuluyla, döşeme alanı 10,5 m² ile 35 m² arasında değiştirilerek toplam yedi farklı döşeme alanı için hesaplamalar yapılmış, Şekil 8'de gösterildiği gibi doğrudan iletim (L_{n,D,d,w}) ve toplam darbe sesi düzeyi (L_{n,w}) elde edilmiştir. Bunların farkından yanal iletimler hesaplanmıştır ve Şekil 9'da sonuçlar gösterilmiştir. Döşeme alanının değişimiyle alıcı odası hacmi de değiştiği için, alıcı odası hacminin de sonuca etkisi (L_{nT,w}) hesaplanmış, Şekil 8'de sonuçlar paylaşılmıştır. Mimari olarak bir odanın ortalama alanı da göz önünde bulundurularak, detaylı hesaplamaların yapılacağı modelde, Şekil 8'de kırmızı sütun ile gösterildiği üzere, en elverişsiz bölge olarak 12m²'lik döşeme alanı seçilmesi uygun görülmüştür.



Şekil 8. Döşeme alanına göre en elverişsiz olan bölge seçimi



Şekil 9. Döşeme alanına bağlı yanal iletimlerin (Ln,Df) değişimi

4. MODEL HACMİN OLUŞTURULMASI VE HESAPLAMALAR

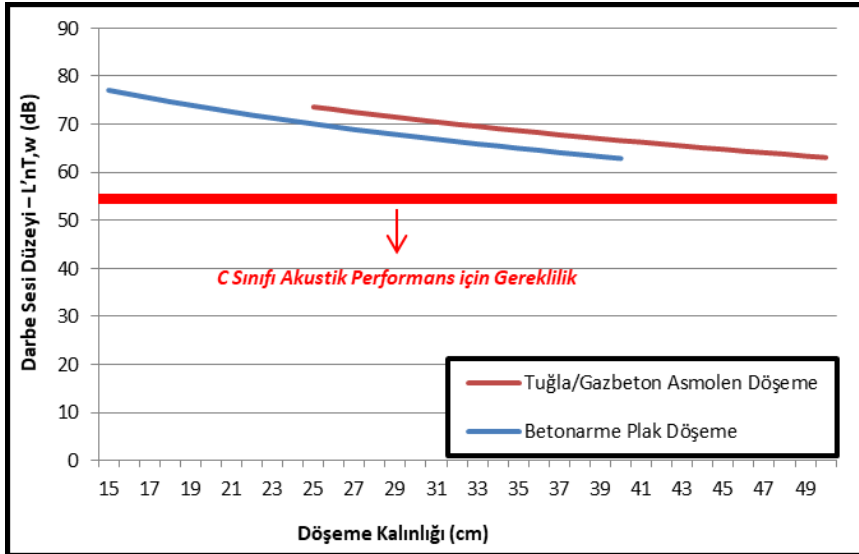
En elverişli durumun elde edilmesine yönelik yapılan hesaplamalar sonucunda;

- Yapının köşesinde yer alan,
- 12m² döşeme alanına, 2,75m kat yüksekliğine sahip,
- 20cm kalınlıkta, 600 kg/m³ yoğunluklu ve döşemeye rijit bir şekilde bağlı duvarlarla çevrelenmiş,

Düşeyde komşuluğa sahip iki yaşama hacmi arasında, 15cm ile 40cm arasında değişen kalınlıklarda betonarme plak döşeme için ve 25cm ile 50cm arasında değişen kalınlıklarda asmolen (tuğla/gazbeton) döşeme için darbe doğuşlu ses düzeyi hesaplamaları yapılmıştır.

4.1. Darbe sesi düzeyi hesaplamaları

Oluşturulan modelde kaplamasız durumdaki, farklı kalınlıkta betonarme ve asmolen döşemeler için darbe sesi düzeyi ($L'_{nT,w}$) hesaplamaları yapılmıştır. Şekil 13'te gösterildiği gibi tüm hesaplamaların sonucunda görülmüştür ki, darbe sesi yalıtımı yapılmadığı durumda, hiçbir döşemede C sınıfı için akustik konfor koşullarını sağlanamamaktadır. Dolayısıyla bütün döşemeler için darbe sesi yalıtımı değerlendirmesi yapılması gerekmektedir.



Şekil 13. Kaplamasız durumdaki döşemeler için döşeme kalınlığına bağlı darbe sesi düzeyi ($L'_{nT,w}$) hesaplama sonuçları

4.2. Hedef darbe sesi yalıtım düzeylerinin belirlenmesi

Yapılan hesaplamalar sonucunda, darbe sesi düzeyi için, yönetmelikte belirtilen akustik konfor koşullarının, darbe sesi yalıtımı yapılmadığı durumda sağlanamadığı görülmüştür. Yönetmelikteki sınır değerlerin sağlanabilmesi için döşeme kaplamasının sağlanması gereken darbe sesi yalıtımı **Denklem 5** ile elde edilmiştir.

$$\Delta L_{w \text{ [Döşeme Kaplamasının Azaltımı]}} = L'_{nT,w \text{ [Kaplamsız Döşeme]}} - L'_{nT,w \text{ [Yönetmelik]}} \quad (5)$$

Hesaplama sonuçlarına göre döşeme kaplamasının sağlanması gereken darbe sesi azaltımı, **Tablo 4** ve **Tablo 5**'de görüldüğü üzere, ΔL_w en yüksek 37,1 dB iken en düşük 8,9 dB olmaktadır.

4.2.1. Betonarme döşeme

Tablo 4. Döşeme kaplamasının sağlanması gereken darbe sesi yalıtım düzeyleri (dB) [Betonarme Döşeme]

	Plak Döşeme Kalınlığı (cm)	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	$L'_{nT,w}$ (dB)	77,1	76,3	75,5	74,7	74,0	73,3	72,6	71,9	71,3	70,7	70,1	69,5	68,9	68,4	67,9	67,4	66,9	66,4	65,9	65,5	65,0	64,6	64,1	63,7	63,3	62,9
Orta Seviye Gürültü (OG)	A Sınıf Akustik Performans ΔL_w (dB) [$L'_{nT,w} \leq 46$ dB]	31,1	30,3	29,5	28,7	28,0	27,3	26,6	25,9	25,3	24,7	24,1	23,5	22,9	22,4	21,9	21,4	20,9	20,4	19,9	19,5	19,0	18,6	18,1	17,7	17,3	16,9
	B Sınıf Akustik Performans ΔL_w (dB) [$L'_{nT,w} \leq 50$ dB]	27,1	26,3	25,5	24,7	24,0	23,3	22,6	21,9	21,3	20,7	20,1	19,5	18,9	18,4	17,9	17,4	16,9	16,4	15,9	15,5	15,0	14,6	14,1	13,7	13,3	12,9
	C Sınıf Akustik Performans ΔL_w (dB) [$L'_{nT,w} \leq 54$ dB]	23,1	22,3	21,5	20,7	20,0	19,3	18,6	17,9	17,3	16,7	16,1	15,5	14,9	14,4	13,9	13,4	12,9	12,4	11,9	11,5	11,0	10,6	10,1	9,7	9,3	8,9
Yüksek Seviye Gürültü (YG)	A Sınıf Akustik Performans ΔL_w (dB) [$L'_{nT,w} \leq 40$ dB]	37,1	36,3	35,5	34,7	34,0	33,3	32,6	31,9	31,3	30,7	30,1	29,5	28,9	28,4	27,9	27,4	26,9	26,4	25,9	25,5	25,0	24,6	24,1	23,7	23,3	22,9
	B Sınıf Akustik Performans ΔL_w (dB) [$L'_{nT,w} \leq 44$ dB]	33,1	32,3	31,5	30,7	30,0	29,3	28,6	27,9	27,3	26,7	26,1	25,5	24,9	24,4	23,9	23,4	22,9	22,4	21,9	21,5	21,0	20,6	20,1	19,7	19,3	18,9
	C Sınıf Akustik Performans ΔL_w (dB) [$L'_{nT,w} \leq 48$ dB]	29,1	28,3	27,5	26,7	26,0	25,3	24,6	23,9	23,3	22,7	22,1	21,5	20,9	20,4	19,9	19,4	18,9	18,4	17,9	17,5	17,0	16,6	16,1	15,7	15,3	14,9

4.2.2. Asmolen (Tuğla/Gazbeton) Döşeme

Tablo 5. Döşeme kaplamasının sağlanması gereken darbe sesi yalıtım düzeyleri (dB) [Asmolen Döşeme]

	Tuğla/Gazbeton Döşeme Kalınlığı (cm)	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
	$L'_{nT,w}$ (dB)	73,6	73,1	72,5	72,0	71,5	71,0	70,5	70,0	69,6	69,1	68,7	68,3	67,8	67,4	67,0	66,6	66,3	65,9	65,5	65,1	64,8	64,4	64,1	63,8	63,4	63,1
Orta Seviye Gürültü (OG)	A Sınıf Akustik Performans ΔL_w (dB) [$L'_{nT,w} \leq 46$ dB]	27,6	27,1	26,5	26,0	25,5	25,0	24,5	24,0	23,6	23,1	22,7	22,3	21,8	21,4	21,0	20,6	20,3	19,9	19,5	19,1	18,8	18,4	18,1	17,8	17,4	17,1
	B Sınıf Akustik Performans ΔL_w (dB) [$L'_{nT,w} \leq 50$ dB]	23,6	23,1	22,5	22,0	21,5	21,0	20,5	20,0	19,6	19,1	18,7	18,3	17,8	17,4	17,0	16,6	16,3	15,9	15,5	15,1	14,8	14,4	14,1	13,8	13,4	13,1
	C Sınıf Akustik Performans ΔL_w (dB) [$L'_{nT,w} \leq 54$ dB]	19,6	19,1	18,5	18,0	17,5	17,0	16,5	16,0	15,6	15,1	14,7	14,3	13,8	13,4	13,0	12,6	12,3	11,9	11,5	11,1	10,8	10,4	10,1	9,8	9,4	9,1
Yüksek Seviye Gürültü (YG)	A Sınıf Akustik Performans ΔL_w (dB) [$L'_{nT,w} \leq 40$ dB]	33,6	33,1	32,5	32,0	31,5	31,0	30,5	30,0	29,6	29,1	28,7	28,3	27,8	27,4	27,0	26,6	26,3	25,9	25,5	25,1	24,8	24,4	24,1	23,8	23,4	23,1
	B Sınıf Akustik Performans ΔL_w (dB) [$L'_{nT,w} \leq 44$ dB]	29,6	29,1	28,5	28,0	27,5	27,0	26,5	26,0	25,6	25,1	24,7	24,3	23,8	23,4	23,0	22,6	22,3	21,9	21,5	21,1	20,8	20,4	20,1	19,8	19,4	19,1
	C Sınıf Akustik Performans ΔL_w (dB) [$L'_{nT,w} \leq 48$ dB]	25,6	25,1	24,5	24,0	23,5	23,0	22,5	22,0	21,6	21,1	20,7	20,3	19,8	19,4	19,0	18,6	18,3	17,9	17,5	17,1	16,8	16,4	16,1	15,8	15,4	15,1

4.3. Darbe sesi yalıtım gereci üreticilerinin laboratuvar ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi

Türkiye, Almanya, İtalya, Portekiz, Rusya, Kanada, Amerika gibi birçok ülkeden, farklı üreticilerin, farklı ürünlerinin TS EN ISO 10140-3 [9] standardına göre darbe sesi yalıtımı laboratuvar ölçüm sonuçları incelenmiştir. Testlerin iki başlık altında toplanması uygun görülmüştür; şap/beton altında esnek gereç kullanımıyla elde edilen yüzer döşeme sistemleri, döşeme kaplaması altında esnek gereç kullanımıyla elde edilen darbe sesi azaltım sistemleri.

- Yüzer döşeme sistemleri (*darbe sesi azaltımı performanslarına göre yukarıdan aşağıya sıralanmıştır.*)
 - o Yaylı sistemler kullanılarak elde edilen yüzer döşeme sistemleri
 - o Yüzer döşeme pedleri kullanılarak elde edilen yüzer döşeme sistemleri
 - o Şap/beton altında esnek gereç (şilte) kullanılarak elde edilen yüzer döşeme sistemleri
- Döşeme kaplaması altı (*halı hariç tutularak darbe sesi azaltımı performanslarına göre yukarıdan aşağıya sıralanmıştır.*)
 - o Mermer altında esnek gereç (şilte) kullanılarak darbe sesi azaltımı
 - o Seramik altında esnek gereç (şilte) kullanılarak darbe sesi azaltımı
 - o Parke altında esnek gereç (şilte) kullanılarak darbe sesi azaltımı
 - o Halı altında esnek gereç (şilte) kullanılarak veya kullanılmadan darbe sesi azaltımı

İncelenen darbe sesi yalıtımı ölçüm sonuçlarına göre, az sayıda farklı sonuçlar bulunmakla birlikte, güvenli bölgede kalacak şekilde $\Delta L_w = 18$ dB geçiş bölgesi olarak kabul edilmiştir. Sonuç olarak, ihtiyaç duyulan darbe sesi azaltımı $\Delta L_w \geq 18$ dB olduğu durumda yüzer döşeme sistemi yapılması gerektiği, $\Delta L_w < 18$ dB olduğu durumda döşeme kaplaması altında önlem alınarak, darbe sesi düzeyi bakımından akustik konfor koşullarının sağlanabileceği kabul edilmiştir. Bu değerlendirmeye göre **Tablo 4** ve **Tablo 5** sırasıyla **Tablo 6** ve **Tablo 7**'de olduğu şekilde düzenlenmiştir.

4.3.1. Betonarme Döşeme

Tablo 6. Akustik konfor koşullarının sağlanması için hacmin döşemesinde alınması gereken darbe sesi yalıtım önlemi [*Betonarme Döşeme*]

	Plak Döşeme Kalınlığı (cm)	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Orta Sesiye Gürültü (OG)	A Sınıf Akustik Performans Darbe Yalıtım Sistemi	Yüzer Döşeme Sistemi																							Kaplama Altı		
	B Sınıf Akustik Performans Darbe Yalıtım Sistemi	Yüzer Döşeme Sistemi													Kaplama Altı												
	C Sınıf Akustik Performans Darbe Yalıtım Sistemi	Yüzer Döşeme Sistemi						Kaplama Altı																			
	A Sınıf Akustik Performans Darbe Yalıtım Sistemi	Yüzer Döşeme Sistemi																							Kaplama Altı		
Yüksek Sesiye Gürültü (YG)	A Sınıf Akustik Performans Darbe Yalıtım Sistemi	Yüzer Döşeme Sistemi																							Kaplama Altı		
	B Sınıf Akustik Performans Darbe Yalıtım Sistemi	Yüzer Döşeme Sistemi																							Kaplama Altı		
	C Sınıf Akustik Performans Darbe Yalıtım Sistemi	Yüzer Döşeme Sistemi						Kaplama Altı																			
	A Sınıf Akustik Performans Darbe Yalıtım Sistemi	Yüzer Döşeme Sistemi																							Kaplama Altı		

4.3.2. Asmolen (Tuğla/Gazbeton) Döşeme

Tablo 7. Akustik konfor koşullarının sağlanması için hacmin döşemesinde alınması gereken darbe sesi yalıtım önlemi [*Asmolen Döşeme*]

	Tuğla/Gazbeton Döşeme Kalınlığı (cm)	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Orta Sesiye Gürültü (OG)	A Sınıf Akustik Performans Darbe Yalıtım Sistemi	Yüzer Döşeme Sistemi																							Kaplama Altı		
	B Sınıf Akustik Performans Darbe Yalıtım Sistemi	Yüzer Döşeme Sistemi													Kaplama Altı												
	C Sınıf Akustik Performans Darbe Yalıtım Sistemi	Yüzer Döşeme Sistemi						Kaplama Altı																			
	A Sınıf Akustik Performans Darbe Yalıtım Sistemi	Yüzer Döşeme Sistemi																							Kaplama Altı		
Yüksek Sesiye Gürültü (YG)	A Sınıf Akustik Performans Darbe Yalıtım Sistemi	Yüzer Döşeme Sistemi																							Kaplama Altı		
	B Sınıf Akustik Performans Darbe Yalıtım Sistemi	Yüzer Döşeme Sistemi																							Kaplama Altı		
	C Sınıf Akustik Performans Darbe Yalıtım Sistemi	Yüzer Döşeme Sistemi						Kaplama Altı																			
	A Sınıf Akustik Performans Darbe Yalıtım Sistemi	Yüzer Döşeme Sistemi																							Kaplama Altı		

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Elde edilen bulgulara göre farklı kalınlıkta betonarme ve asmolen (tuğla/gazbeton) döşemeler için, kaynak odasının gürültü düzeyine göre hedeflenen akustik performansın sağlanabilmesi için uygulanması gereken darbe sesi azaltım sistemleri elde edilmiştir. Sonuç olarak paylaşılan **Tablo 6** ve **Tablo 7** proje özelliklerine göre ve döşeme kesitinde kullanılan malzemelere göre farklılık gösterebilir. Çalışmada amaçlanan, tasarım aşamasında yaklaşık doğru bir değerlendirme yapılmasını kolaylaştıracak bir çerçeve çizerken, yüzer döşemelerin kullanım alanlarının elde edilmesidir. Çizilen çerçevenin dışında durumlarla karşılaşılabılır, mutlaka akustik uzmanların her projeye özel tasarım yapması gerekmektedir. Aynı şekilde **Tablo 4** ve **Tablo 5**'te elde edilen darbe sesi azaltımı ΔL_w değerleri bağlayıcı değildir, değişkenlik gösterebilir. Hesaplamalarda 2 dB güvenli bölgede yapılmasına karşın [1], teorinin pratikten farklı olabileceği durumlarla karşılaşılabılır.

Tüm bulguların sonucunda aşağıdaki çıkarımlar yapılmıştır;

- Şap/beton veya döşeme kaplaması (mermer, seramik, parke, halı gibi) altında esnek darbe sesi yalıtım gereci olmaksızın yönetmelikteki sınır akustik performans koşulları sağlanamamaktadır.
- Özellikle yüksek gürültü düzeyine sahip kaynak odaları döşemelerinde yüzer döşeme uygulaması yapılması gerekmektedir. Düşük frekanslı gürültünün yoğun olduğu ve bağlı olduğu yapı elemanına titreşim aktaran ekipmanların bulunduğu mekanik hacimler, hem titreşime karşı hem de hava doğuşlu seslere karşı özel olarak incelenmelidir.
- Orta düzeyde gürültüye sahip kaynak hacimlerde, asgari gereksinim olan C sınıfı akustik performansın sağlanabilmesi için görece ince döşemelerde (betonarme için <22cm, asmolen için <29cm) yüzer döşeme yapılması gerekirken, daha kalın döşemelerde döşeme kaplaması altında önlem almak yeterli olabilmektedir.
- Orta düzeyde gürültülü hacimler için darbe sesi düzeyi bakımından C sınıfı akustik performans sağlandığında, hava doğuşlu ses yalıtımı için de sınır koşulların çoğu durumda sağlanacağı öngörülmektedir. Ancak B ve A sınıfı akustik performans hedeflendiği durumlarda mutlaka hava doğuşlu ses yalıtımı için de ayrıca değerlendirme yapılması gerekmektedir.

6. KAYNAKLAR

- [1] Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2017, Mayıs). Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik. T. C. Cumhurbaşkanlığı Resmi Gazete. Erişim adresi <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2017/05/20170531-7.htm>
- [2] Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2010, Haziran) Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği. T.C. Cumhurbaşkanlığı Resmi Gazete. Erişim adresi <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/06/20100604-5.htm>
- [3] TS EN ISO 12354-2:2019: Bina akustiği - Binaların akustik performansının elemanların performansından tayini - Bölüm 2: Odalar arasında darbe sesinin yalıtımı
- [4] Hoeller, Christoph. "Review and Comparison of ASTM and ISO Standards on Sound Transmission in Buildings", Internoise 2018, Chicago.
- [5] TS EN ISO 10140-5-2:2013: Akustik - Yapı elemanlarının ses yalıtımının laboratuvar ölçümü - Bölüm 5: Deneyin yapılacağı tesis ve deney donanımı ile ilgili şartlar
- [6] TS EN ISO 12354-1:2019: Bina akustiği - Binaların akustik performansının elemanların performansından tayini - Bölüm 1: Odalar arasında hava ile yayılan sesin yalıtımı
- [7] TS EN ISO 717-2:2013: Akustik - Yapılarda ve yapı elemanlarında ses yalıtımının derecelendirilmesi - Bölüm 2: Darbe sesi yalıtımı (ISO 717-2:2013)
- [8] TS EN ISO 16283-2:2020: Akustik - Yapı elemanlarındaki ve yapılardaki ses yalıtımının yerinde ölçümü - Bölüm 2: Darbe sesi yalıtımı
- [9] TS EN ISO 10140-3:2011: Akustik - Yapı elemanlarının ses yalıtımının laboratuvar ölçülmesi - Bölüm 3: Darbe sesi yalıtımının ölçülmesi

KENTSEL İŞİTSEL PEYZAJLARDA SES KAYNAKLARI VE MEMNUNİYET DÜZEYLERİ İNCELEMESİ- TÜRKİYE'DE COVID-19 PANDEMİ SÜRECİ

Özlem GÖK TOKGÖZ¹

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Tepebaşı, Eskişehir, Türkiye
e-posta: ozlmkg@gmail.com

Hanife Ayça DOĞAN²

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Tepebaşı, Eskişehir, Türkiye
e-posta: haycadogan@gmail.com

Aslı ÖZÇEVİK BİLEN³

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Tepebaşı, Eskişehir, Türkiye
e-posta: asliozcevik@hotmail.com

ÖZET

İşitsel algı odaklı işitsel peyzaj araştırmalarında; ses kaynakları ve alıcı memnuniyeti özelinde yapılan çalışmalar artmaktadır. Bu çalışmalardan elde edilen öznel veriler; kişilerin ses ortam memnuniyet, algı ve ses kaynakları ile kurduğu ilişkileri aktardığı için önemlidir. Kentsel yaşamda sesler, insan faaliyetlerinin karşılıklarıdır. İnsan faaliyetlerine dair seslerin ses ortamdan kalkması ve/veya işitilmemesi gibi birçok durumlara yol açan Covid-19 süreci; kısıtlı kentsel yaşam ve etkileşim politikalarından dolayı kentlerde dönüşen işitsel peyzajlarda öznel belgeleme yapılması açısından eşsiz bir fırsat sunmuştur. Çalışma kapsamında ses kaynakları ve ses ortam memnuniyetinin incelenmesini amaçlayan çevrimiçi bir anket uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonucunda; Türkiye'de 58 kentten 705 kişinin katıldığı ankete yüksek düzeyde katılım sağlayan kentlerdeki ses kaynaklarının değişim durumu ve katılımcı memnuniyetinde meydana gelen değişimler ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: İşitsel peyzaj, Covid-19, Ses kaynakları, Ses ortam memnuniyeti

INVESTIGATION OF SOUND SOURCES AND SATISFACTION IN URBAN SOUNDSCAPES- COVID-19 PANDEMIC PROCESS IN TURKEY

ABSTRACT

In soundscape researches focused on sound perception; studies on sound sources and people satisfaction are increasing. Subjective data obtained from these studies; it is important because it conveys the relations the people establish with the sound environment satisfaction, perception and sound sources. Sounds in urban life are the inherent part of human activities. The Covid-19 process, which causes many situations such as the sounds of human activities disappearing from the sound environment and / or not being heard; It provided a unique opportunity for subjective documentation in soundscape transformed in cities due to the restricted urban life and interaction policies. Within the scope of the study, an online survey application was carried out to examine sound sources and sound environment satisfaction. As a result of this study; in the survey in which 705 people from 58 cities in Turkey participated, the change of sound sources and changes in participant satisfaction in cities with a high number of participants were presented.

Keywords: *Urban soundscape, Covid-19, Sound sources, Sound environment satisfaction*

1. GİRİŞ

Kentsel yaşamda sesler, insan faaliyetlerinin yansımalarıdır. Kentsel yaşantıyı değiştiren tüm faaliyetler, akustik ortamı da değiştirmektedir. Değişen akustik ortam ise çevre ile ilişkileri ve işitsel algılamayı farklılaştırmaktadır. İşitsel peyzaj çalışmaları da değişen işitsel algılamayı ve akustik ortamı araştırmak ve belgelemek konularına odaklanmaktadır. İşitsel peyzaj kavramı “üzerinde çalışılan herhangi bir akustik alan” tanımıyla, 1960’lı yılların sonunda ortaya konmuştur [1]. ISO 12913-1 standardında ise “ilgili kişi ya da toplum tarafından algılanan ya da deneyimlenen ve/ya da anlaşılan ses ortam” şeklinde 2014 yılında tanımlanmıştır [2]. Ses kaynakları ve alıcı memnuniyetleri üzerine yapılan işitsel peyzaj çalışmalarının, alıcı memnuniyet ve algısına yönelmesi, özellikle kişilerin ses ortam ile kurduğu ilişkilerin anlaşılması ve istenilen akustik ortamların oluşturulması için önemlidir [3-4]. Kişilerin algı ve memnuniyet durumlarındaki değişimin tespiti, akustik ortam tasarımı ve iyileştirme çalışmalarında kilit önem taşımaktadır. Hangi seslerin işitilmek istenildiğini, hangi seslerin rahatsız edici bulunduğunu bilmek ve seslerin içinde buldukları mekânla olan ilişkilerini ve bağlamlarını düşünerek hareket etmek işitsel peyzaj çalışmalarında göz önünde bulundurulmaktadır.

İşitsel peyzaj çalışmalarında öznel veri tespitinin önemi; toplumsal dinamikleri değiştiren olaylar veya toplumsal hayatı sekteye uğratan kriz durumlarında da görülmektedir. Toplumsal yaşamın hızlı bir biçimde değişmesi, akustik ortam üzerine algıyı da çarpıtmakta ve yaşanan kriz durumuna paralel olarak algı farklılaşmaktadır. Akustik bilginin bir topluluk için mekânsal, zamansal, kültürel ve sosyal kısıtlılıklar içerisinde anlamlandırılması bizi “acoustics community” olarak tanımlanan “akustik topluluk” olarak Türkçeleştirebilecek bir kavrama götürmektedir [5]. Bu kavramda kişiler zihinlerinde bağlama bağlı sesler ile ilişkiler kurar, bağlam ile ilgili sembol sesleri tanımlarlar. Akustik ortamı dramatik bir biçimde değiştiren toplumsal olaylar; kişilerin olayları sesler ile algılamasına ve bu olayların kimliğini “sesler” ile tanımlamasına neden olabilir. Ülke çapında protesto olayları, etkinlikler, gösteriler, savaş ve afet zamanları vb. durumlar üzerine yapılan çalışmalar; bu durumlardaki akustik ortamın, insan zihninde bu zor durumla ilgili algıyı tamamladığını ve seslerin; o durum ile ilgili kimliğin bir parçası haline geldiğini göstermektedir [6-8].

2019 yılı sonrasında yaşanan Covid-19 pandemisi de bu dramatik değişimlerden biridir. Ülke çapında veya yerelde meydana gelen kriz durumlarının aksine pandemi; tüm dünya kentlerini etkileyen küresel bir krizdir. Bu anlamda pandemi sürecinin yol açtığı toplumsal değişimlerin kentler ve kentli

üzerindeki etkileri ve bu etkilerin akustik ortam üzerindeki yansımaları araştırılmalıdır. Pandemi sürecinin akustik ortama etkileri üzerine yapılmış kent- sel çalışmalar incelendiğinde öncelikle pandemi öncesi ve sürecinde ses basınç seviyeleri arası farklar, gürültü azalması, gürültü haritalaması veya sınıflan- dırması gibi konulara yoğunlaşıldığı görülmüştür [9–12].

Pandemi süresince değişen akustik ortamın kentli katılımıyla tespit edil- mesi ve değerlendirilmesi ise sürecin anlaşılması açısından önemlidir. Bu ve- riler ışığında çalışma kapsamında **toplumsal hayatta radikal değişikliklere yol açan pandemi sürecinin kentlinin akustik ortam algısında meydana ge- tirdiği değişimi araştırmak ve değerlendirmek** amaçlanmıştır. Çalışmada; Türkiye genelinde kentli katılımı ile yürütülen bir araştırmanın ses kaynakları ile ilgili sonuçları verilmiştir. Mevcut pandemi koşulları sebebiyle çevrimiçi bir anket uygulaması tercih edilmiş, hazırlanan ankete 58 ilden 705 kişi ka- tılmıştır. Anket, 5 Mayıs 2020 tarihinde başlatılmış, 10 Mayıs 2020 tarihinde sonlandırılmıştır. Anket çalışmasında pandemi öncesi ve pandemi süresince değişen akustik ortam memnuniyeti ve işitilen ses kaynaklarının işaretlenme- si istenmiştir. Anket sonucunda katılımın en fazla olduğu İstanbul, Nevşehir, Eskişehir, Ankara illerine dair sonuçlar incelenmiştir. Buradan hareketle Co- vid 19 pandemisinin işitsel peyzaja yansımaları Türkiye sınırlılığında açık- lanmıştır. Yürütülen anket çalışmasına dair bilgiler verildikten sonra yüksek katılım sağlayan kentlerin anket sonuçları değerlendirilmiştir.

2. TÜRKİYE’DE PANDEMİ SÜRECİ VE İŞİTSEL PEYZAJA YANSIMALARI

Covid-19 kişiler arası aerosol iletimi ile bulaşan bir solunum yolu hastalığıdır. Bu sebeple kişiler arası fiziksel temasın azaltılması önemlidir. Türkiye’de Mart 2020’de ilk vakanın açıklanmasının ardından sosyal, idari, dini, eğitim, eğlence ve ekonomi gibi birçok alanda kısıtlamalara gidilmiştir. Eğitim kurumlarının fa- liyetlerine ara verilmiş, birçok insanın bir arda olduğu eğlence mekânları, sine- ma ve tiyatroların faaliyetleri durdurulmuştur. Topluluk olarak yapılan ibadetler, spor ve koro faaliyetleri, yüksek katılımcılı toplantılar iptal edilmiştir. Kamusal alan kullanımları sınırlandırılmış, açık ve yarı açık alanlarda yapılan birçok diğer etkinlik de engellenmiştir. Mümkün olduğunca fazla insanın evde kalmasının hedeflendiği bu süreçte risk altında görülen 65 yaş üzeri ve virüsün yayılmasında etkili olabileceği düşünülen 20 yaş altı kişilere sokağa çıkma yasakları uygulan- mış, kamusal alanlarda insan yoğunluğu azaltılmıştır.

Türkiye’de pandemi sürecini kısaca özetler isek, Mart, Nisan ayları sokağa çıkma yasaklarının ve diğer tedbirlerin devam ettiği bir süreçtir. Mayıs ayında

vaka sayılarındaki düşüşün etkisiyle kontrollü normalleşme süreci başlamıştır. Kasım 2020'ye kadar süren bu kontrollü normalleşme süreci sonrasında tekrar ikinci dalga olarak adlandıracağımız salgının etkisini arttırmasıyla kaldırılmış, diğer kısıtlamalar ve sokağa çıkma yasakları başlamıştır. Aşılmanın yaygınlaşması ve vaka sayılarının düşmesiyle beraber Haziran 2021'den itibaren tekrar bir normalleşme süreci içerisine girilmiştir. Tüm bu kısıtlamalar insan algı ve psikolojisini olumsuz etkilemiş, kentin dinamiklerini ve işleyişini değiştirmiştir. Değişen insan faaliyetlerinin bir sonucu olarak, kent içi akustik ortam karakteri değişmiş ve farklılaşmıştır. Kamusal alanda insan yoğunluğunun azalmasıyla bazı ses kaynakları azalmış, bazı ses kaynakları etkisini arttırmış bazı ses kaynakları ile kurulan ilişki türü değişip insan algısındaki yeri farklılaşmıştır. Pandemi sürecinin **kent akustiği üzerindeki etkileri**, çalışma kapsamında üç temel başlık altında değerlendirilmiştir. Bunlar; kısıtlı kamusal alan kullanımının etkisi, pandemi ortamının getirdiği yeniliklerin etkisi ve toplumsal birlik ve beraberliğin sağlanması amacıyla yapılan uygulamaların etkisidir.

- **Kısıtlı kamusal alan kullanımının etkisi:**

Kısıtlı kamusal alan kullanımı üzerine alınan önlemler **okulların eğitime ara vermesi** ile başlamıştır. Okullara ulaşımın durması kent içi trafiği azaltmış, okul çevresindeki yerleşimlerde okul kaynaklı seslerin işitilme durumları azalmıştır. **Şehirlerarası ve uluslararası seyahatlerin kaldırılması ya da kısıtlanması**, karayolu, havayolu ve demiryolu ulaşımını oldukça azaltmıştır. Kent akustiği üzerinde baskın bir şekilde etkili olan taşıt trafiği etkisini azaltmıştır. **Sosyal ve kültürel etkinliklerin durdurulması, ibadet mekânlarının kısıtlanması**, insanların topluluk halinde bir etkinlik yapmasını engellemiştir. Getirilen sokağa çıkma yasakları ile de kent akustik ortamı tamamen farklılaşmıştır. Bu durum kentte insan kaynaklı seslerin daha az duyulmasına sebep olmuştur. **Park ve bahçelere getirilen kamusal alan kısıtlamaları**, dışarı çıkabilecek insanların etkinliklerini de kısıtlayarak mümkün olduğu kadar iç mekânda -evde- kalmaya zorlamıştır. **Pazaryerlerinde satış yapan kişilerin seyrekleştirilmesi**, yüksek düzeyde ses üreten pazarların yoğunluğunu azaltmıştır.

- **Pandemi sürecinin getirdiği yeni ses kaynaklarının etkisi:**

Pandemi sürecinin toplumsal yaşamımıza getirdiği yeni ses kaynakları da bulunmaktadır.

Belediye ve camilerden yapılan Covid-19 içerikli anonslar, yasal süreçleri ve kısıtlamaları hatırlatmak amacıyla yapılan duyurular; değişen niteliği ile kent akustik ortamına eklenen yeni ses kaynaklarıdır. Sokağa çıkma yasakları

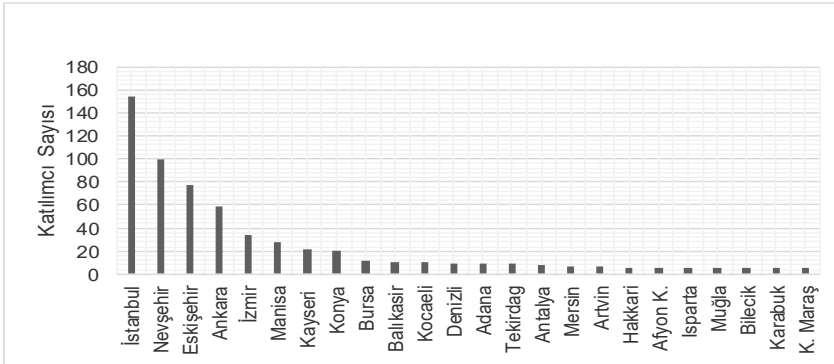
sonucunda ekmek ve çeşitli yiyeceklerin satışı için sokaklardan yapılan duyurular ve satıcı sesleri de bu süreçte görülmeye devam etmiştir.

- **Toplumsal beraberliğin sağlanması amacıyla yapılan uygulamaların etkisi**

Kentlerin işitsel peyzajında yer alan çeşitli ses kaynaklarının etkinliğini yitirmesi, kaybolması, yeni kaynakların eklenmesi gibi koşullar, pandemi sürecinde kentlerin işitsel peyzajının incelenmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Pandemi sürecinde insanlar evlerinde daha fazla vakit geçirmiş, pencereden veya evinin balkonundan/bahçesinden çevre ile sosyal etkileşim sağlamıştır. Balkon, pencere, bahçe ve sokak gibi etkileşim alanlarından sohbet, müzik dinletisi, şarkı söyleme vb. sosyal beraberliği pekiştiren etkileşimler görülmüştür. 23 Nisan Ulusal Egemenlik ve Çocuk Bayramı ve 19 Mayıs Atatürk'ü Anma Gençlik ve Spor Bayramı gibi *milli bayramların kutlamaları* pandemi sebebiyle iptal edilmiş fakat bayram coşkusu sürdürülebilmek için belirlenen saatlerde, evlerin camlarından ya da balkonlarından milli marş olan İstiklal Marşı okunmuştur. Saat 21.00'de sağlık çalışanlarına destek vermek için başlatılan alkış uygulaması da toplumsal olarak beraberliğin işitsel yollarla sağlandığı örneklerdendir.

3. ALAN ÇALIŞMASI

Çalışma kapsamında hazırlanan çevrimiçi internet anketi, katılımcı sayısının arttırılması ve çeşitlenmesi amacıyla sosyal medya hesapları ve bireysel çabalarla duyurulmuştur. Anket 05.05.2020 ve 10.05.2020 tarihleri arasında pandemi kısıtlama ve yasaklarının devam ettiği 5 günlük süreçte uygulanmıştır. Bu 5 günlük süreçte çevrimiçi internet anketine Türkiye'nin 58 ilinden 705 kişi katılmıştır. Anket analiz ve değerlendirme aşamasında bu sayı **690** kişiye düşmüştür.

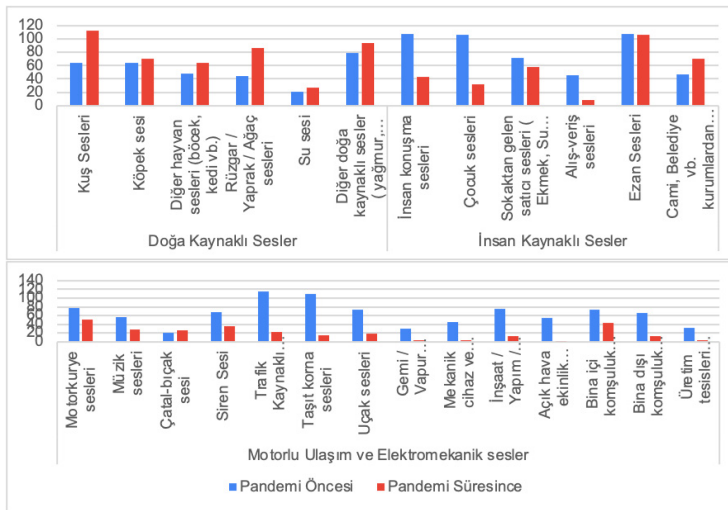


Şekil 1. Ankete katılım sağlayan iller ve katılımcı sayıları

Anket soruları, belirlenen araştırma sorusu ve hedef doğrultusunda üç bölümde hazırlanmıştır. Birinci bölüm kişisel verilerin yer aldığı bölümdür. İkinci bölüm kullanıcıların pandemi öncesi ve pandemi süreci akustik ortam memnuniyetlerinin tespit edildiği bölümdür. Bu bölümde katılımcılar memnuniyet düzeylerini 10'lu bir skalada 1(en az), 10(en çok) memnuniyet şeklinde cevaplandırmışlardır. Akustik ortamdaki ses kaynakları hakkında en fazla verinin elde edildiği üçüncü bölümde; üç kategori altında verilen doğa kaynaklı, insan kaynaklı ve motorlu ulaşım-elektromekanik seslerin pandemi öncesi ve pandemi sürecinde işitilip işitilmeme durumlarını işaretlenmesi istenmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle ankete katılım olan iller, Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 1'de ankete katılım sağlayan 58 ilden, 5 kişi ve üzeri katılım sağlamış 24 il gösterilmiştir. Anketi çalışmasının sosyal medya hesaplarından duyurulması, en çok katılım sağlayan illerin belirlenmesine etkili olmuş, anketi düzenleyenlerin bulunduğu Nevşehir ve Eskişehir illeri ön plana çıkmıştır. Çalışma kapsamında en fazla katılımın olduğu İstanbul, Nevşehir, Eskişehir, Ankara illerine dair veriler, akustik ortam memnuniyet düzeylerinin ortalama değerleri ve işitilen ses kaynakları olarak iki bölümde incelenmiştir.

3.1. İstanbul

Anket katılımcılarının %25'ini (174 kişi) oluşturan İstanbul, en fazla katılım sağlayan şehirdir. İstanbul 15 milyonu aşan nüfusuyla da Türkiye'nin en kalabalık şehridir[13]. Çalışmaya İstanbul'dan katılanların pandemi öncesi akustik ortam memnuniyetleri üzerine verdikleri cevaplarının ortalaması 5.12 iken pandemi sürecinde 7.07 değerine yükselmiştir. Ses ortam memnuniyet düzeyinde genel bir artıştan bahsedilebilmektedir.

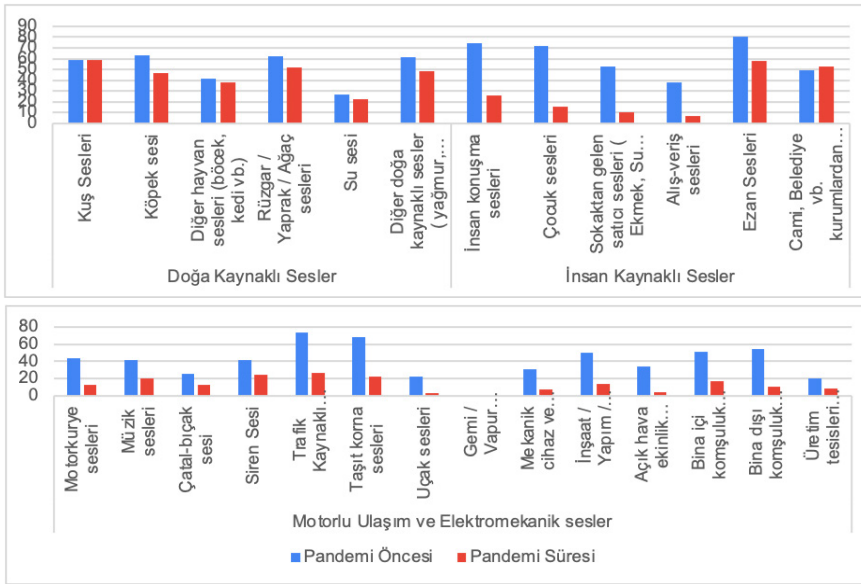


Şekil 2. İstanbul'dan ankete katılan katılımcıların pandemi öncesi ve sürecinde işittikleri ses kaynakları

Pandemi öncesi ve pandemi süresince işitilen seslerin işaretlenmesi istenilen bölümde İstanbul ili için elde edilen sonuçlar Şekil 2'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde doğa kaynaklı seslerin pandemi süresince işitilme durumunun arttığı görülmektedir. İnsan kaynaklı olarak tanımlanan insan sesleri, çocuk sesleri, sokaktan gelen satıcı ve alışveriş sesleri azalırken, ezan sesinde belirgin bir değişim olmamıştır. Cami Belediye vb. kurumlardan yapılan duyuru sesleri ise artmıştır. Motorlu ulaşım ve elektromekanik sesler olarak gruplandırılan seslerde ise tüm ses kaynaklarında işitilme durumunun azaldığı görülmektedir.

3.2. Nevşehir

Anket katılımcılarının %15'ini (100 kişi) oluşturan Nevşehir, en fazla katılım sağlayan ikinci şehirdir. Nevşehir 304 bin nüfusu ile diğer incelenen illere göre en düşük nüfuslu yerleşimdir[14]. Nevşehir'den katılanların pandemi öncesi akustik ortam memnuniyetleri üzerine verdikleri cevaplarının ortalaması 5.75 iken pandemi sürecinde 6.67 değerine yükselmiştir. Bu durumda; ses ortam memnuniyet düzeyinde genel bir artıştan bahsedilebilmektedir.



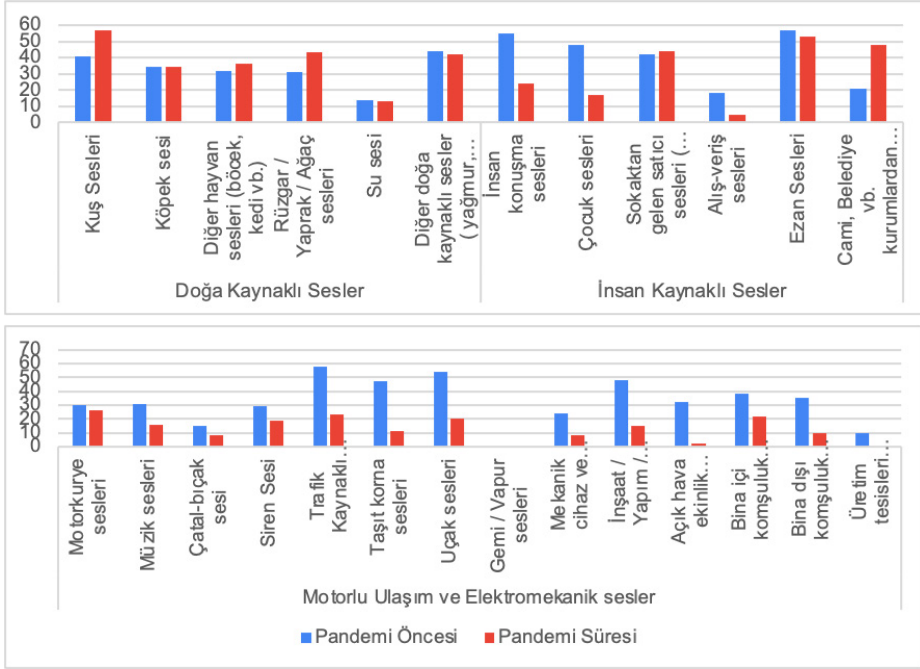
Şekil 3. Nevşehir'den ankete katılan katılımcıların pandemi öncesi ve süresinde işittikleri ses kaynakları

Pandemi öncesi ve pandemi süresince işitilen seslerin işaretlenmesi istenilen bölümden elde edilen sonuçlar Şekil 3'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde doğa kaynaklı seslerin pandemi süresince işitilme durumlarında değişimlerin minör düzeyde olduğu görülmektedir. İnsan kaynaklı olarak

tanımlanan seslerin tamamı pandemi süresince azalırken, cami Belediye vb. kurumlardan yapılan duyuru sesleri ise artmıştır. Motorlu ulaşım ve elektromekanik sesler olarak gruplandırılan seslerde ise tüm ses kaynaklarında işitilme durumunun pandemi süresince azaldığı görülmektedir.

3.3. Eskişehir

Anket katılımcılarının %14'ini (96 kişi) oluşturan Eskişehir, en fazla katılım sağlayan üçüncü şehirdir. Eskişehir 888 bin nüfusuyla, Türkiye'deki 30 Büyükşehirden biridir[15]. Eskişehir'den katılanların pandemi öncesi akustik ortam memnuniyetleri üzerine verdikleri cevaplarının ortalaması 5.50 iken pandemi sürecinde 6.89 değerine yükselmiştir. Bu durumda; ses ortam memnuniyet düzeyinde genel bir artıştan bahsedilebilmektedir



Şekil 4. Eskişehir'den ankete katılan katılımcıların pandemi öncesi ve süresinde işittikleri ses kaynakları

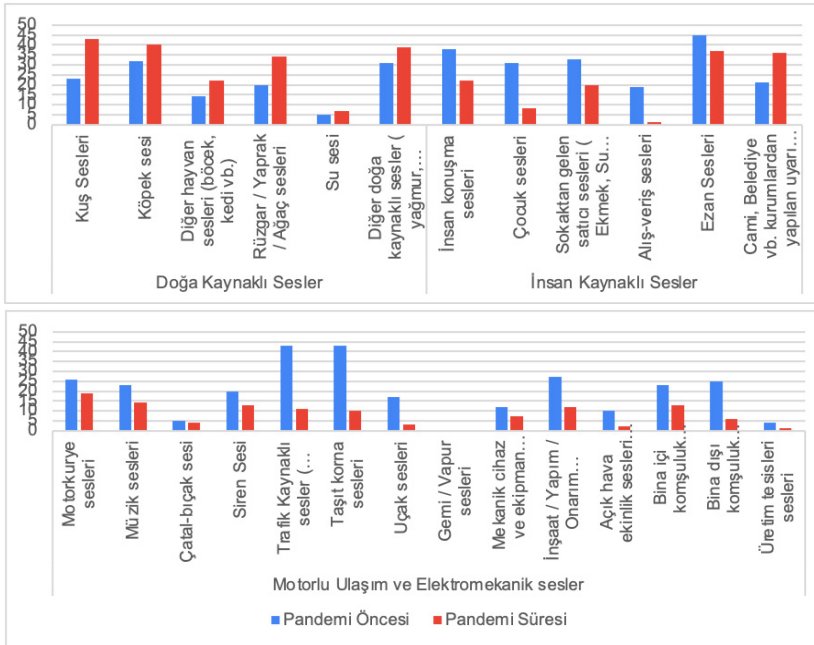
Pandemi öncesi ve pandemi süresince işitilen seslerin işaretlenmesi istenilen bölümden elde edilen sonuçlar Şekil 4'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde doğa kaynaklı seslerin pandemi süresince işitilme durumlarında kuş sesleri dışında, değişimlerin minör düzeyde olduğu görülmektedir. İnsan kaynaklı olarak tanımlanan seslerin tamamı pandemi süresince azalırken, sokaktan gelen satıcı sesleri ve cami Belediye vb. kurumlardan yapılan duyuru

sesleri artmıştır. Motorlu ulaşım ve elektromekanik sesler olarak gruplandırılan seslerde ise tüm ses kaynaklarında işitilme durumunun pandemi süresince azaldığı görülmektedir.

3.4. Ankara

Anket katılımcılarının %11'ini (79 kişi) oluşturan Ankara, en fazla katılım sağlayan dördüncü şehirdir. Ankara 5 milyon 600 bin nüfusuyla, Türkiye'deki 30 Büyükşehir'den biridir[16]. Ankara'dan katılanların pandemi öncesi akustik ortam memnuniyetleri üzerine verdikleri cevaplarının ortalaması 5.10 iken pandemi sürecinde 6.93 değerine yükselmiştir. Bu durumda; ses ortam memnuniyet düzeyinde genel bir artıştan bahsedilebilmektedir.

Pandemi öncesi ve pandemi süresince işitilen seslerin işaretlenmesi istenilen bölümden elde edilen sonuçlar Şekil 5'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde doğa kaynaklı seslerin pandemi süresince işitilme durumlarının arttığı görülmüştür. İnsan kaynaklı olarak tanımlanan seslerin tamamı pandemi süresince azalırken, cami Belediye vb. kurumlardan yapılan duyuru sesleri artmıştır. Motorlu ulaşım ve elektromekanik sesler olarak gruplandırılan seslerde ise tüm ses kaynaklarında işitilme durumunun pandemi süresince azaldığı görülmektedir.



Şekil 5. Ankara'dan ankete katılan katılımcıların pandemi öncesi ve süresinde işittikleri ses kaynakları

İncelenen illerdeki akustik ortam memnuniyet durumlarını ve ses kaynaklarının işitilme durumları arasındaki farklılaşma bölüm içerisinde gösterilmiştir.

4. DEĞERLENDİRME

Anket sonuçlarıyla gözlemlenen dört farklı ildeki sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde tüm şehirlerde ses ortam memnuniyet düzeyinin arttığı görülmüştür. Örneklenen 4 şehir göz önüne alındığında pandemi öncesi ve süresince memnuniyet durumları arasındaki farkın büyük şehirlerde daha belirgin olarak gözlemlenebildiği söylenebilmektedir.

Pandemi öncesi işitilen ses kaynakları üzerine bir değerlendirme yaptığımızda, **doğa kaynaklı** kuş sesi, köpek sesi ve diğer doğa kaynaklı sesler en çok tercih edilen seçeneklerdir. **İnsan kaynaklı sesler**, konuşma sesleri, çocuk sesleri, sokaktan gelen satıcı sesleri ve ezan sesi iken, **motorlu ulaşım ve elektromekanik kaynaklı** sesler ise karayolu trafiği kaynaklı araç sesleri, taşıt korna sesleri ve inşaat yapım onarım sesleri en çok işaretlenen seçeneklerdir. Bu seslerin pandemi öncesi ses ortamda baskın olduğu görülmüştür. Şehirlerin özellikli durumları sebebiyle, tercih edilen ses kaynaklarında farklılaşmalar olmuştur. Eskişehir için ise 1. Ana Jet üssünün kentte yer alması sebebiyle uçak sesi ön plana çıkmaktadır.

Pandemi süresince işitilen ses kaynakları üzerine bir değerlendirme yapıldığında **doğa kaynaklı seslerden** kuş sesi, köpek sesi, rüzgâr/ yaprak / ağaç sesi ve diğer doğa kaynaklı sesler en çok tercih edilen seçeneklerdir. Doğa kaynaklı seslerin pandemi süresince işitilebilirliğinin arttığını söyleyebiliriz. **İnsan kaynaklı seslerden** ezan sesleri ve cami belediye vb. kurumlardan yapılan duyuruların pandemi süresince ses ortamda baskın olduğunu görmekteyiz. Pandemi süresince alınan önlemler kapsamında sınırlı kamusal alan kullanımı, insan kaynaklı seslerin akustik ortamda azalmasını sağlamıştır. **Motorlu ulaşım ve elektromekanik kaynaklı sesler incelendiğinde** ise söz konusu dört il içinde motor kurye sesleri, bina içi komşuluk ve siren sesi baskın ses kaynakları konumuna gelmiştir. Pandemi süresince izlenen “evde kal” yaklaşımı sonucunda, ihtiyaçların eve sipariş edilmesi kent içi motor kurye trafiğini arttırmıştır. Ayrıca çevrimiçi eğitim ve çalışma gibi durumlarla, evde devam eden yaşam bina içi komşuluk kaynaklı seslerin işitilebilirliği artmıştır.

Pandemi öncesi ve pandemi süresince olan ses kaynaklarının işitilebilme durumları karşılıklı değerlendirildiğinde, **doğa kaynaklı seslerin** İstanbul, Eskişehir ve Ankara’da arttığı, Nevşehir’de ise bu artışın diğer illerdeki kadar belirgin olmadığı, hatta bazı ses kaynaklarının işitilebilme durumunun azaldığı görülmüştür. Bu durum Nevşehir’in daha küçük bir yerleşim yeri olma-

sı, yeşil alanlarının sınırlı olması veya yerleşim karakterinin daha farklı olması gibi birçok sebeple ilişkilendirilebilir. Bu sebeple yapılacak diğer çalışmalar ile araştırılması ve değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu durum pandemi sebebiyle azalan motorlu ulaşım ve elektromekanik **seslerin** doğa sesleri üzerindeki maskeleme etkisinin kalkmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Değerlendirme yapılan tüm kentlerde **insan ve motorlu ulaşım/elektromekanik kaynaklı seslerin** pandemi sürecinde işitilme durumları belirgin bir biçimde düşmüştür. Pandemi sürecinde getirilen geniş çaplı yasakların kentsel yaşama dair farklı ve çok sayıdaki ses kaynaklarının ses ortamında var olma; dolayısıyla duyulma durumlarını olumsuz yönde etkilediği çalışma sonucunda görülmektedir.

5. SONUÇ

Covid-19 nedeniyle dünyada ve Türkiye’de ekonomi, eğitim, sosyo-kültürel hayat vb. gibi alanlardaki kısıtlamalar ve bu kısıtlamalarla gelen değişiklikler, kent kullanıcılarının faaliyetlerini dolayısı ile kentin akustik ortamını etkilemiştir. Pandemi öncesi insan kaynaklı sesler, motorlu ulaşım ve elektromekanik kaynaklı seslerin duyulma oranı yüksekken, pandemi sürecinde getirilen yasaklarla bu seslerin duyulma oranı azalmış ve doğa kaynaklı seslerin duyulma oranı artmıştır. Bu artışla beraber akustik ortam memnuniyet düzeyinde de artış gözlenmiştir. Bu artış her şehirde farklı şekillerde gözlemlenmiştir. Yapılan çalışma genel bir değerlendirmeyi hedeflemiştir. Bu sebeple çalışmanın yapılacak alan çalışmaları ile zenginleştirilmesi gerekmektedir. Kentsel işitsel peyzaj değişiminin analizi ve yorumlanması, bu ve bu gibi süreçlerde toplumsal dinamiklerin anlaşılması ve açıklanması açısından önemlidir.

6. KAYNAKLAR

- [1] Schafer, M.R, The Soundscape: Our Sonic Environment and the Tuning of the World. Rochester, Destiny Books, 1994.
- [2] International Organization for Standardization, ISO 12913-1:2014 Acoustics — Soundscape — Part 1: Definition and conceptual framework, Geneva, Switzerland, 2014.
- [3] Tokgöz Gök,Ö ve Özçelik Bilin, A, Kaybolan Sesler: Erken Cumhuriyet Dönemi Eskişehir Fabrikalar Bölgesi İşitsel Peyzajı, 13. Ulusal Akustik Kongresi Ve Sergisi,17-18 Ekim 2019| Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, 2019.
- [4] Aydın, D.Ç, ve Yılmaz, S., Evaluation of Diyarbakir Gazi Street Sound Environment Perception By Soundscape Approach, *Middle East J. Sci.*, vol. 3, no. 2, pp. 15–25, 2017.
- [5] Truax, B., Acoustic Communication. Ablex Publishing Corporation, 1984.
- [6] Ceylan, M., Listening to Turkish Coup Attempt Behind Loudspeakers, Aalto University School of Arts, Master Thesis, 2017.
- [7] Birdsall, C., Nazi Soundscapes-Sound, Technology and Urban Space in Germany, 1933-1945. Amsterdam: Amsterdam University Press, 2012.



- [8] Kytö, M., ve Özgün, Ş.E., Sonic Resistance - Gezi Park Protest and The Political Sounscape of İstanbul, Invisible Landscape, Münster, New York: Waxmann, 2016, pp. 75–95.
- [9] Aletta, F., Brinchi, S., Carrese, S., Gemma, A., ve Guattari, C., Analysing urban traffic volumes and mapping noise emissions in Rome (Italy) in the context of containment measures for the COVID-19 disease, Noise Mapping, Volume 7, pp. 114–122, 2020.
- [10] Aletta, F., Oberman, T., Mitchell, A., Tong, H., ve Kang, J., Assessing the changing urban sound environment during the COVID-19 lockdown period using short-term acoustic measurements, Noise Mapping, Volume 7, pp. 123–134, 2020.
- [11] Asensio, C., vd., A Taxonomy Proposal for the Assessment of the Changes in Soundscape Resulting from the COVID-19 Lockdown, Int. J. Environ. Res. Public Health , <https://doi.org/10.3390/ijerph17124205> pp. 1–9, 2020.
- [12] Manzano, J.V., Pastor, R. G., Quesada, J. A. A., Aletta, F., Oberman, T., Mitchell, A., ve Kang, J., The ‘ sound of silence ’ in Granada during the COVID-19 lockdown, Noise Mapp, vol. 8, no. February, pp. 16–31, 2021.
- [13] İstanbul Valiliği, Nüfus Bakımından Türkiye'nin En Büyük Kenti: İstanbul, 2020. [Online], Erişim Adresi: <http://www.istanbul.gov.tr/nufus-bakimindan-turkiyenin-en-buyuk-kenti-istanbul>, (07.08.2021)
- [14] Nevşehir Nüfusu, [Online], Erişim Adresi: <https://www.nufusu.com/il/nevsehir-nufusu>, (07.08.2021)
- [15] Eskişehir Nüfus, [Online], Erişim Adresi: <https://www.nufusu.com/il/eskisehir-nufusu>, (07.08.2021)
- [16] Ankara Nüfus, [Online], Erişim Adresi: <https://www.nufusu.com/il/ankara-nufusu>, (07.08.2021)



ÇOK AMAÇLI MÜZİK SINIFLARINDA AKUSTİK PROBLEMLERİN KAFES ANALİZİ İLE TANILANMASI

Ahmet Aslan¹

Abdullah Gül Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, Kayseri, Türkiye

e-posta: ahmet.aslan@agu.edu.tr

Akın Oktav²

Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Antalya, Türkiye

e-posta: akin.oktav@alanya.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, çok amaçlı müzik sınıflarındaki akustik problemleri lokal olarak tanılamak için bir prosedür önerilmektedir. Üç farklı okulda birer adet çok amaçlı müzik sınıfı belirlenmiş ve akustik performansları üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu sınıfların her biri, aynı kampüste kurulu olan ilkökul, ortaokul ve lise binalarındadır. Mekânların akustik performansları araştırıldıktan sonra akustik problemlerin tanınmasına dönük bir çalışma da gerçekleştirilmiştir. 3 boyutlu bir geometrinin, yine 3 boyutlu kafes yapılarına bölünmesi ve her bir kafes uzayındaki akustik kalitede sayısal analiz yapılarak akustik niceliklere dair bir değerlendirme yapılması mümkündür. Tanılama için mekânlar önce 2 metre ayrıtlı kafeslere bölünmüştür. Daha sonra sistematik olarak ayrıtların ölçüleri 1 metreye ve sonrasında 0.5 metreye düşürülmüştür. Her bir kafes uzayında T30, EDT, D50, C80, STI değişkenlerinin sayısal değerleri benzetim yolu ile elde edilmiştir. Ayrıtlı ölçüleri azaltıldıkça mekânlardaki yüzeylere göre tanılanan akustik problemleri de lokalize etmek mümkün olmuştur. Lokalde tanılanan problemlerin azaltılması ve akustik performansın iyileştirilmesi için çözüm önerilerinde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Çok amaçlı müzik sınıfı, kafes analizi, akustik performans

IDENTIFICATION OF ACOUSTICAL PROBLEMS IN MULTIPURPOSE MUSIC CLASSROOMS USING GRID ANALYSIS

ABSTRACT

In this study, a procedure to locally identify the acoustic problems of multipurpose music classrooms (MMCs) is proposed. Three MMCs in total are determined in three different schools, and a study is conducted on the acoustic performances of them. These MMCs are in primary, secondary and high school buildings located in the same campus. Next to the determination of acoustic performances of the spaces, a study is conducted to identify the acoustic problems, as well. It is possible to divide a 3D geometry into 3D grids and to make an assessment using the acoustic quantities obtained from the computational analysis that is performed in acoustic cavities of each grid. In the first step of the identification procedure, the spaces are divided into 2 m-grids. The sizes of grids are then systematically reduced to 1 m and 0.5 m. The numerical values of the variables, T30, EDT, D50, C80, STI, are obtained in each grid space through simulations. As the sizes of grids are reduced, it becomes possible to localize the acoustic problems, which are identified according to the surfaces. Solutions are proposed to reduce the locally identified problems and to improve acoustic performance.

Keywords: *Multipurpose music classroom, grid analysis, acoustic performance*

1. GİRİŞ

Eğitim faaliyetlerinin gerçekleştirildiği mekânlarda sesli iletişimin ve bu minvalde eğitimin kalitesini belirleyen temel faktörlerden birisi de akustik performanstır. *Çok amaçlı kullanım için* tasarlanan mekânların akustik performans göstergelerinin mekânın farklı fonksiyonları ile uyumlu olması gerekir. Türkiye’de birçok okulda mevcut olan müzik sınıfları da bu bağlamda değerlendirilebilir. Bu mekânlar, teorik ders anlatımı, vokal ve enstrüman eğitimleri gibi farklı faaliyetler için kullanıldığından çok amaçlı müzik sınıfı olarak anılabilir.

Bu çalışmada, çok amaçlı müzik sınıflarının akustik performans göstergeleri için hangi parametrelerin kullanılması gerektiği, kullanılan parametrelere göre akustik problemlerin nasıl teşhis edilebileceğine dair hususlar sayısal akustik teorisi üzerinden tartışılmaktadır. Teorik tartışmanın yanı sıra üç farklı sınıfta gerçekleştirilen deneysel ve hesaplamalı analizlerin sonuçları da paylaşılmaktadır.

Dizin incelendiğinde, teorik ders anlatımı yapılan sınıflardaki akustik performansı inceleyen çalışmalar olduğu görülmektedir. Aynı şekilde, müzik provası yapılan mekânların akustik performansına dair de çok sayıda çalışma mevcuttur. Ancak, bu çalışmalar çok amaçlı müzik sınıflarının akustik performansını belirlemek için yeterli değildir. Zira, akustik performans göstergeleri belirlenirken sadece teorik ders anlatımı veya müzik icrası dikkate alınmıştır. Çok amaçlı müzik sınıflarının akustik performansı için daha geniş bir parametre seti tanımlanmasına ihtiyaç vardır.

Teorik ders anlatımı yapılan sınıflardaki akustik performansın incelendiği bazı çalışmalarda [1-6] yansıma süresi (*RT*) ve arka plan gürültü seviyelerinin (*BNL*) ölçüldüğü, ölçüm sonuçlarının ise ilgili yönetmelikler ve dizindeki ilgili çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirildiği görülmektedir. Sınıflarda konuşmanın anlaşılabilirliğinin araştırıldığı farklı çalışmalarda [7-13], *RT* ve *BNL* parametrelerinin yanı sıra konuşma iletim indeksi (*STI*) parametresinin de dikkate alındığı görülmektedir. Bu çalışmalara göre *STI*, sınıflarda konuşmanın anlaşılabilirliğinin belirlenmesinde önemli bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Bazı referanslarda [14-16] sınıfların akustik performansı, *RT*, *BNL*, *STI* parametrelerine ek olarak erken sönümleme süresi (*EDT*) ve belirginlik (*D50*) parametreleri de dikkate alınarak araştırılmıştır. Bu çalışmalar farklı boyutlara ve mekânsal konfigürasyonlara sahip hacimlerde konuşmanın anlaşılabilirliğine dair akustik performansa odaklanmaktadır. Anılan çalışmalar teorik ders anlatımına ilişkin akustik performansın değerlendirilmesi için *RT*, *BNL*, *EDT*, *D50* ve *STI* parametrelerinin incelenmesi gerektiğini göstermektedir.

Müzik prova odaları ve müzik uygulama odaları gibi hacim olarak *çok amaçlı müzik sınıflarına benzer mekânlar* üzerinde yapılan çalışmalarda [17-22] kullanılan akustik parametre setleri incelenmiştir. Bu çalışmalarda mekânların yansımam sürelerine (RT) ve hacimlerine odaklanıldığı görülmektedir. Konser salonlarının müzik icrası esnasındaki akustik performanslarını deneysel yöntemlerle inceleyen çalışmalar da dikkate alınmıştır [23-24]. Bu çalışmalarda farklı konser salonlarının akustik performansları, RT, EDT ve netlik (C80) parametreleri *üzerinden* istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve mekânların müzikal *açından akustik özellikleri karşılaştırılmıştır*. Rindel [25] müzik öğretimi, provası ve icrası dahil olmak üzere çeşitli işlevlere sahip müzik odalarının akustik kalitesini iyileştirmek için oluşturulmuş Norveç Standardı NS 8178'i incelemiştir. *Çalışma, müzik odalarının farklı kullanım konfigürasyonları için gereksinimleri vurgulamaktadır. İncelenen çalışmalar çok amaçlı müzik sınıflarının müzik fonksiyonu ile ilgili akustik performansını değerlendirmek için kullanılacak parametrelere ve yöntemlere dair faydalı örnekler sunmaktadır.*

Dizindeki çalışmalar farklı boyut ve özelliklerdeki hacimlerde konuşma ve müzik fonksiyonları ayrı ayrı ele alındığında akustik gereksinimlere dair önemli sonuçlar ortaya koymaktadır. Konuşma fonksiyonu dikkate alındığında öne çıkan hacim akustiği parametreleri RT, EDT, D50 ve STI iken, sadece müzik icrası gerçekleştirilen küçük prova ve uygulama odalarında RT parametresine odaklanılmaktadır. Ancak, *müzik hacimlerinin akustik performansı araştırılırken müziğin netliğinin ve akustik kalitesinin değerlendirilmesi için kullanılan netlik (C80) ve erken sönümlenme süresi (EDT) parametreleri de dikkate alınmalıdır.*

Mevcut çalışmada, çok amaçlı müzik sınıflarının teorik ders anlatımı ve müzik icrası durumlarındaki akustik performanslarını incelemek için RT (T30), EDT, D50, C80 ve STI parametrelerini içeren bir akustik set kullanılmıştır. Farklı okul binalarında yer alan üç adet çok amaçlı müzik sınıfı belirtilen parametre seti üzerinden deneysel ve hesaplamalı yöntemlerle değerlendirilmiştir. Deneysel ve hesaplamalı modellerden elde edilen sonuçlar sentezlenmiş ve güncellenmiş hesaplamalı modeller elde edilmiştir. *Güncellenmiş modeller üzerinden mekânların akustik problemlerin tanınmasına yönelik bir çalışma yürütülmüştür. Tanılama çalışmasında kafes analizi yöntemi kullanılmış ve akustik problemlerin mekân içerisindeki konumlarının spesifik olarak tespit edilmesi hedeflenmiştir. Burada amaç, mekânların akustik performanslarının iyileştirilmesi için yapılabilecek tadilat çalışmalarında kullanılacak veri elde etmek ve lokalize edilmiş problemlerin uygun konfigürasyonlarla çözümlenmesine olanak sağlamaktır.*

2. GÜNCELLENMİŞ HESAPLAMALI MODEL

Çalışma kapsamında ele alınan çok amaçlı müzik sınıflarının her biri aynı kampüste yer alan ilkokul, ortaokul ve lise binalarında bulunmakta, aktif olarak ders anlatımı ve müzik öğretisi (vokal ve enstrümantal) için kullanılmaktadır. Bu üç hacmin fiziksel özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Hacimlerin konuşma ve müzik fonksiyonlarına göre akustik performansı deneysel ve hesaplamalı olarak analiz edilmiş ve sonrasında bu iki analizden elde edilen veriler sentezlenerek hesaplamalı model güncellenmiştir.

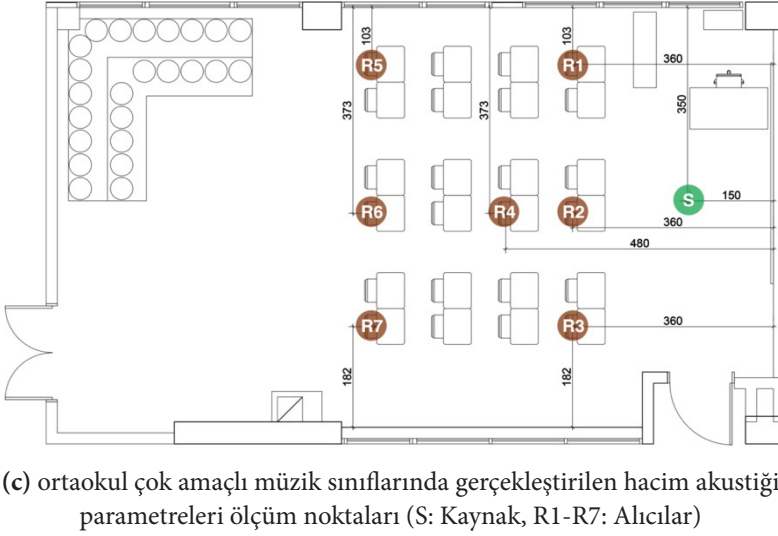
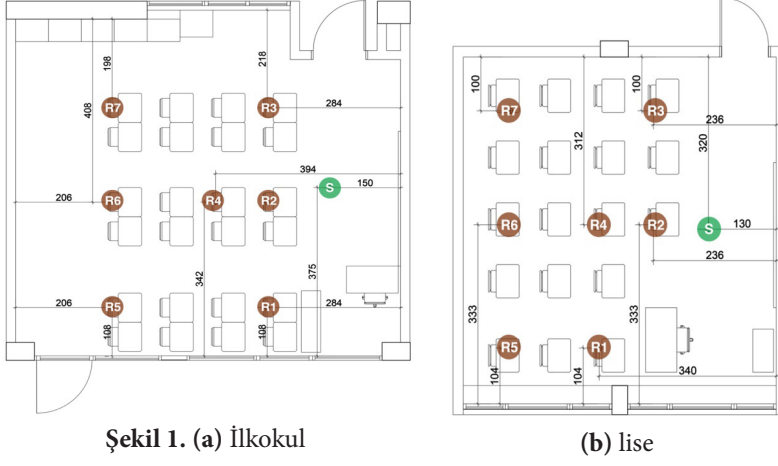
Tablo 1. Çok amaçlı müzik sınıflarının fiziksel özellikleri

Çok amaçlı müzik sınıfı	Uzunluk	Genişlik	Yükseklik	Hacim	Kapasite
İlkokul	8.20 m	7.50 m	2.85 m	171.60 m ³	24 öğrenci
Ortaokul	12.85 m	7.50 m	2.85 m	272.17 m ³	24 öğrenci
Lise	5.90 m	5.20 m	3.10 m	93.9 m ³	18 öğrenci

2.1. Deneysel çalışmalar

Deneysel çalışmalar iki aşamada uygulanmıştır.

- i. İlk olarak sınıfların arka plan gürültü seviyeleri (BNL) günün üç farklı zaman diliminde (sabah, öğle, akşam) uygulanan ölçüm setleri ile 8 oktav bandında (63 Hz – 8,000 Hz) ölçülmüştür. Bu ölçümlerden elde edilen sonuçlar hesaplamalı analiz aşamasında STI parametresinin tespit edilmesi için tamamlayıcı veri olarak kullanılmıştır. Akustik benzetim yazılımında STI parametresinin doğru hesaplanması için ölçülen BNL değerleri yazılımın ilgili ara yüzüne tanımlanmıştır. Ayrıca BNL değerleri kullanılarak hacimlerin NC seviyeleri hesaplanmış ve okullar için belirlenen referans NC eğrileri ile karşılaştırılarak sınıfların arka plan gürültü seviyeleri değerlendirilmiştir. BNL ölçümleri 1996-2 [26] standardına göre titreşim ve spektrum analizörü ile bir ses seviyesi ölçer kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



- ii. Deneysel çalışmanın ikinci aşamasında her üç sınıfta da RT, EDT, D50 ve C80 parametreleri ISO 3382-1 [27] standardındaki prosedürler temel alınarak ölçülmüştür. Ölçümler 6 oktav bandında (125 Hz – 4,000 Hz) dürtü yanıtı testi yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Ölçüm prosedürü ISO 3382-1 standardında belirtilmediği için STI parametresi bu aşamada dikkate alınmamıştır. Ölçümlerde bir adet 12 yüzeyli ses kaynağı, 2 adet mikrofon, 1 adet güç amplifikatörü, 1 adet harici ses arabirimi, Odeon Auditorium yazılımının çalıştığı bir adet dizüstü bilgisayar kullanılmıştır. Ölçümlerde ses kaynağı, öğretmeni temsil etmesi amacıyla yazı tahtasının önünde konumlandırılmıştır (bkz. Şekil 1). Mikrofonlar her sınıfta öğrencilerin oturdukları sıraların bulunduğu alanı temsil

edecek şekilde 7 farklı noktaya konumlandırılmıştır. Kullanılan mikrofonlardan birincisi referans mikrofon olarak ölçüm boyunca R1 alıcı noktasında sabit iken, ikinci mikrofon gezici mikrofon olarak diğer alıcı konumlarına (R2-R6) sırasıyla yerleştirilerek ölçümler tamamlanmıştır (bkz. Şekil 1).

2.2. Hesaplamalı analiz

Hesaplamalı analizde Sketchup Pro modelleme yazılımı kullanılarak her üç hacmin 3B modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller Odeon Auditorium akustik benzetim yazılımına yüklenmiş ve yazılımın malzeme kütüphanesinde yer alan malzemeler kullanılarak yüzeylerin ses yutum katsayıları tanımlanmıştır. Ardından, deneysel ölçümlerde kullanılan kaynak ve alıcılar, özellikleri ve konumları birebir aynı olacak şekilde tanımlanarak benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmanın sonuçları ile benzetim çalışmasından elde edilen ön hesaplama sonuçları RT, EDT, D50 ve C80 parametreleri bazında karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma JND (akustik olarak algılanabilirlik *sınır değeri*) farkına göre yapılmıştır. Buradaki korelasyon kriteri sonuçlar arasındaki farkın 1 JND değerinden küçük olmasıdır. (1 JND değerinden küçük bir fark akustik olarak algılanma sınırının altında olduğundan ihmal edilebilir.) Gerçekleştirilen çalışmaya dair karşılaştırmalar, deneysel ve hesaplama sonuçları arasındaki korelasyonun bazı oktav bantlarında 1 JND'den fazla olduğunu göstermektedir. Bunun temel nedeni, hesaplamalı modellere atanan malzemelerin yutum katsayılarının gerçek durumla tam olarak eşleşmemesidir. Bu nedenle, bir sentez çalışması gerçekleştirilmiş ve hesaplamalı modeller güncellenmiştir. *Güncellenen hesaplamalı modeller kullanılarak STI parametresinin hesaplanması için* de benzetim çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen beş akustik parametrenin değerleri ilgili dizindeki ve standartlarda yer alan referans değerler ile karşılaştırılarak hacimlerin akustik performansları değerlendirilmiştir.

2.3. Sentez

Deneysel ve hesaplamalı verilerin uyumsuzluğu açısından en etkili parametreler, malzemelerin yutum ve saçılma katsayıları gibi akustik özellikleridir. Ancak, saçılma katsayılarının etkisi yutum katsayılarının etkisine kıyasla oldukça azdır [28]. Ön hesaplama sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumlu olmamasından dolayı malzemelerin yutum katsayıları Odeon yazılımının kütüphanesi ve dizindeki ilgili çalışmalardan [29-30] alınan veriler ile güncellenmiş ve belirli frekanslardaki JND değerlerinin 0 ile 1 arasında bir değere düşürülmesi mümkün olmuştur. *Güncellenmiş modeller kullanılarak* gerçekleştirilen benzetim çalışmalarının sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Güncellenmiş modellerle gerçekleştirilen benzetim çalışmalarının sonucunda elde edilen parametre değerlerinin referans değerler ile karşılaştırılması [27, 31-35]

Parametre	İlkokul	Ortaokul	Lise	Konuşma için referans değer	Müzik için referans değer
T30*	1.67 s	1.68 s	1.15 s	0.45 – 0.80 s	0.95 – 1.4 s
EDT*	1.66 s	1.62 s	1.14 s	< 1.0 s	> 1.0 s
D50*	0.40	0.41	0.49	> 0.5	-
C80*	0.95 dB	1.1 dB	2.6 dB	> +2 dB	-1 dB - +3 dB
STI	0.51	0.50	0.58	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	-

*500-1,000 Hz ortalama değer

3. KAFES ANALİZİ

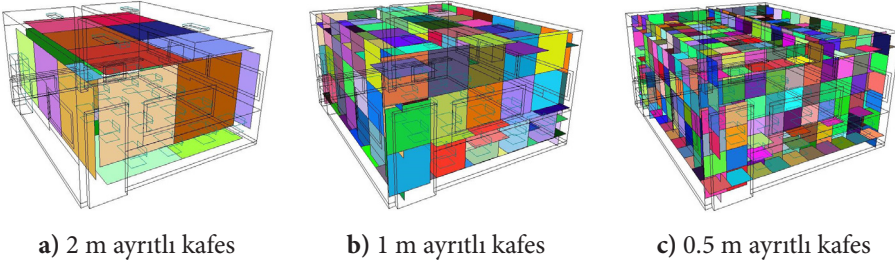
Çok amaçlı müzik sınıflarının akustik performansları orta frekanslardaki (500 – 1,000 Hz) referans değerler baz alınarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeye göre incelenen parametre setinde referans değerlerin dışında kalan bazı sonuçlar tespit edilmiştir. Bu nedenle, bu bölümde akustik problemlerin potansiyel kaynakları araştırılmıştır. Güncellenmiş modeller üzerinde hesaplamalı analizler yapılarak sınıfların akustik performansını olumsuz etkileyen yüzeyler belirlenmiştir. Sınıfların yüzeylerinde kafesler tanımlanmış ve itki girişlerine verilen akustik tepkiler beş oda akustik parametresi (T30, EDT, D50, C80, STI) cinsinden hesaplanmıştır. Bu bölümde, Tablo 2’de verilen referans limitler içinde olmayan değerler akustik problemler olarak tanımlanmıştır.

Kafes analizi yaklaşımı dinleyicilerin yer aldığı alanlardaki dürtü cevaplarının analizinin yanı sıra, hacim içerisindeki akustik problemlerin konumlarının belirlenmesinde de kullanılabilir. Mekânın akustiğini etkileyeceği düşünülen yüzeylerdeki değerlerin analizi ile bu yüzeyler içerisinde akustik problem teşkil eden bölümlerin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu veri mekânda akustik iyileştirme çalışmaları için kullanılabilir. Böylece akustik tasarım öncesinde problem kaynaklarının bölgesel olarak tespiti yapılarak tasarım süreci desteklenebilecektir.

Kafes analizleri Odeon benzetim yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kafes boyutları her bir hacim için sistematik olarak küçültülerek problemler

olduğu tespit edilen alanlar daraltılmaya çalışılmıştır. Böylece, akustik probleme yol açmayan ilgisiz yüzeyler analizlerden çıkarılarak, çalışmanın odak noktası problemlili yüzeylere yönlendirilmiştir. Kafes analizinde daha önce hesaplamalı analiz için kullanılan 12 yüzeyli ses kaynağı aynı konumda ve aynı özellikleri kullanılarak modellere tanımlanmıştır. Tanımlanan akustik problemlerin kaynakları ilgili oldukları yüzeylerle birlikte belirtilmiştir. Kafeslerdeki itki cevapları orta frekanslarda (500 Hz – 1,000 Hz) analiz edilmiştir.

Kafeslerin geometrik şekli küptür. İlk kafes simülasyonunda alıcı kafeslerin ayırıt uzunluğu 2 m olarak belirlenmiştir. Birinci aşamanın sonuçlarına göre, kafeslerin ayırıt uzunluğu sistematik olarak sırasıyla 2 m'den 1 m'ye ve 1 m'den 0.5 m'ye düşürülmüştür. Şekil 2'de kafes alıcı boyutlarının sistematik olarak azaltılması örneklenmiştir.



Şekil 2. Lise çok amaçlı müzik sınıfı iç yüzeylerinde 2 m ayırıtli kafes alıcılarının 0.5 m ayırıtli kafes alıcı boyutuna sistematik olarak düşürülmesi ve alıcıların dağılımı

Kafes alıcılarının sistematik olarak 0.5 m ayırıtli birim küplere düşürülmesi ile gerçekleştirilen nihai benzetim çalışmalarının sonuçlarına göre aşağıdaki gözlemler yapılmıştır:

İlkokul çok amaçlı müzik sınıfı

- T30 parametresinin, 500-1,000 Hz ortalama değeri 1.60 s – 1.70 s arasında değişmektedir. Bu değerler hacim boyunca tutarlıdır. Bu sonuç hacmin düzgün dağılımlı bir ses alanına sahip olduğunu göstermektedir. Ancak zeminin sağ-arka ve orta-sağ bölümleri (PVC malzeme) ve bazı kitaplıkların iç yüzeyleri (18 mm sunta malzeme) 1.85 s – 2.15 s arasında değişen değerlerle akustik açıdan en problemlili alanları ortaya koymaktadır.
- Sınıfın ön-sağ bölümleri ve arka kısmın tamamı, 1.90 s – 2.10 s ile zemin ve tavan yüzeylerinde en yüksek EDT değerlerini göstermektedir. EDT sonuçları, ilk 10 dB'lik sönümlenme aralığı dikkate alındığı için, en problemlili yüzeylerin tanımlanması açısından daha belirleyicidir. Kitaplık raflarının iç yüzeyleri ve bazı dolap kapakları 1.95 s – 2.20 s arasında en yüksek EDT

sonuçlarına sahiptir. Şekil 3'te 0.5 m ayrıtlı kafesler ile gerçekleştirilen analizin 500 Hz oktav bandındaki EDT değerleri gösterilmektedir.

- Sınıfın ön tarafında, D50 parametresinin değeri %50 ve üzerindedir, bu da konuşmanın belirginliği için uygun bir aralıktır. Sınıfın ön bölümlerinden arka bölümlerine doğru D50 değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Rafların iç yüzeyleri, tavanın arka-sağ ve orta-sol bölümleri (taş yünü üzerine alçı panel ve sıva), %20 - %30 arasında değişmekte, bu değerler hacim içerisindeki en düşük D50 sonuçlarını göstermektedir.
- Minimum C80 değerlerine sahip yüzeyler zeminde, arka sıraların çevresinde -2.5 dB ve kitaplıkların iç yüzeylerinde -2.3 dB ile sıralanmaktadır.
- STI sonuçları, hacim boyunca orta seviyeye karşılık gelen homojen bir dağılım grafiği ortaya koymuştur.

Ortaokul çok amaçlı müzik sınıfı

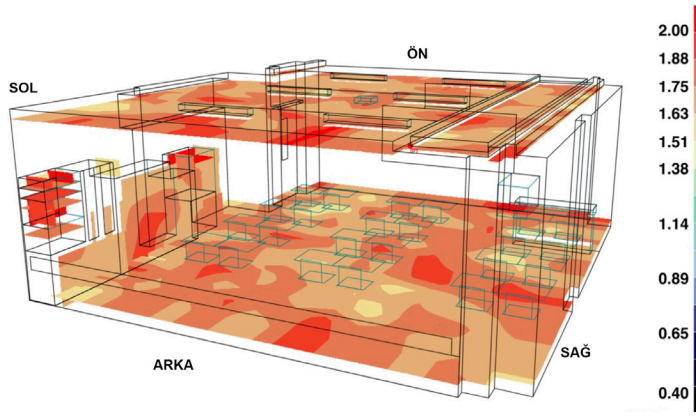
- T30 sonuçları, tavanın orta ve arka bölümlerinde (taş yünü üzerine alçı panel ve sıva) 1.8 s - 2.0 s arasında değişmektedir. Bu değer aralığına, duvarların sağ-ön bölümleri (alçı üzeri boya ve sıva) ve pencerelerin sol-arka bölümleri (6 mm - 8 mm kalınlığında çift cam) de dahildir. Koro platformunun bazı bölümleri 2.2 s değerini göstermektedir. (Koro platformunun konumu Şekil 1.c'de gösterilmiştir.) Şekil 4'te 0.5 m ayrıtlı kafesler ile gerçekleştirilen analizin 1,000 Hz oktav bandındaki T30 değerleri gösterilmektedir.
- EDT sonuçlarının en yüksek olduğu alanlarda değerler 1.9 s - 2.0 s arasında değişkenlik göstermektedir. Bu alanlar, tavanın ve duvarların orta-sağ bölümleri, arka-sol bölümdeki pencerelerin yüzeyleri, zeminin ön bölümleri (PVC malzeme) ve arka bölümdeki bazı öğrenci sıralarının yatay yüzeyleri (Werzalit malzeme) şeklinde sıralanmaktadır.
- Tavanın ve zeminin arka bölümleri %15 - %30 arasında değişen D50 değerlerine sahiptir. Sınıfın sol-arka bölümündeki cam yüzeyler ve orta-sağ bölümdeki duvarlar %20'nin altında sonuç vermiştir. Buna göre hacmin arka bölümlerindeki yüzeylerin D50 parametresi açısından akustik probleme sahip olduğu belirlenmiştir. Ancak, teorik ders anlatımı sınıfının ön bölümünde yapıldığı için bu durum ders anlatımı esnasında konuşmanın anlaşılabilirliğini olumsuz yönde etkilemeyecektir.
- C80 parametresi sınıfın ön bölümünden arka bölümlere doğru azalan değerlerdedir. Hacmin orta bölümlerinde, tavanın, zeminin, duvarların ve pencerelerin yüzeylerinde -3 dB ile -1.5 dB aralığında sonuçlar gözlemlenmiştir. Referans değerler ile kıyaslandığında bunlar gözlemlenen

en problemlili değerlerdir. Bu durum müziğin netliğinin sınıfın orta kısımlarında en düşük seviyede olduğunu göstermektedir.

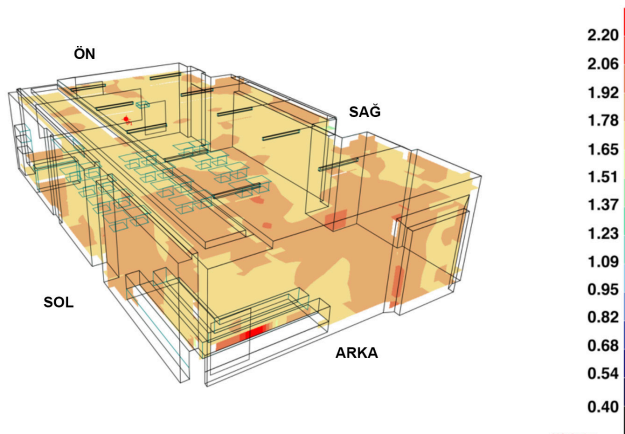
- STI sonuçları sınıfın ön bölümlerinde *orta* değerde iken, arka bölümlerde *zayıf* sonuçlara tekabül etmektedir. Bu açıdan STI parametresinin D50 ile paralel sonuçlar ortaya koyduğu söylenebilir.

Lise çok amaçlı müzik sınıfı

- T30 parametre değerleri 1.00 s – 1.30 s aralığında değişmektedir. Bu değerler konuşma işlevi için referans aralığın üzerinde olmakla birlikte müzik işlevi için referans aralığın içerisinde.

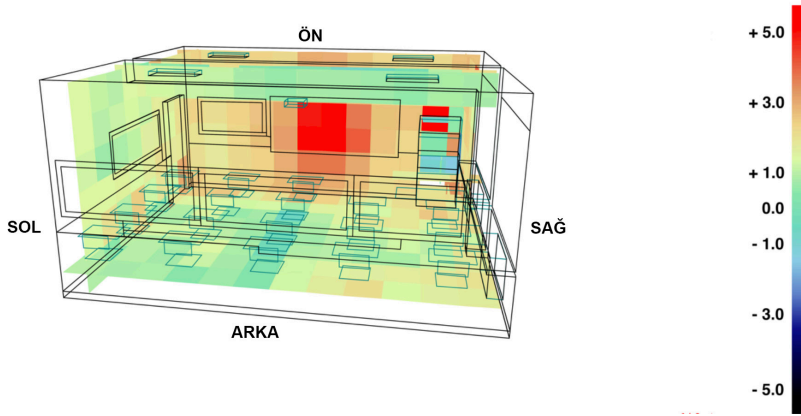


Şekil 3. İlkokul çok amaçlı müzik sınıfı iç yüzeylerinde 0.5 m ayrıtlı kafesler ile gerçekleştirilen analiz için 500 Hz oktav bandındaki EDT değerleri



Şekil 4. Ortaokul çok amaçlı müzik sınıfı iç yüzeylerinde 0.5 m ayrıtlı kafesler ile gerçekleştirilen analiz için 1,000 Hz oktav bandındaki T30 değerleri

- EDT sonuçları 1.00 s – 1.30 s aralığı ile T30 değerleri ile uyumludur. İncelenen yüzeyler hacim genelinde homojen sonuçlar göstermiştir ve problem kaynakları açısından neredeyse eşdeğerdir.
- D50 parametresi sınıfın ön bölümlerinde (yazı tahtası ve ön duvar) %50 – %80 değerler ile referans aralıktadır. Tavan (betonarme üzeri sıva ve boya), zemin (PVC malzeme), ve kitaplıkların iç yüzeyleri (18 mm sunta malzeme) %40'ın altında D50 değerine sahiptir.
- C80 parametresi sınıfın orta ve arka bölümlerinde 0 dB – 3 dB aralığındadır. Bu aralık hem konuşma hem de müzik işlevi için referans limitler arasındadır. Ancak, ön taraftaki pencerelerin cam yüzeylerinde, yazı tahtası ve yazı tahtasının bulunduğu duvar yüzeylerinde C80 değeri referans limitlerin üzerindedir. Şekil 5'te 0.5 m ayrıtlı kafesler ile gerçekleştirilen analizin 500 Hz oktav bandındaki C80 değerleri gösterilmektedir.
- STI parametresi hacmin ön bölümlerindeki yüzeylerin genelinde *iyi* aralıktadır ve hatta çok iyi aralıktadır. Yüzeylerin geri kalanları, sınıf genelinde *orta* değerdedir.



Şekil 5. Lise çok amaçlı müzik sınıfı iç yüzeylerinde 0.5 m ayrıtlı kafesler ile gerçekleştirilen analizin 500 Hz oktav bandındaki C80 değerleri

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, *güncellenmiş modelin elde edilmesinden sonra* akustik problemler kafes analizi tekniği kullanılarak lokal olarak başarılı bir şekilde tanımlanmıştır. Akustik problemlere dair çözüm önerilerinde bulunulabilmesi için problemlerin lokal olarak tanımlanması önemlidir.

Çözüm önerisinin ilk adımı, akustik açıdan problemlili yüzeylerdeki ses yutum katsayılarını güncelleyerek akustik parametre değerlerini referans aralıklara yaklaştırmaktır. Daha sonra, güncellenmiş ses yutum katsayılarına en uygun malzemelerin hesaplamalı modelde ilgili yüzeylere atanması ile sonuca gidilebilir. Bir diğer uygulama da mekân içerisindeki tefriş elemanlarının konumlarının değiştirilmesi olabilir.

Mekânların akustik tasarımının iyileştirilmesi sürecinde kafes analizi çalışmalarından elde edilen veriler kullanılarak yüzeylerdeki güncellenecek malzeme gruplarının seçileceği aralık daraltılabilmektedir. Sonrasında, bu aralıkta yer alan malzemeler arasından denenecek seçenekler ile en uygun malzeme ve uygulama şekline ulaşılabilir. Bu sayede, tasarım sürecinin baştan sona deneme-yanılma yöntemi ile yürütülmesi yerine, daraltılmış ve sonuç almaya yaklaştırılmış bir aralık üzerinden ilerlenmesi daha isabetli sonuçlara ulaşılmasını sağlayabilecektir.

Bu çalışmada, çok amaçlı müzik sınıfları için belirlenen akustik parametre setinin bazı bileşenlerinin birbiri ile çatıştığı gösterilmiştir. Bu bağlamda, bir diğer çözüm önerisi de değiştirilebilir akustik tasarım araçlarından yararlanmak olabilir. Teorik ders anlatımı ve müzik icrası sırasında operasyonel kullanıma uygun olan konfigürasyon seçilerek akustik performans iyileştirilebilir.

5. KAYNAKLAR

- [1] Bottalico, P., Astolfi, A., Investigations into vocal doses and parameters pertaining to primary school teachers in classrooms, J. Acoust. Soc. Am. 131, pp.2817-2827, 2012.
- [2] Ronsse, L.M., Wang L.M., Relationships between unoccupied classroom acoustical conditions and elementary student achievement measured in eastern Nebraska, J. Acoust. Soc. Am. 133, pp.1480-1495, 2013.
- [3] Zannin, P.H.T., Fiedler, P.E.K., Bunn, F., Reverberation time in classrooms – case study: when administrative decision changes acoustic quality, J. Sci. Ind. Res. 72, pp.506-510, 2013.
- [4] Durup, N., Shield, B., Dance, S., Sullivan, R., An Investigation into Relationships between Classroom Acoustic Measurements and Voice Parameters of Teachers, Build. Acoust. 22, pp.225-242, 2015.
- [5] Cantor Cutiva, L.C., Puglisi, G.E., Astolfi, A., Carullo, A., Four-day follow-up study on the self-reported voice condition and noise condition of teachers: relationship between vocal parameters and classroom acoustics, J. Voice. 31, pp.120.E1-120.E8, 2016.
- [6] Pinho, P.G., Pinto, M., Almeida, R.M.S.F., Lemos, L.T., Lopes, S.M., Aspects concerning the acoustical performance of school cafeterias, Appl. Acoust. 136, pp.36-40, 2018.
- [7] Eggenschwiler, K., Room acoustics of classrooms with different shapes, Euronoise 2006, Tampere, pp.1-6, 2006.

- [8] Astolfi, A., Pellerey, F., Subjective and objective assessment of acoustical and overall environmental quality in secondary school classrooms, *J. Acoust. Soc. Am.* 123, pp.163-173, 2008.
- [9] Rabello, A.T.V., Santos, J.N., Oliveira, R.C., Magalhães, M.C., Effect of classroom acoustics on the speech intelligibility of students, *Codas.* 26, pp.360-366, 2014.
- [10] Peng, J., Jiang, P., Chinese word identification and sentence intelligibility in primary school classrooms, *Arch. Acoust.* 41, pp.213-219, 2016.
- [11] Sala, E., Rantala, L., Acoustics and activity noise in school classrooms in Finland, *Appl. Acoust.* 114, pp.252-259, 2016.
- [12] Radosz, J., Speech intelligibility test for polish language – relation to the acoustic properties of classrooms and comparison to other languages, *Arch. Acoust.* 43, pp.129-135, 2018.
- [13] Polewczyk, I., Jarosz, M., Teachers' and students' assessment of the influence of school rooms acoustic treatment on their performance and wellbeing, *Arch. Acoust.* 45, pp.401-417, 2020.
- [14] Tang, S.K., Speech related acoustical parameters in classrooms and their relationships, *Appl. Acoust.* 69, pp.1318-1331, 2008.
- [15] Elkhateeb, A., The acoustical design of the new lecture auditorium, Faculty of Law, Ain Shams University, *Ain Shams Eng. J.* 3, pp.219-235, 2012.
- [16] Escobar, V.G., Morillas, J.M.B., Analysis of intelligibility and reverberation time recommendations in educational rooms, *Appl. Acoust.* 96, pp.1-10, 2015
- [17] Zha, X., Fuchs, H.V., Drotleff, H., Improving the acoustic working conditions for musicians in small spaces, *Appl. Acoust.* 63, pp.203-221, 2002.
- [18] Paek, H., Siebein, G.W., Kim, B., Case studies of acoustical design of rooms for music instruction in schools, *Noise-Con 2003*, Cleveland, Ohio, 2003.
- [19] Osman, R., Designing small music practice rooms for sound quality, *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics (ICA 2010)*, Sydney, pp.1-8, 2010.
- [20] Cunha, I.B., Mattos, T., Stelamaris, R.B., Sound quality in small music classrooms, *Proceedings of 21st International Congress on Acoustics (ICA)*, Montreal, 2013.
- [21] Knöfel, B., Weisheit, L., Troge, J., Musicians and their practice rooms: What do they think about present room acoustics and what would they prefer? *Euronoise 2018*, Crete, pp.2183-2188, 2018
- [22] Pop, C., Osman, R., Knight, J., Music practice rooms: Ambitions, limitations, and practical acoustic design, *Proceedings of International Symposium on Music Acoustics (ISMA)*, Detmold, pp.195-205, 2019.
- [23] Kalkandjiev, Z.S., Weinzierl, S., The Influence of Room Acoustics on Solo Music Performance: An Experimental Study, *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain*, 25, pp.195-207, 2015.
- [24] Pätynen, J., Lokki, T., Concert halls with strong and lateral sound increase the emotional impact of orchestra music, *J. Acoust. Soc. Am.* 139, pp.1214-1224, 2016.
- [25] Rindel, J.H., *New Norwegian standard on the acoustics of rooms for music rehearsal and performance*, Forum Acusticum, Krakow, 2014.
- [26] International Organization for Standardization [ISO]. (2017), *Acoustics - Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 2: Determination of sound pressure levels (1996-2)*



- [27] International Organization for Standardization [ISO]. (2009), Acoustics – Measurement of Room Acoustic Parameters, Part 1: Performance Spaces (3382-1)
- [28] Christensen, C.L., Koutsouris, G., Rindel, J.H., The ISO 3382 parameters: Can we measure them? Can we simulate them? International Symposium on Room Acoustics (ISRA), Toronto, pp.1-26, 2013.
- [29] Seep, B., Glosemeyer, R., Hulce, E., Linn, M., Aytar P., Classroom Acoustics: A resource for creating environments with desirable listening conditions, Acoust. Soc. Am., Melville, 2000.
- [30] Vorländer, M., Auralization, RWTH Aachen, Aachen, 2008.
- [31] Houtgast, T., Steeneken, H.J.M., Plomp, R., Predicting speech intelligibility in rooms from the modulation transfer function, Acta. Acust. united Ac. 46, pp.60-72, 1980.
- [32] Deutsches Institut für Normung [DIN]. (2016), Acoustic Quality in Rooms – Specifications and Instructions for The Room Acoustic Design
- [33] Bistafa, S.R., Granado, M.V., A survey of the acoustic quality for speech in auditoriums, Acoust. Sci. Technol. 15, pp.1-16, 2005.
- [34] Kuttruff, H., Room Acoustics, 5th ed. Spon Press, New York, 2009.
- [35] Odeon: Odeon Help Files, 2020.



NESNEL KONUŞMA ANLAŞILIRLIĞI ÖLÇÜTLERİ ÜZERİNE BİR İNCELEME

Mahmut Sözer¹

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mimarlık Fakültesi, Urla, İzmir, Türkiye

e-posta: mahmutsozer@iyte.edu.tr

Doç. Dr. Emre İlal

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mimarlık Fakültesi, Urla, İzmir, Türkiye

ÖZET

Konuşma anlaşılabilirliği, sözlü konuşma amaçlı herhangi bir hacmin tasarımı için en başta gelen tasarım ölçütüdür. Bugün akustik disiplinde konuşma anlaşılabilirliğini ölçmek üzere yapılan nesnel ölçümlerin hiçbiri, konuşma anlaşılabilirliğini doğrudan ölçmemektedir; Konuşma anlaşılabilirliği, ölçülebilen fiziksel parametreler üzerinden çeşitli modellere göre tahmin edilmektedir. Bu incelemede, günümüzde kabul gören nesnel konuşma anlaşılabilirliği ölçütleri, arka plandaki fiziksel ölçümleri ve tahmine temel oluşturan modelleri üzerinden kronolojik sırayla özetlenecektir.

Anahtar Kelimeler: hacim akustiği, nesnel konuşma anlaşılabilirliği ölçütleri, AI, SII, STI, S/N, ALcons, C50, D50, U50

A REVIEW ON THE OBJECTIVE SPEECH INTELLIGIBILITY METRICS

ABSTRACT

Speech intelligibility is the foremost design criterion for the design of any hall intended for spoken word. None of the objective metrics used in room acoustics today is able to measure speech intelligibility directly. What actually measured is the physical parameters on which the speech intelligibility is predicted using various models. In this review, objective speech intelligibility measures that are accepted today will be summarized in chronological order over their background physical measurements and models that provide the basis for prediction.

Keywords: room acoustics, objective speech intelligibility metrics, AI, SII, STI, S/N, ALcons, C50, D50, U50

1. GİRİŞ

Nesnel konuşma anlaşılabilirliği, konuşmanın dinleyici tarafından doğru tanımlanma yüzdesi olarak tanımlanabilir [1]. Günümüz hacim akustiği alanında kullanılan nesnel konuma anlaşılabilirliği ölçütleri, doğrudan ölçülebilen nicelikler değil, ölçülen fiziksel parametreler üzerinden çeşitli modellere dayalı olarak tahmin edilen bir derecelendirme yöntemleridir. Bu makalede, konuşma anlaşılabilirliği için kullanılan nesnel hacim akustiği ölçütlerinin dayandığı fiziksel parametreler ile söz konusu derecelendirmenin dayandığı modellerin bir özeti sunulmaktadır.

Konuşmaların zor anlaşıldığı ortamlarda, refleks olarak sesimizi yükseltip daha yavaş konuşmaya başlarız. Bunu yaparken konuşmamızdaki sinyal-gürültü oranını artırmayı, hacimdeki yansıma süresini ve ardışık hecelerin birbirini maskeleymesini önlemek için tane tane konuşmayı hesap etmiyoruz; hatta konuşmamızın ses perdesini bile fark etmeksizin değiştiriyoruz. Daha iyi anlaşılması için konuşmanın gürlüğünü ve hızını otomatik biçimde ayarladığımız bu bilinç dışı davranışın arka planında, mesajı ileten sesin basınç (pressure domain) ve zaman (time domain) boyutlarında yaptığımız düzenlemeler olduğunun farkında değilizdir. Özel yanıyla davranışlarımızda kendini gösteren konuşma anlaşılabilirliği, konuşmanın kendisi kadar eskidir. Ancak fiziksel bir ortamda cereyan eden bir konuşmanın anlaşılabilirliğinin nesnel biçimde ölçülmesine ve derecelendirilmesine dair bilimsel dağarımızı oluşturan çalışmaların başlangıcı yirminci yüzyıl başlarıdır. Bu yönde yapılan çalışmalarda söz konusu fiziksel ortamların ilki aslında kapalı bir hacmin akustik ortamı değil, bakır bir teldir.

Konuşma anlaşılabilirliğinin değerlendirilmesine yönelik günümüz bilimsel dağarını oluşturan çalışmalar, telefonun icadıyla başlamıştır. Alexander Graham Bell 1876 yılında yazdığı bir yazıda, tanıdık tümceler dışındaki tümcelerdeki vurguların (artikülasyonların) anlaşılabilirliğinden söz ederken, ünlü hecelerin belirgin olduğunu ancak L ve M harfleri dışındaki ünsüz hecelerin birçoğunun anlaşılmadığını belirtmektedir. Bell bu makalesinde, konuşma seslerini izole ederek artikülasyon anlaşılabilirliğini ölçmek için ilk emsali oluşturmuştur. Oda hacminden kaynaklanan yansıma, bakır tel üzerinden aktarılan konuşma anlaşılabilirliği için bir sorun değildi, ancak 1940 yılına kadar yapılan çalışmalar, bugün hacim akustiğinde kullanılan *AI (Articulation Index)* ölçütü için zemin hazırlamıştır: 1925 yılında Sacia tarafından konuşma gücü faktörlerinin tanımlanması ve ölçülmesi; 1929 yılında Fletcher ve Steinberg tarafından tümce ve hece karşılaştırmalı anlaşılabilirliğin gösterilmesi; 1940 yılında Dunn ve White tarafından *AI* temelinin oluşturulması gibi çalışmalar bu yöndeki adımların ilk kilometre taşları arasındadır [2].

Knudsen [3], 1929 yılında amfilerdeki konuşma anlaşılabilirliğini inceleyen ampirik deneylerini yayınlamıştır. Bu çalışmada, kapalı bir hacim içinde yapılan konuşma tanıma testleri ile gürültünün, konuşma seviyesinin ve yansımanın amfideki konuşmanın algılanmasına olan müşterek etkisi incelenmiş; ünsüzlerin konuşma anlaşılabilirliği üzerinde ünlülere göre tutarlı ve baskın biçimde belirleyici olduğu, artan yansıma süresinin konuşma anlaşılabilirliğini azalttığına ilişkin bulgulara yer verilmiştir.

Konuşma anlaşılabilirliği tahmininde standartlaşan ilk çabalardan biri French ve Steinberg [4] tarafından geliştirilen *AI*, (*Articulation Index - Netlik Göstergesi*) olmuştur. *AI*, frekansın bir fonksiyonu olarak sinyal-gürültü oranı (*S/N*) ile konuşma anlaşılabilirliği arasında ilişki kurmaktadır.

Konuşma anlaşılabilirliği için sayısal bir yöntem tanımlayan ilk çalışma Licklider ve diğerleri [5] tarafından, giriş ve çıkış kanallarındaki örüntüyü karşılaştıran bir yöntem ve yöntem üzerine çalışan bir ölçüm cihazının sunulduğu, örüntü eşleştirme göstergesi, *PCI*, (*pattern correspondence index*) adlı çalışmalarını yayınlamışlardır.

Kryter [6] ve Ball [7], *AI* yöntemini temel alan konuşma iletişim gösterge ölçer – *speech communication index meter - SCIM*, sistemini tariflemiştir. Bu sistemdeki ölçümler, 30dB'lik dinamik aralık içinde 100-7000Hz frekans aralığındaki sinyal-gürültü oranını belirlemeye odaklanmaktadır.

Takip eden çalışmalarda, Lochner ve Burger [8], sinyal – gürültü oranı yöntemi olarak adlandırdıkları ve sesin yansıma örüntüsünün hacim içindeki konuşma anlaşılabilirliği üzerindeki etkisini hesaba katan yöntemlerini yayınlamışlardır.

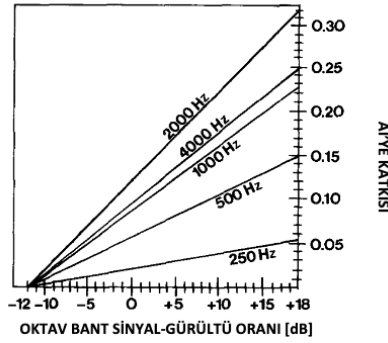
Peutz [9], konuşma anlaşılabilirliği tahmini için *Alcons* (*Articulation Loss of Consonants, Ünsüzlerde Netlik Kaybı*) adını verdiği yöntemini yayınlamıştır. Bu yöntemde konuşma anlaşılabilirliği hesabında doğrudan ses - yansıma sesi oranı (*direct-to-reverberant ratio*), sinyal – gürültü oranı (*signal-to-noise ratio*) ve yansıma süresi (*reverberation time*) ölçümleri kullanılmaktadır.

Houtgast ve Steeneken [10], 1971-72 yıllarında, bir iletim kanalındaki genlik değişkenliğinin iletimi kavramını, diğer bir deyişle modülasyon transfer fonksiyonunu (*MTF*) temel alan ve devinimsel dalgalanmaların ve geçici değişikliklerin yapay test sinyaline dahil edildiği bir yaklaşıma dayalı ilk yöntem olan, *STI* (*Konuşma İletim Göstergesi - Speech transmission index*), yöntemini geliştirmişlerdir. Bu yöntem ile temel olarak, teste tabi tutulan kanal üzerinden aktarılan test sinyali çıkışta analiz edilerek sistemdeki *S/N* ve *AI* kavramına dayalı diğer alt hesaplamalar yapılabilmektedir.

2. NESNEL KONUŞMA ANLAŞILIRLIĞI ÖLÇÜTLERİ

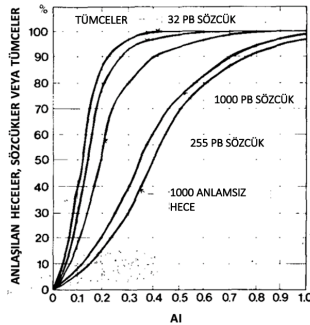
2.1. AI, (Netlik Göstergesi - Articulation Index)

AI, French ve Steinberg [4] tarafından telefon iletişimindeki konuşma anlaşılabilirliğini ölçmek için geliştirilmiştir. Kavramın ana fikri kulağa gelen sesteki konuşma ve gürültü yeğinliklerinin (intensity) frekans bazında oranlanmasıdır. Daha sonra Kryter tarafından ele alınarak geliştirilen yöntem 100-7000Hz frekans ve 30dB dinamik aralıkta, gürültü, maskeleme, düşük frekans filtreleme ve frekans kaymaları gibi çeşitli iletim koşulları altında konuşma anlaşılabilirliğini tespit etmek için kullanılmaktadır. [5] Şekil 1, oktav bantları bazında sinyal-gürültü oranının AI'ye katkısını göstermektedir.



Şekil 1. Sinyal-Gürültü Oranının Oktav Bantlarına Göre AI'ye Olan Katkısı [6]

Şekil 2, AI ile çeşitli konuşma tanıma testleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Bu grafik, AI'nin sayısal değerinin konuşmanın anlaşılma yüzdesine çevrilmesi için kullanılmaktadır. Puanlamanın, sözel dilbilgisi ve bağlam, tümce yapısı, sözcük dağarı ve sözcüklerdeki hece sayısı gibi çeşitli kısıtları olduğu belirtilmektedir.



Şekil 2. AI ile Farklı Konuşma Testleri Arasındaki İlişki [6]

AI ile konuşma tanıma yüzdesi arasındaki oranın doğrusal olmadığı görülmektedir; Şekil 2'deki grafiğe göre bir deyişle AI 0.1 – 0.4 aralığının konuşmayı doğru anlama yüzdesindeki ağırlığı, AI 0.4-1.0 aralığına göre oldukça farklıdır. AI ile ilgili önemli kısıtlamalardan biri yöntemin hacimdeki yansımasını hesaba katmamasıdır. Dolayısıyla bu ölçüt, konuşmacı veya hoparlör ile dinleyici arasındaki mesafenin, kritik mesafenin altında (doğrudan ses alanı) olması halinde güvenilirdir. [11]

AI yöntemi ANSI Standart S3.5 1969 yılı standardında önerilen yöntemlerden biri olarak, konuşma anlaşılabilirliği tahmini için standartlaşan ilk yöntemdir. Yöntem daha ileriki çalışmalarla rafine edilip hacimdeki yansımanın konuşma üzerindeki etkisi dikkate alınmış ve *SII (Konuşma Anlaşılabilirlik Göstergesi, Speech Intelligibility Index)* geliştirilerek ANSI 3.5 1997 standardında sunulmuştur. *SII* üzerindeki çalışmalar, lineer olmayan bozulmaların konuşma anlaşılabilirliğine etkisi noktasında devam etmektedir. [12]

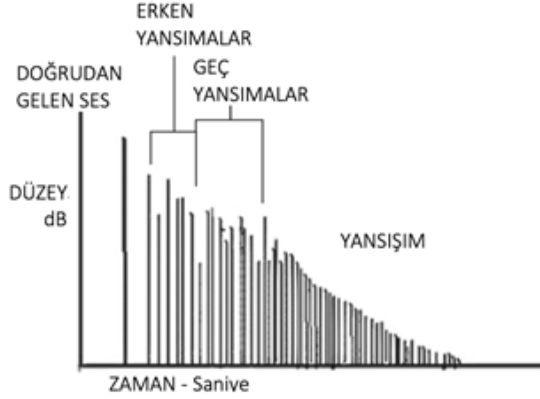
2.3. S/N (Sinyal-Gürültü Oranı, Signal-to-Noise Ratio)

Konuşma anlaşılabilirliğini, akustik enerji oranlarına göre ele alan yaklaşımlar 1950'lerde Haas [13] tarafından ortaya konan bulgulara dayanmaktadır. Öncesinde, 1935 yılında yapılan çalışmalarda Aigner ve Strutt [14], hacim akustiği ve ortam gürültüsünün müşterek etkisini nicel olarak ifade eden ilk formülü (1) önermişlerdir.

$$Q = \frac{E_d + E_e}{E_l + E_n} \quad (1)$$

E_d doğrudan ses enerjisi, E_e yansıyan sesin enerjisinin yararlı kısım (kulağa doğrudan sesten sonra 1/16 s' den geç gelmeyen kısım), E_l yansıyan ses enerjisinin kalan kısmı (kulağa doğrudan ulaşan sesten 1/16 s sonra gelen kısım) ve E_n gürültü enerjisi. Aigner ve Strutt bu ölçüte *İzlenim (Impression)*, Q , adını vermişlerdir. [15]

Hacimdeki ses genel olarak, doğrudan ulaşan (direct) ses ile yansıma alanı (reverberant) sesi olarak ikiye ayrılmakla birlikte, yansımaların erken ve geç olarak alt bölünüşleri, öznel izlenim ve konuşma anlaşılabilirliği bakımından önem arz etmektedir. Şekil 4'de gösterilen ses alanı bileşenleri şu şekildedir: Doğrudan ulaşan ses , erken yansımalar (dinleyiciye 35-50ms aralığında ulaşan yansımalar), geç yansımalar (dinleyiciye 50-100ms aralığında ulaşan yansımalar) ve yansıma (100ms sonrasında ulaşan yoğun yansımalar). [16]



Şekil 3. Ses alanı bileşenleri [16]

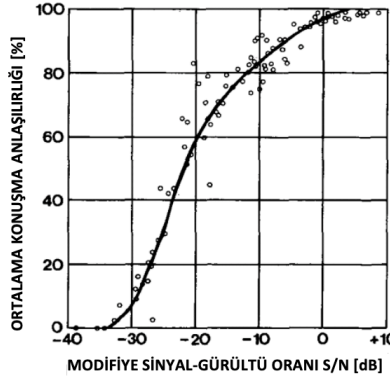
Lochner ve Burger [8], hacim içindeki yansıma, gürültü ve yansıma örüntülerinin müşterek etkisinin konuşma anlaşılabilirliği üzerindeki etkilerine odaklandıkları çalışmalarında, erken ve geç yansımaların enerjilerini konuşma anlaşılabilirliği için yararlı (useful) ve zararlı (detrimental) bileşenler olarak sınıflandırarak yararlı-zararlı ses oranı (useful-to-detrimental sound ratio) kavramını geliştirmişlerdir. Yararlı yansımalar olarak adlandırdıkları bölüm, ilk sesin, işitme mekanizması tarafından yansımalar ile kaynaştırılarak bir bütün olarak işitildiği bölümdür. Bu işitme mekanizması, kırpışan bir ışığın görme mekanizması tarafından ışığın kırpışma hızına bağlı olarak sürekli bir ışık olarak algılanması ile benzeşmektedir. Yapılan araştırmada, yansımaları için ilk 95ms'lik aralığı kaynaşma periyodu olarak bulgulamışlar ve bu aralığın ilk 30-40ms'lik bölümü tam kaynaşma, 40-95ms'lik bölümü ise kısmi kaynaşma periyodu olarak belirlenmiştir. 95ms sonrasında varan enerji ile incelenen sinyal harici sebeplerden, örneğin ortam gürültüsü, kaynaklanan tüm enerji gürültü olarak ele alınmıştır. Araştırmacılar yararlı ses enerjisi için aşağıdaki bağıntıyı (2) tanımlamışlardır [11]:

$$E_u = 10 \log \int_{t=0}^{95ms} \alpha(p, t) p^2(t) dt \quad (2)$$

Burada α , ilk sesin seviyesine ve gecikmeye bağlı seviyenin bir fonksiyonu olarak kaynaşan yansıma kesri, $p(t)$ ses basıncının anlık değeri ve E_u "yararlı" (useful) ses enerjisidir. Bu yöntemde gürültü, düzenli gürültü (steady-state noise) olarak ele alınmaktadır. Yararlı-zararlı ses oranı kavramı Latham [17] tarafından dalgalanma gösteren gürültü hesaba katılacak şekilde geliştirilerek aşağıdaki bağıntı tanımlanmıştır:

$$\frac{S}{N} = 10 \log_{10} \frac{\int_{t=0}^{95ms} \alpha(p,t) p^2(t) dt}{\int_{95ms}^{\infty} p^2(t) dt + p_{PNC} 2T} \quad (3)$$

Burada p_{PNC} , PNC-biçimli arka plan gürültüsünün ortalama azami seviyesi; T , konuşma anlaşılabilirliği test pasajının süresidir. Yansımanın, yansıma aralığının ve arka plan gürültüsünün hesaba katıldığı S/N yönteminin konuşma anlaşılabilirliği ile ilişkisi Şekil 3’de görülmektedir.



Şekil 4. S/N ile konuşma anlaşılabilirliği arasındaki ilişki [17]

S/N yönteminin, öznel konuşma anlaşılabilirliği testleriyle ilintisi kuvvetli görünmektedir. Bununla birlikte, bu yöntemde 1000Hz’deki ses basınç seviyeleri kullanıldığından yansıma örüntüsünün frekans yelpazesindeki değişkenlikleri hesaba katılmamaktadır. Dolayısıyla bu yöntem ile konuşma anlaşılabilirliği tahmin edilirken, koşulların ve kabullerin yönteme uygunluğu sonuçların doğruluğu bakımından önemlidir.[11]

Konuşma anlaşılabilirliği bakımından erken ve geç yansımaların bölünüşleri ile ilgili farklı görüşler vardır. Kimi araştırmacılar ilk 50ms’nin konuşma anlaşılabilirliği için uygun olduğunu ileri sürmüşlerdir. Thiele’nin D ve Ahnert’in $C50$ ölçütleri doğrudan ulaşan sestten sonraki ilk 50ms’lik erken yansımaları temel almaktadır. Birbirine çok benzer olan ve *Netlik (Definition)* olarak anılan bu iki ölçüt aşağıdaki bağıntılarla verilmektedir [16].

$$D = \frac{E_{50}}{E_{\infty}} \quad (4)$$

$$C_{50} = 10 \log \left(\frac{E_{50}}{E_{\infty} - E_{50}} \right) dB \quad (5)$$

D ve $C50$ ölçütlerinin temel aldığı hesaplama ilkesinin, 1935 yılında Aigner ve Strutt tarafından verilen bağıntı (1) ile benzerliği dikkat çekicidir. Her iki yöntemin de hacimdeki arkaplan gürültüsünü hesaba katmadığına, diğer bir deyişle ses bileşenlerinin sadece ilgili sinyale ait olduğuna dikkat edilmelidir.

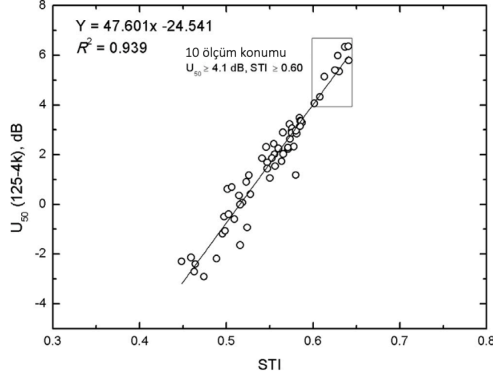
C_{50} , erken ve geç yansımaların seviyesi cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$C_{50} = L_{p,early} - L_{p,late} \quad (6)$$

Bradley [18], [19] S/N ve $C50$ ilkelerini temel alarak $U50$ ve $U80$ ölçütlerini geliştirmiştir. Bradley, yukarıdaki bağıntıyı gürültü bileşenini kapsayacak şekilde geliştirerek aşağıdaki $U50$ bağıntısını öne sürmüştür.

$$U_{50} = L_{p,early} - L_{p,late+noise} \quad (7)$$

Bu modelde, gürültünün hacim içinde özdeş bir biçimde dağıldığı kabul edilmektedir. Son yıllarda dersliklerde, yansıma süresi ve arkaplan gürültüsünün müşterek etkisinin nesnel konuşma anlaşılabilirliği ölçütleri arasında kıyaslamalı olarak ele alındığı çalışmalarda [20], [21], [22], [23], [24], $U50$ parametresinin öznel konuşma anlaşılabilirliği testleri ve STI , (*Konuşma İletim Göstergesi - Speech Transmission Index*), STI , gibi standartlaşmış diğer bir nesnel konuşma anlaşılabilirliği parametresi ile ilintisinin kuvvetli olduğunu göstermiştir. Bu araştırmadaki yöntemleri takip eden ve özellikle üniversite dersliklerindeki aktif dersler sırasında yapılan yakın tarihli çalışmalar, [25], [26], [27], önceki çalışmaların bulgularını desteklemektedir. Şekil 5'de verilen grafikte, U_{50} ile STI arasındaki doğrusal ilişki görülmektedir.



Şekil 5. 11 Üniversitenin 15 dersliğinde yapılan ölçümlere göre hesaplanan U50(125–4 k) - STI değerleri [27]

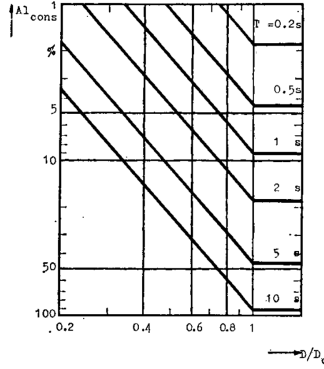
STI ile U50 arasındaki ilintiyi ortaya koyan çalışmalardan hareketle, dersliklerdeki konuşma anlaşılabilirliğine yönelik tasarımlarda optimal yansım süresini veya optimal toplam yutuculuğu belirlemek üzere U50 parametresini odağa koyan bir çalışmada [28] araştırmacılar mimari yüzeylerin yutuculuğunun hedeflenen U50 parametresine dayalı olarak belirlendiği bir yaklaşım sunmuşlardır.

2.3. Al_{cons} , (Ünsüzlerde Netlik Kaybı - Articulation Loss of Consonants)

Peutz'un [9], yansısız oda ve farklı hacim akustiği koşulları altında CVC (ünsüz-ünlü-ünsüz) sözcük listesi kullanarak yaptığı konuşma tanıma deneylerinde ünsüzlerdeki vurgu kaybının konuşma anlaşılabilirliğinde belirleyici olduğunu keşfetti ve aşağıdaki ampirik bağıntıyı önermiştir.

$$Al_{cons} = 0.652 \left(\frac{r_{QH}}{r_H} \right)^2 RT \% \quad (8)$$

Bağıntıda, r_{QH} , ses kaynağı (konuşmacı) ve dinleyici arasındaki mesafe; r_H , yansım yarıçapı veya yönlü ses kaynağı olması durumunda kritik mesafe r_R ; RT, yansım süresidir. Şekil 6'da farklı yansım sürelerindeki D/D_c oranı (konuşmacı ile dinleyici arasındaki mesafe-kritik mesafe oranı) ile Al_{cons} arasındaki ilişki görülmektedir.



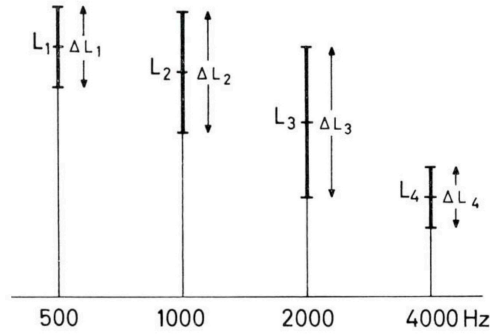
Şekil 6. Farklı yansımam sürelerindeki D/D_c oranı ile Al_{cons} arasındaki ilişki [9]

Yöntem kolay bir hesap imkanı sağlamakla birlikte, sadece 2kHz bandını kullanmaktadır. Yönlülüğün farklı konuşmacılara bağlı olarak pek değişmediği durumlar için kabul edilebilir doğrulukta sonuçlar vermekle birlikte yöntemdeki diğer bir kısıt, S/N seviyesinin belirli olamamasıdır. Dolayısıyla bu ölçütün kullanıldığı şartlar doğru sonuçlar elde etmek bakımından dikkat gerektirmektedir. [11], [16]

2.4. STI (Konuşma İletim Göstergesi - Speech Transmission Index)

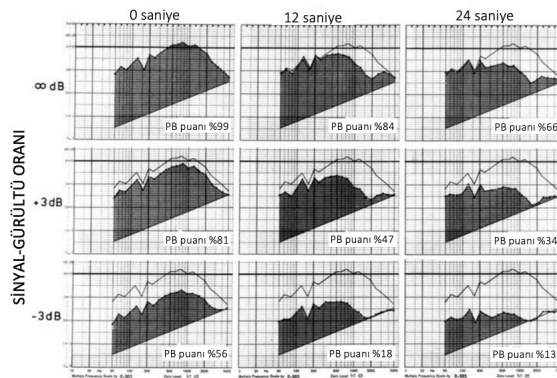
STI yönteminin geliştirilmesi, 1970'lerin başında Al_{cons} ile geliştirilmesi aynı yıllara denk düşer ve her iki araştırma da Hollanda'da yapılmıştır. Ancak Al_{cons} , öznel konuşma tanıma testlerine dayalı bir tahmin yöntemi olarak geliştirilirken, STI bir ölçüm yöntemi olarak geliştirilmiştir. Yöntem, kaynak-oda(ses iletim yolu)-alıcı güzergahını bir iletim kanalı olarak ele alır ve özel bir test sinyali kanalı kat ederken kiplenim (modülasyon) derinliğindeki azalmayı ölçer. [16]

STI ölçümünün temel ilkesi, konuşmaya benzer yapay bir sinyalin, kiplenim (modülasyon) frekansındaki azalmanın ölçülmesine dayanır. İlk çalışmalarda, tam oktav bantlarında genlik kiplenimli (10Hz) dört frekans bileşeni kullanılmış ve iletim kanalından aktarılan bu sinyalin 10Hz kiplenimindeki azalma gözlenerek gösterge (index) hesaplanmıştır, Şekil 7; burada ΔL , 10Hz seviye dalgalanmalarını göstermektedir. (ref)



Şekil 7. STI geliştirilme sürecinde kullanılan ilk test sinyali (ref)

Araştırmacılar, yansımanın, konuşmadaki hızlı dalgalanmaları daha fazla yavaş dalgalanmaların daha az etkilediği bilgisinden hareketle, bu durumu daha iyi ölçmek için bir konuşma zarfı (speech envelope) arayışına girdiler. Kiplenim (modülasyon) derinliğindeki azalma miktarının, modülasyon frekansının yanı sıra çeşitli oda etkilerinin bir fonksiyonu olduğunu gözlemleyerek 0.25Hz-25Hz (0.5-16Hz olarak güncellenmiştir) aralığında bir kiplenim aktarma fonksiyonu, MTF, (modulation transfer function) tanımlamışlardır. MTF, frekans bazında giriş sinyali ile oda etkilerinin (gürültü, yansıma) de eklendiği çıkış sinyali arasındaki bağıntıyı göstermektedir. MTF, diğer bir deyişle, konuşma zarfı yelpazesinde gözlenen azalmanın, orijinal sinyal üzerinde sebep olduğu sinyal-gürültü oranı ve yansıma kaynaklı bozulmalarına bağlı olarak tanımlanan zayıflama filtresidir (attenuation filter). Bu ilke, farklı gürültü-sinyal-oranı ve yansıma süresi koşullarında sesçil olarak dengelenmiş (PB) sözcük listeleriyle yapılan konuşma tanıma testlerinden elde edilen puanlama ile eşleştirildiği grafiklerde, Şekil 8, görülmektedir.



Şekil 8. Çeşitli bozulmaların konuşma zarfı üzerindeki etkisi ile konuşma anlaşılabilirliği arasındaki ilişki [10]

Grafiklerde görülen üst eğri orijinal konuşma zarfını, taralı alt kısım ise bozulma etkilerinden sonra konuşma anlaşılabilirliği için yararlı olan (gürültü üstünde kalan) bölümü göstermektedir. [10]

STI-14, STI-3, STITEL, STIPA ve RASTI, aynı metodun farklı uygulama amaçları için geliştirilmiş versiyonlarıdır. Hacim Akustiği Konuşma İletim Göstergesi, (Room Acoustics Speech Transmission Index) olarak kullanılmış olan RASTI'de 500Hz ve 2kHz bantları kullanılmaktadır. RASTI, artan işlemci kapasitesi dolayısıyla günümüzde terk edilmektedir. 7 oktavda 14 kiplenim frekansı ile ölçüm yapan güncel STI, standartlaşmış (ISO9921, IEC 60268-16) bir yöntem olarak el cihazları ve yazılım tabanlı ölçüm düzenekleri ile tahmin yazılımlarından yaygın olarak kullanılmaktadır.

Konuşma İletim Göstergesini (STI), diğer nesnel konuşma anlaşılabilirliği ölçütlerinden ayıran temel nokta, kuramsal bir tahmin aracı değil, özel bir test sinyalinin kullanıldığı bir ölçüm aracı olarak geliştirilmiş olmasıdır. Bununla birlikte tahmin için kullanılan diğer nesnel ölçütlerle olan ilintisi üzerine farklı araştırmacılar tarafından çeşitli bağlantılar öne sürülmüştür.

3. SONUÇ

Nesnel konuşma anlaşılabilirliği ölçütleri farklı fiziksel parametreler ve sayısal modellemeler üzerinden yapılan hesaplamalara dayanmaktadır. Model ve ölçülen parametrelerindeki çeşitliliğe karşın tümünün ortak noktası, parametrelerin aldığı sayısal değerlerin konuşma anlaşılabilirliği bakımından hangi dereceye karşılık geldiği, dinleyiciler ile yapılan konuşma tanıma testlerine dayanmasıdır. Nesnel konuşma anlaşılabilirlik ölçütlerinin derecelendirilmesi, çeşitli koşullar altında yapılan öznel tanıma testleri ile o koşulları temsil eden fiziksel nicelikler arasında bağlantı kurularak elde edilmektedir. Dolayısıyla bir nesnel parametrenin geçerliği, geliştirilmesi ve derecelendirilmesi için kabul edilmiş fiziksel koşullar ile ilişkilidir.

AI yöntemi hacimdeki yansımın süresini hesaba katmadığı için hacim akustiği bağlamındaki güvenilirliği şekilde kaynak – alıcı arasındaki mesafeye bağlıdır; *ALcons* yöntemi sadece 2kHz bandını temel almaktadır ancak derecelendirmenin hangi sinyal-gürültü-oranı aralığı için geçerli olduğu belli değildir; enerji oranlarını temel alan yöntemler arasında, Lochner-Burger *S/N* yönteminde hacimsel etkiler dikkate alınmakla birlikte yöntem yalnızca 1000Hz bandını temel almaktadır; *C50* bir veya üç oktav bandında erken-geç yansıma oranlarını temel alırken arka plan gürültüsünü hesaba katmamaktadır. Bradley tarafından *C50* ve *S/N* dayalı geliştirilen *U50* yöntemi, yansımın süresi, arka plan gürültüsü, sinyal-gürültü oranı gibi hacimsel etkileri dikkate

almaktadır ancak arka plan gürültüsünün tüm hacimde düzenli bir halde (steady-state) olduğunu varsaymaktadır. *STI* yöntemi, lineer olmayan arka plan gürültüsü dahil hacimdeki etkileri dikkate alan güvenilir bir yöntem olarak öne çıkmakla birlikte, mevcut hacimlerin ölçülmesi için bir ölçüm yöntemi olarak geliştirilmiştir; gerçek ölçümler dışında tahmin amaçlı kullanımında hacim akustiği benzetim yazılımlarında güvenilir sonuçlar almak mümkündür. Ancak akustik modellemenin, özellikle ses kaynağı gücü yönlülüğü ve alıcılar arasındaki modellemenin dikkatli yapılması sonuçların doğruluğunda önemli rol oynamaktadır. Aşağıdaki tabloda nesnel konuşma anlaşılabilirliği ölçütlerinin temel özellikleri özetlenmiştir.

Tablo 1. Nesnel Konuşma Anlaşılabilirliği Ölçütlerinin Karşılaştırması

Ölçüt	Frekans Yelpazesi	Hacimdeki Yansıma Dikkate Alınmıyor	Hacim Arka Plan Gürültüsü Dikkate Alınmıyor	Tahmin için Hesaplama Olanağı
AI	100Hz-7kHz	X	X	✓
Alcons	2kHz	✓	X	✓
S/N	1kHz	✓	✓	✓
C50	1kHz	✓	X	✓
U50	125Hz-4kHz	✓	✓	✓
STI	125Hz-4kHz	✓	✓	Benzetim Yazılımı ile

Yansıma süresinin tasarımlarda halen birincil ölçüt olarak kullanılmasının temel nedeni yüzeylerin akustik özellikler ve hacmin geometrisi üzerinden kolayca hesaplanabilmesidir. Ancak yansıma süresi hesabının, yayınık alan (*diffuse field*) için geçerli olduğu, kısa yansıma süreli küçük hacimler için geçerli olmadığı unutulmamalıdır. Diğer bir husus, yansıma süresi hesabında sönme eğrisinin tümünü dikkate alınmaktadır, oysa enerji-oranlarına dayalı tahmin yöntemlerinde ilk 50ms ile sonrası arasındaki oranların dikkate alınması konuşma anlaşılabilirliği bakımından Erken Sönme Süresinin (EDT), T20 veya T30'a göre daha belirleyici olabileceğine işaret etmektedir. Ne var ki EDT'nin güvenilir olarak elde edilmesi mevcut hacimde ölçüme bağlıdır. Konuşma anlaşılabilirliğinin, sözlü konuşma amaçlı herhangi bir hacmin tasarımı için en başta gelen tasarım ölçütü olduğu gerçeğinden hareketle, akustik benzetim yazılımlarından gözü kapalı alınan çıktılar yerine, tasarımcıya geometri ve akustik malzeme yerleşimi bakımından dolaysız rehberlik edecek bir seçenek olarak U50 öne çıkmaktadır. Bu incelemede değinilen ve son yirmi yıla yayılan araştırmalar, U50 ile *STI* arasındaki ilintinin tutarlı ve kuvvetli olduğunu göstermektedir. Söz konusu çalışmalarda 125Hz-4kHz aralığında U50

ile *STI* derecelendirmeleri arasında sayısal eşleştirmeler sunulmuştur. Buna ek olarak, *U50* parametresinin kolay hesaplanabilir oluşu ile birlikte, hacmin geometrisi, yüzeylerin ses yutuculuğu, arka plan gürültüsü ve sinyal-gürültü oranı üzerinden *U50* değerlerinin elde edildiği çalışmalar, konuşma anlaşılabilirliğine odaklı hacimlerin tasarımında tasarımcıya dolaysız bir araç vaat etmektedir.

4. KAYNAKLAR

- [1] W. Yang, "Optimizing Acoustical conditions for speech intelligibility in classrooms," 2006.
- [2] C. W. (Compiler) Nixon, "Symposium on Speech Communication Metrics and Human Performance.," Ohio: Armstrong Laboratory, Crew Systems Directorate Biodynamics and Biocommunications Division Human Systems Center Air Force Materiel Command, 1995, pp. 3-18.
- [3] V. O. Knudsen, "The hearing of speech in auditoriums," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 1, no. 1, pp. 56-82, 1929.
- [4] N. R. French and J. C. Steinberg, "Factors governing the intelligibility of speech sounds," *The journal of the Acoustical society of America*, vol. 19, no. 1, pp. 90-119, 1947.
- [5] H. J. Steeneken, "Subjective and objective intelligibility measures," in *Speech Processing in Adverse Conditions*, 1992.
- [6] K. D. Kryter, "Methods for the calculation and use of the articulation index," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 34, no. 11, pp. 1689-1697, 1962.
- [7] K. D. Kryter and J. H. Ball, "SCIM: A Meter For Measuring The Performance of Speech Communication Systems," 1964.
- [8] J. Lochner and J. Burger, "The influence of reflections on auditorium acoustics," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 1, no. 4, pp. 426-454, 1964.
- [9] V. Peutz, "Articulation loss of consonants as a criterion for speech transmission in a room," *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 19, no. 11, pp. 915-919, 1971.
- [10] T. Houtgast, H. Steeneken, and S. Van Wijngaarden, "Past, present and future of the Speech Transmission Index," 2002.
- [11] H. G. Smith, "Acoustic design considerations for speech intelligibility," *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 29, no. 6, pp. 408-415, 1981.
- [12] J. Ma, Y. Hu, and P. C. Loizou, "Objective measures for predicting speech intelligibility in noisy conditions based on new band-importance functions.," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 125, no. 5, pp. 3387-405, 2009.
- [13] H. Haas, "The influence of a single echo on the audibility of speech," *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 20, no. 2, pp. 146-159, 1972.
- [14] F. Aigner and M. Strutt, "On a physiological effect of several sources of sound on the ear and its consequences in architectural acoustics," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 6, no. 3, pp. 155-159, 1935.
- [15] S. R. Bistafa and J. S. Bradley, *A comparative study of speech intelligibility metrics and the derivation of optimum reverberation time and maximum background-noise level for classrooms*. Institute for Research in Construction, 1999.



- [16] P. Mapp, "Designing for Speech Intelligibility," in *Handbook for Sound Engineers*, Ballou, G., Ed. Focal Press, 2008, pp. 1385–1411.
- [17] H. G. Latham, "The signal-to-noise ratio for speech intelligibility—An auditorium acoustics design index," *Applied Acoustics*, vol. 12, no. 4, pp. 253–320, 1979.
- [18] J. S. Bradley, "Speech intelligibility studies in classrooms.," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 80, no. 3, pp. 846–54, 1986.
- [19] J. S. Bradley, "Predictors of speech intelligibility in rooms," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 80, no. 3, pp. 837–845, 1986.
- [20] S. R. Bistafa and J. S. Bradley, "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*, vol. 107, no. 2, pp. 861–875, 2000.
- [21] S. R. Bistafa and J. S. Bradley, "Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics.," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 107, no. 2, pp. 861–75, 2000.
- [22] Bradley, Reich, and S. Norcross, "On the combined effects of signal-to-noise ratio and room acoustics on speech intelligibility," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 106, no. 4, pp. 1820–1828, 1999.
- [23] M. Hodgson, R. Rempel, and S. Kennedy, "Measurement and prediction of typical speech and background-noise levels in university classrooms during lectures," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 105, no. 1, pp. 226–233, 1999.
- [24] H. Sato and J. S. Bradley, "Evaluation of acoustical conditions for speech communication in working elementary school classrooms.," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 123, no. 4, pp. 2064–77, 2008.
- [25] C. Young-Ji, "Comparison of two types of combined measures, STI and U50, for predicting speech intelligibility in classrooms," *Archives of Acoustics*, vol. 42, no. 3, pp. 527–532, 2017.
- [26] C. Young-Ji, "The intelligibility of speech in university classrooms during lectures," *Applied Acoustics*, vol. 162, p. 107211, 2020.
- [27] C. Young-Ji, "Evaluation of acoustical conditions for speech communication in active university classrooms," *Applied Acoustics*, vol. 159, p. 107089, 2020.
- [28] L. Nijs and M. Rychtáriková, "Calculating the optimum reverberation time and absorption coefficient for good speech intelligibility in classroom design using U50," *Acta Acustica United with Acustica*, vol. 97, no. 1, pp. 93–102, 2011.



KAMPÜS YAPILARI İÇERİSİNDE KONFERANS SALONLARININ AKUSTİK PERFORMANS DEĞERLENDİRMELERİ

Zuhal Özçetin¹

Uşak Üniversitesi, Uşak, Türkiye
e-posta: zuhal.ozcetin@usak.edu.tr

Merve Görkem²

Mego Mimarlık ve Danışmanlık, Ankara, Türkiye
e-posta: mervedogangorkem@gmail.com

Sebahat Gül İlisulu³

Başkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye
e-posta: islekg@baskent.edu.tr

Fusun Demirel⁴

Gazi Üniversitesi, Maltepe, Ankara, Türkiye
e-posta: fusundgk@gmail.com

ÖZET

Eğitim yapıları, öğrenci ve eğitimci arasında işitsel iletişim için oldukça önemlidir. Sağlıklı bir şekilde işitsel iletişim sağlamak için; sesin nesnel parametre değerleri ve arka plan gürültüsünün önemi büyüktür. Verilen eğitimin, yapılan aktivitenin verimli olabilmesi eğitim yapılarındaki akustik konforun belirlenen sınır değerleri karşılaması ile mümkün olabilir. Bu kapsamda birçok aktiviteye ev sahipliği yapan, kampüsler içerisindeki eğitim faaliyetlerine destek veren konferans salonlarının farklı şehir ve üniversite bazında örneklenilerek, değerlendirmesinin yapılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda farklı bölgelerdeki üniversite kampüslerinde yer alan ve konferans salonu olarak kullanılan; Uşak Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Konferans Salonu (187 kişilik), Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Konferans Salonu (280 kişilik), İlahiyat Fakültesi Konferans Salonu (529 kişilik) örneklerinde akustik konfor koşullarını sağlayacak parametrelerin Odeon simülasyon programı ile değerlendirilmesi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Konferans salonu, kampüs yapıları, eğitim yapıları, akustik.

ACOUSTIC PERFORMANCE EVALUATIONS OF CONFERENCE HALLS IN CAMPUS BUILDINGS

ABSTRACT

Educational structures are very important for auditory communication between student and educator. To provide a healthy auditory communication; Objective parameter values of sound and background noise are of great importance. The efficiency of the training and the activity is only possible if the acoustic comfort in the educational buildings meets the specified limit values. In this context, conference halls, which host many activities and support educational activities within the campuses, were exemplified and evaluated on the basis of different cities and universities. In this context, located on university campuses in different regions and used as conference halls; In the examples of Uşak University Faculty of Fine Arts Conference Hall (187 people), Siirt University Engineering Faculty Conference Hall (280 people), Faculty of Theology Conference Hall (529 people), the parameters that will provide the acoustic comfort conditions were evaluated with the Odeon simulation program.

Keywords: *Conference hall, campus structures, educational buildings, acoustics.*



1. GİRİŞ

Tiyatrolar, konferans salonları, derslikler, toplantı salonları konuşma amaçlı salonlara örnek verilebilir. Bu salonlar birçok plan şemasına sahip olan hacimler olarak değerlendirilebilir. Bu farklı plan şemalarına sahip hacimler akustik açıdan da değişikliklere sebep olmaktadır. Konuşma amaçlı salonlarda konuşmanın anlaşılabilirliğinin sağlanması, akustik açıdan önemli bir gereksinimdir. Sesin duyulması konuşmanın net anlaşılabilir olduğunu göstermemektedir. Konuşmanın anlaşılabilirliğinin çok zorlamadan elde edilmesi, konforlu bir şekilde konuşmayı ve oyunu dinlemeye ve izlemeye yardımcı olmaktadır. Çalışma kapsamında eğitim yapıları özelinde sıklıkla kullanılan mekanlar arasında bulunan üniversite kampüslerinde yer alan konuşma amaçlı salonlar ele alınmıştır. Salon performanslarının konuşmanın anlaşılabilirliği açısından önemli olduğu dikkate alınarak birbirlerine hacimsel ve form olarak yakın mekanlar üzerinden inceleme yapılması planlanmıştır. İncelenen salonlarda malzeme olarak ahşap perfore panel kullanımı ile akustik çalışmaya dayanılmadığı görülmektedir. Kullanılan malzeme ve tasarım süreçleri de dikkate alınarak kullanılan eğitim mekanlarının incelemesinin yapılması, sonraki çalışmalara yol göstermesi hedeflenmiştir.

Bu kapsamda mekanlarda özellikle konuşma işlevinin öncelikli olmasından dolayı; Reverberasyon Süresi (T-Reverberation Time), Öncül Düşme Süresi, (EDT-Early Decay Time), Konuşma İletimi Dizini (STI), Belirginlik (D50-Definition), Ağırlıklı Ses Basıncı Düzeyi (SPLA-A-weighted sound pressure level) gibi akustik parametrelerin incelenmesi ile değerlendirmeler yapılmıştır.

2. KAMPÜS YAPILARINDA KONFERANS SALONLARININ İRDELENMESİ

Salonların akustik koşullarını belirlemek ve ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırmak amacıyla, Odeon 15.15 Combined simülasyon programı kullanılmıştır. Salonun tam dolu durumundaki akustik koşulları değerlendirilmiş ve konferans kullanımına yönelik analiz yapılmıştır.

2.1. Reverberasyon süresi (T_{30})

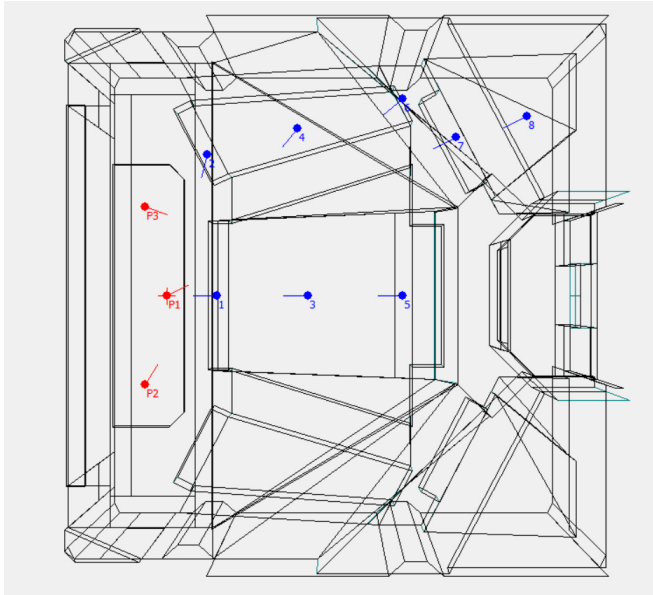
Kapalı bir hacim içerisinde, ses kaynağı kapatıldıktan sonra, ses basınç seviyesinin, 60 dB azalması ya da sönümlenmesi için geçen süre olarak tanımlanan reverberasyon süresi; hacim akustiği için en önemli parametrelerden birisidir [1,2,3].

2.1.1. Uşak Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Konferans Salonu (187 kişilik)

Uşak Üniversitesi 1 Eylül Kampüsü'nde bulunan Mustafa Kemal Paşa Amfisi; dikdörtgen plan tipi ile Güzel Sanatlar Fakültesi zemin katında bulunmaktadır. 187 kişilik koltuk kapasitesine sahiptir. Toplantı salonu, konferanslar, seminerler, söyleşiler, paneller, çalıştaylar, sempozyumlar, sinema gösterimleri, TV programları, mini konser gibi etkinliklerde kullanılan salon, yıl boyunca birçok etkinliğe ev sahipliği yapmaktadır.



Resim 1. Uşak Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Konferans Salonu



Şekil 1. Kaynak ve alıcı noktaları

Tablo 1. Reverberasyon süresi sonuçları

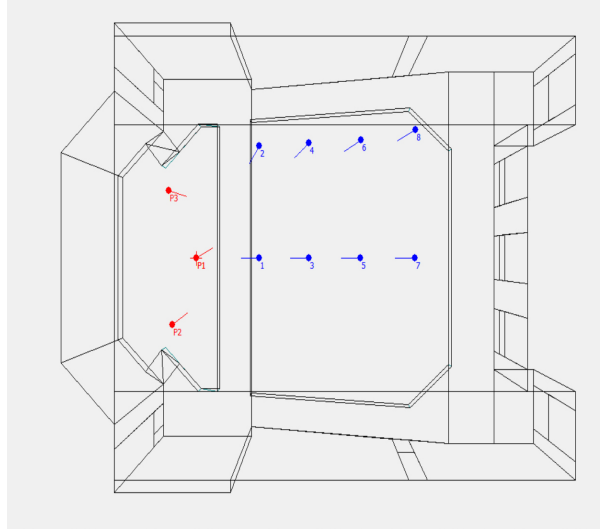
T_{30} (sn)	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Min	0,50	0,53	0,49	0,40	0,33	0,32	0,34	0,35
Max	0,52	0,55	0,55	0,46	0,36	0,36	0,39	0,38
Ort	0,51	0,53	0,52	0,42	0,34	0,34	0,36	0,36

2.1.2. Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Konferans Salonu (280 kişilik)

Siirt Üniversitesi Kezer Kampüsü Mühendislik Fakültesi binası zemin kat- ta yer alan ve çeşitli toplantı, seminer, konferans vb etkinliklerin yer aldığı salon, dikdörtgen plan tipi ve 280 kişilik kapasiteye sahiptir.



Resim 2. Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Konferans Salonu

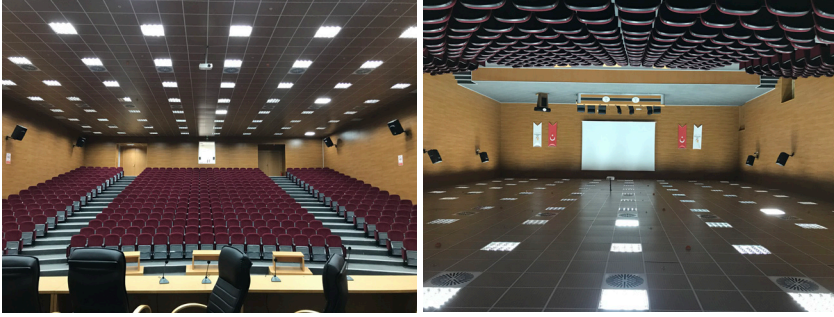


Şekil 2. Kaynak ve alıcı noktaları

Tablo 2. Reverberasyon süresi sonuçları

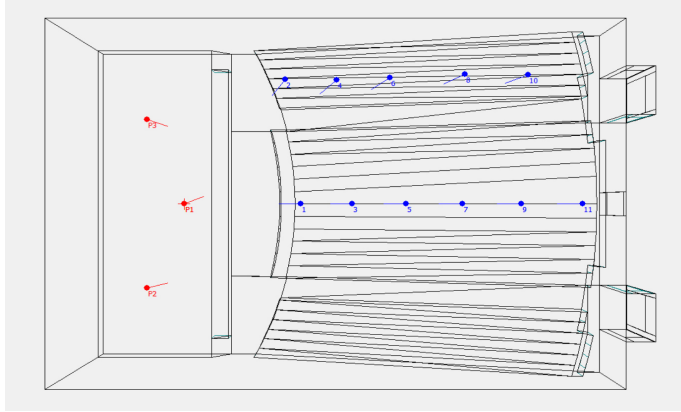
T_{30} (sn)	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Min	0,64	0,64	0,42	0,28	0,28	0,32	0,38	0,39
Max	0,68	0,68	0,46	0,32	0,31	0,34	0,39	0,41
Ort	0,66	0,66	0,44	0,30	0,29	0,33	0,38	0,40

2.1.3. Siirt Üniversitesi İlahiyat Fakültesi Konferans Salonu (529 kişilik)



Resim 3. Siirt Üniversitesi İlahiyat Fakültesi Konferans Salonu

Siirt Üniversitesi Kezer Kampüsü İlahiyat Fakültesi binasında yer almaktadır. Dikdörtgen plan tipi ile toplantılar, seminerler, konferanslar, çalıştaylar gibi farklı etkinliklerin yer aldığı salon 529 kişilik kapasiteye sahiptir.



Şekil 3. Kaynak ve alıcı noktaları

Tablo 3. Reverberasyon süresi sonuçları

T_{30} (sn)	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Min	0,62	0,64	0,43	0,28	0,27	0,31	0,37	0,40
Max	0,68	0,70	0,46	0,31	0,29	0,33	0,40	0,42
Ort	0,65	0,67	0,45	0,30	0,28	0,32	0,38	0,40

2.2. Öncül Düşme Süresi (EDT)

Kapalı bir hacim içerisinde, ses kaynağı kapatıldıktan sonra, ses basınç seviyesinin, 10 dB azalması ya da sönümlenmesi için geçen sürenin, 6 ile çarpılması sonucunda elde edilen, ses basınç seviyesindeki sönümlenmenin ilk evresini ifade etmektedir [2,3]. EDT üzerinde en etkili parametre reverberasyon süresidir. Reverberasyon süresi arttıkça EDT değeri de artmaktadır. Yeterince homojen ses alanına sahip bir hacimde EDT değeri reverberasyon süresine bağlı olarak hesaplanabilmektedir. EDT parametresinin reverberasyon süresi parametresinden küçük olması istenmektedir [4].

2.2.1. Uşak Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Konferans Salonu (187 kişilik)

Tablo 4. EDT-Öncül Düşme Süresi sonuçları

EDT	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Min	0,44	0,48	0,43	0,35	0,27	0,29	0,32	0,32
Max	0,59	0,62	0,59	0,50	0,45	0,45	0,45	0,43
Ort	0,52	0,55	0,52	0,44	0,37	0,37	0,40	0,38

2.2.2. Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Konferans Salonu (280 kişilik)

Tablo 5. EDT- Öncül Düşme Süresi sonuçları

EDT	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Min	0,51	0,51	0,36	0,28	0,27	0,31	0,37	0,39
Max	0,72	0,69	0,48	0,33	0,33	0,37	0,44	0,44
Ort	0,60	0,59	0,40	0,31	0,30	0,34	0,40	0,41

2.2.3. Siirt Üniversitesi İlahiyat Fakültesi Konferans Salonu (529 kişilik)

Tablo 6. EDT- Öncül Düşme Süresi sonuçları

EDT	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Min	0,48	0,48	0,34	0,21	0,19	0,23	0,30	0,35
Max	0,65	0,67	0,44	0,29	0,27	0,34	0,43	0,43
Ort	0,58	0,58	0,39	0,25	0,24	0,29	0,37	0,39

2.4. Konuşma İletimi Dizini (STI)

Konuşmanın iletim indeksi (STI); konuşmanın iletim kanalı ile, konuşmanın iletim niteliğine dayalı olarak, konuşmanın anlaşılabilirliğinin ölçülmesine yönelik geliştirilmiş olan akustik parametredir. Tavsiye edilen konuşmanın iletim indeksi (STI) değerleri ve anlaşılabilirlik aralığı aşağıda verilmiştir [5].

0,30 - 0,45: Anlaşılabilirlik kötü-yetersiz düzeyde (bad-poor)

0,45 - 0,60: Anlaşılabilirlik yetersiz-orta düzeyde (poor-fair)

0,60 - 0,75: Anlaşılabilirlik orta-iyi düzeyde (fair-good)

0,75 - 1,00: Anlaşılabilirlik iyi-mükemmel düzeyde (good-excellent)

2.4.1. Uşak Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Konferans Salonu (187 kişilik)

Tablo 7. STI – Konuşma iletimi dizini sonuçları

STI	
Min	0,73
Max	0,82
Ort	0,76

2.4.2. Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Konferans Salonu (280 kişilik)

Tablo 8. STI – Konuşma iletimi dizini sonuçları

STI	
Min	0,74
Max	0,79
Ort	0,75

2.4.3. Siirt Üniversitesi İlahiyat Fakültesi Konferans Salonu (529 kişilik)

Tablo 9. STI – Konuşma iletimi dizini sonuçları

STI	
Min	0,74
Max	0,76
Ort	0,75

2.4. Belirginlik (D50)

Belirginlik (D50); konuşmanın anlaşılabilirliğine (intelligibility quality of speech performances) yönelik olarak geliştirilen hacim akustiği parametresidir. Konuşmanın anlaşılabilirliğinin yüksek olması için, belirginlik parametresi değerinin; tüm frekanslarda, 0,50'nin üzerinde olması önerilmektedir [6,7].

2.4.1. Uşak Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Konferans Salonu (187 kişilik)

Tablo 10. D50 – Belirginlik parametresi sonuçları

D50	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Min	0,71	0,69	0,73	0,79	0,86	0,85	0,82	0,82
Max	0,87	0,86	0,87	0,90	0,93	0,92	0,91	0,92
Ort	0,78	0,76	0,78	0,84	0,89	0,88	0,85	0,86

2.4.2. Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Konferans Salonu (280 kişilik)

Tablo 11. D50 – Belirginlik parametresi sonuçları

D50	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Min	0,63	0,63	0,75	0,90	0,91	0,89	0,82	0,81
Max	0,75	0,76	0,89	0,94	0,95	0,92	0,87	0,87
Ort	0,71	0,71	0,85	0,92	0,93	0,90	0,84	0,83

2.4.3. Siirt Üniversitesi İlahiyat Fakültesi Konferans Salonu (529 kişilik)

Tablo 12. D50 – Belirginlik parametresi sonuçları

D50	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Min	0,66	0,65	0,83	0,91	0,92	0,88	0,81	0,79
Max	0,75	0,74	0,87	0,96	0,97	0,95	0,90	0,85
Ort	0,70	0,69	0,85	0,94	0,94	0,92	0,86	0,83

2.5. Ağırlıklı Ses Basıncı Düzeyi (SPLA)

Konser, tiyatro, konferans ve opera işlevi için ses basıncı düzeyindeki minimum değişimin 10 dB den az olması önerilmektedir [8].

2.6. Uşak Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Konferans Salonu (187 kişilik)

Tablo 13. SPLA – Ağırlıklı ses basıncı düzeyi sonuçları

SPLA	
Min	54,5
Max	64,5
Ort	58,4

2.7. Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Konferans Salonu (280 kişilik)

Tablo 14. SPLA – Ağırlıklı ses basıncı düzeyi sonuçları

SPLA	
Min	51,6
Max	58,5
Ort	54,5

2.8. Siirt Üniversitesi İlahiyat Fakültesi Konferans Salonu (529 kişilik)

Tablo 15. SPLA – Ağırlıklı ses basıncı düzeyi sonuçları

SPLA	
Min	49,5
Max	54,5
Ort	51,6

3. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada; Uşak Üniversitesi ve Siirt Üniversitesi kampüslerinde yer alan konferans salonlarının işlevsel olarak sağlaması gereken akustik koşullar, hacim akustiğine yönelik olarak analiz edilmiş, uluslararası standartlarda ve literatürde önerilen akustik parametrelere göre değerlendirilmiştir.

Tablo 16. Parametrelerin simülasyon sonuçları

Hacim Akustiği Parametreleri	Optimum Değerler	Uşak Üni. GSTF Konf. Salonu	Siirt Üni. Müh. Fak. Konf. Salonu	Siirt Üni. İlahiyat Fak. Konf. Salonu
Tmid	$0,56 \leq T_{30,mid} \leq 0,84$ *			
Reverberasyon Süresi, sn (Reverberation Time)	[4]	0,38 sn		
	$0,64 \leq T_{30,mid} \leq 0,96$ *		0,30 sn	0,29 sn
	[4]			
* Hacim farklılığından dolayı iki sınır değer aralığı belirlenmiştir.				
EDT				
Öncül Düşme Süresi, sn (Early Decay Time)	$EDT < T_{30,mid}$ [2]	0,41	0,31	0,25
Δ SPL(A)				
Ses Basıncı Düzeyi Farkı, dBA (Sound Pressure Level)	Δ SPL(A) < 10 dBA [2]	10 dBA	6,9 dBA	5 dBA
STI				
Konuşma İletimi Dizini (Speech Transmission Index)	0,75 < Çok iyi < 1,00 0,60 < İyi < 0,75 0,45 < Orta < 0,60 0,30 < Zayıf < 0,45 0,00 < Kötü < 0,30 [3]	0,76 (çok iyi)	0,75 (iyi)	0,75 (iyi)
D_{50}				
Belirginlik (Definition)	$D_{50} > 0,50$ tüm frekanslarda [4]	125Hz 0,76 250Hz 0,78 500Hz 0,84 1000Hz 0,89 2000Hz 0,88 4000Hz 0,85	125Hz 0,71 250Hz 0,85 500Hz 0,92 1000Hz 0,93 2000Hz 0,90 4000Hz 0,84	125Hz 0,69 250Hz 0,85 500Hz 0,94 1000Hz 0,94 2000Hz 0,92 4000Hz 0,86

Yapılan odeon simülasyon programı analizleri sonucunda ihtiyaç duyulan akustik konfor koşullarına yönelik olarak;

- Hacimlerine göre reverberasyon süresinin üç salon içinde sınır değerlerin altında olduğu,

- EDT değeri sadece Siirt Üniversitesi İlahiyat Fakültesi konferans salonu için uygun gözükse de reverberasyon süresinin yetersiz olmasından dolayı uygun değerleri sağlamadığı,
- Ses basıncı düzeyi farkının Uşak Üniversitesi konferans salonu için sınırdan kaldığı, diğer iki salon için uygun değerlerde olduğu,
- Konuşma iletimi dizini parametresinin Uşak Üniversitesi salonu için “çok iyi”, Siirt Üniversitesi salonları için “iyi” olarak belirlendiği,
- Belirginlik parametresinin tüm frekanslarda 0,50’nin üstünde olduğu sonuçlarına varılmıştır.

Bu kapsamda; eğitim yapıları özelinde değerlendirilen üç salon örneğinde malzeme olarak perfore delikli ahşap kullanımı görülmektedir. Hacim akustiği performans iyileştirmelerinde çok sık kullanılan malzemelerin her mekân için olumlu olarak iyileştirme yapacağı görüşü oldukça yaygın olduğu görülmektedir. İşlev farklılığı olan hacimlerde, mekânsal analizlerin yapılarak, farklı malzeme ile konfor koşullarının düzenlenmesi gerektiği düşünülmektedir.

4. KAYNAKLAR

- [1] Türk Standardları Enstitüsü, TS EN ISO 3382-1, (2010). Akustik, Odaların Akustik Parametrelerinin Ölçülmesi- Bölüm 1: Performans Boşlukları, TSE, Türkiye,1-38.
- [2] Beranek, L., (2004). Concert Halls and Opera Houses Music Acoustics and Architecture, 2nd ed., Springer Verlag Inc., New York.
- [3] Türkmen, R., (2013). Oditoryumlarda Akustik Performansın İyileştirilmesine Yönelik Tasarım Parametrelerinin Geliştirilmesi ve Bir Örneklem, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [4] Mehta, M.; Johnson, J.; (1999). Rocafort, J., Architectural Acoustics: Principles and Design, Prentice Hall, New Jersey,
- [5] Türk Standardları Enstitüsü, TS EN 60268-16 (2012). Ses sistem cihazları - Bölüm 16: Konuşma iletim indeksi ile konuşma anlaşılabilirliğinin tarafsız sınıflandırılması, TSE, Türkiye, 1-71.
- [6] Demirel, F., (2021). Mimari Akustik Yayınlanmamış Ders Notları, Gazi Üni. Mim. Fakültesi, Ankara.
- [7] Thiele, R., (1956). Die Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrückwürfe in Räumen - Directional distribution and time sequence of sound reflections in rooms, Acustica, 1: 31-32.
- [8] Tachibana, H., (2003). Visualization / Auralization of Sound Fields for Room Acoustics, The Eighth Western Pacific Acoustics Conference, Australia, 1-10.

GİRESUN KÜLTÜR MERKEZİ ÇOK AMAÇLI SALONU AKUSTİK TASARIMI

Füsun Demirel¹

Gazi Üniversitesi, Maltepe, Ankara, Türkiye
e-posta: fusundgk@gmail.com

Merve Görkem²

Mego Mimarlık ve Danışmanlık, Ankara, Türkiye
e-posta: mervedogangorkem@gmail.com

ÖZET

Ülkemizde yaygın bir şekilde inşa edilmekte ve kullanılmakta olan çok amaçlı salonların, içerisinde barındırdığı farklı performans ve işlevler için uygun akustik konfor koşullarını sağlaması, çözülmesi gereken ana problem olarak ortaya çıkmaktadır. Farklı işlevlere yönelik olarak, ihtiyaç duyulan akustik koşulların, aynı hacim içerisinde sağlanması amacıyla geliştirilen önerilerin birbirleri ile entegre tasarlanması ve kullanılabilmesi gerekmektedir. Giresun Kültür Merkezi Çok Amaçlı Salonu içerisinde konferans, konser ve tiyatro işlevlerini barındırmaktadır. Değişken akustik koşullar için çok amaçlı salonun mimari uygulama projesi üzerinde geliştirilen akustik tasarımlar bilgisayar simülasyon programı (Odeon v.15.14) ile analiz edilerek değerlendirilmesi yapılmış ve hacim akustiğine yönelik, ülkemizde yürürlükte olan yönetmeliklerin, uluslararası standartların ve literatürün önerdiği, akustik konfor koşullarının sağlanmasına yönelik öneriler geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mimari akustik, hacim akustiği, çok amaçlı salon akustiği.

ACOUSTIC DESIGN OF GİRESUN CULTURAL CENTER MULTIPURPOSE HALL

ABSTRACT

The main problem to be solved is that the multi-purpose halls, which are widely built and used in our country, provide the appropriate acoustic comfort conditions for the different performances and functions they contain. Suggestions developed to provide the acoustic conditions needed for different functions in the same volume should be designed and used in integration with each other. Giresun Cultural Center Multi-Purpose Hall hosts conference, concert and theater functions within. The acoustic designs developed on the architectural application project of the multi-purpose hall for variable acoustic conditions have been analyzed and evaluated with a computer simulation program (Odeon v.15.14) and recommendations for the provision of acoustic comfort conditions, which are recommended by the regulations in force in our country, international standards and literature regarding volume acoustics developed..

Keywords: *Architectural acoustics, room acoustics, acoustic design of multipurpose hall.*

1. GİRİŞ

Ülkemizde yaygın bir şekilde inşa edilmekte ve kullanılmakta olan çok amaçlı salonların, içerisinde barındırdığı farklı performans ve işlevler için uygun akustik konfor koşullarını sağlaması, çözülmesi gereken ana problem olarak ortaya çıkmaktadır. Farklı işlevlere yönelik olarak, ihtiyaç duyulan akustik koşulların, aynı hacim içerisinde sağlanması amacıyla geliştirilen önerilerin birbirleri ile entegre tasarlanması ve kullanılabilmesi gerekmektedir.

Bu kapsamda çalışmada; Giresun Kültür Merkezi Çok Amaçlı Salonun mimari uygulama projesi üzerinde geliştirilen akustik tasarımlar bilgisayar simülasyon programı (Odeon v.15.14) ile analiz edilerek değerlendirilmesi yapılmıştır [5]. Hacim akustiğine yönelik analizler için çok amaçlı salon; konferans, konser ve tiyatro işlevlerine yönelik akustik koşulların sağlanması amacı ile akustik tasarımlar geliştirilmiş, Odeon programına aktarılmıştır. Bunu takiben sözü edilen program aracılığıyla geliştirilen akustik tasarımların analizleri yapılmış ve geliştirilen öneriler sonucunda elde edilen verilerin ulusal/uluslararası mevzuat ile karşılaştırmaları yapılarak, tasarımların doğruluğu kanıtlanmıştır.

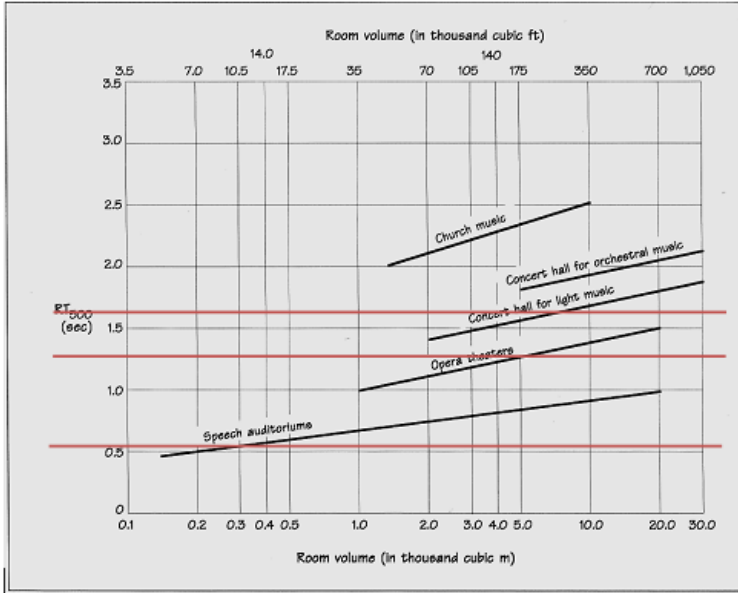
2. ÇOK AMAÇLI SALON AKUSTİK ANALİZİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Giresun Kültür Merkezi Çok Amaçlı Salonu; 413 kişilik izleyici kapasitesine sahip olup içerisinde konferans, konser ve tiyatro işlevlerini barındırmaktadır. Salon izleyici alanı 21mx18m boyutlarında, dikdörtgen plan şemasında olup yaklaşık 5000 m³ hava hacmine sahiptir. Salon genelinde, ses yutucu olarak delikli oluklu ahşap panel, ses yansıtıcı olarak ise oluklu ahşap panel kullanılmıştır. Mevcut arka plan gürültü düzeyi olarak NC 15 (25 dBA) ölçütü alınmış ve arka plan gürültüsünün bu ölçütte belirtilen ses düzeylerini aşmadığı varsayılmıştır. Farklı işlevlere yönelik olarak, ihtiyaç duyulan akustik koşulların, aynı hacim içerisinde sağlanması amacıyla geliştirilen önerilerin birbirleri ile entegre edilmesiyle tasarlanmış olan, Giresun Kültür Merkezi Çok Amaçlı Salonu'nda;

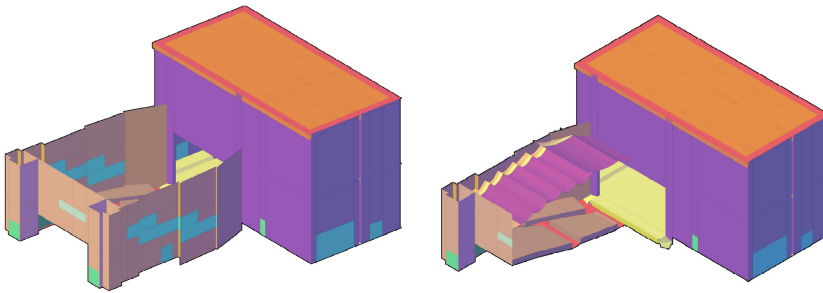
- Sahne ve sofitada oluşturulan birleşen hacimler sisteminin tiyatro ve konser işlevlerinde,
- Sahne çevresinde tasarlanan, sahnenin hareketli ses yansıtıcı yüzey sisteminin, konferans işlevlerinde,
- Perde sisteminin tiyatro işlevlerinde ihtiyaç duyulan akustik koşulların sağlanmasında etkili olacağı öngörülmüştür.

Giresun Kültür Merkezi Çok Amaçlı Salonu'nda; farklı işlevler ve farklı salon kullanımı, hacim akustiği parametrelerinin de farklı olmasını gerektirmektedir. Değişken akustik koşullar, mimari uygulama projesi üzerinde geliştirilen akustik tasarımlar ile sağlanarak, her işleve yönelik (konferans, konser ve tiyatro) optimum akustik konfor koşulları elde edilmiştir. Hacim akustiğine yönelik analizler ile hedeflenen;

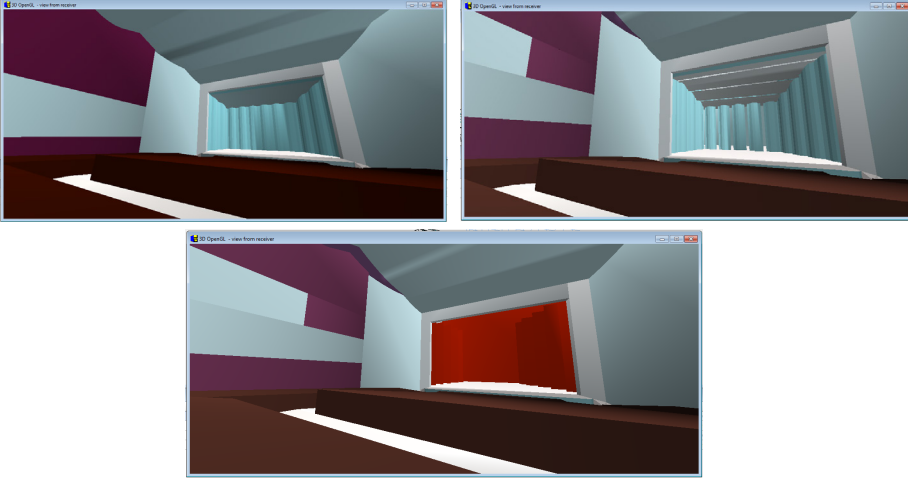
- Mekânın işlevi için ihtiyaç duyulan reverberasyon süresinin sağlanması,
- Mekân içerisinde konuşmanın anlaşılabilirliğinin yükseltilmesi ve
- Yankı (eko) gibi önemli akustik problemlerin önlenmesidir.



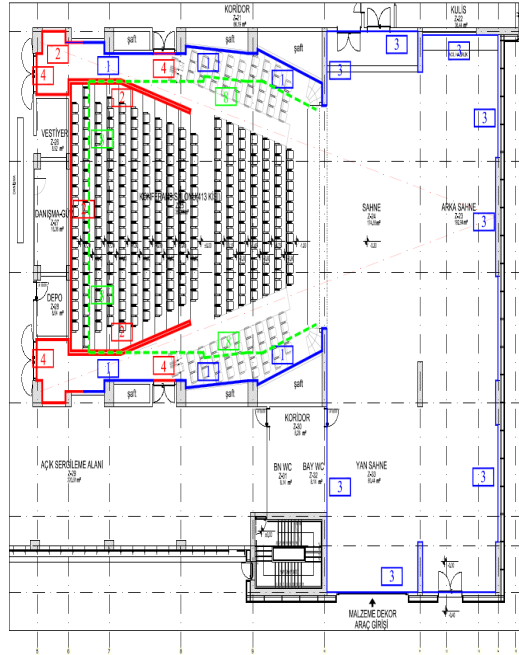
Şekil 1. Farklı işlevler için reverberasyon süresi grafiği (500 Hz) [1]



Şekil 2. Çok Amaçlı Salonun 3 boyutlu görseli (AutoCAD modeli)

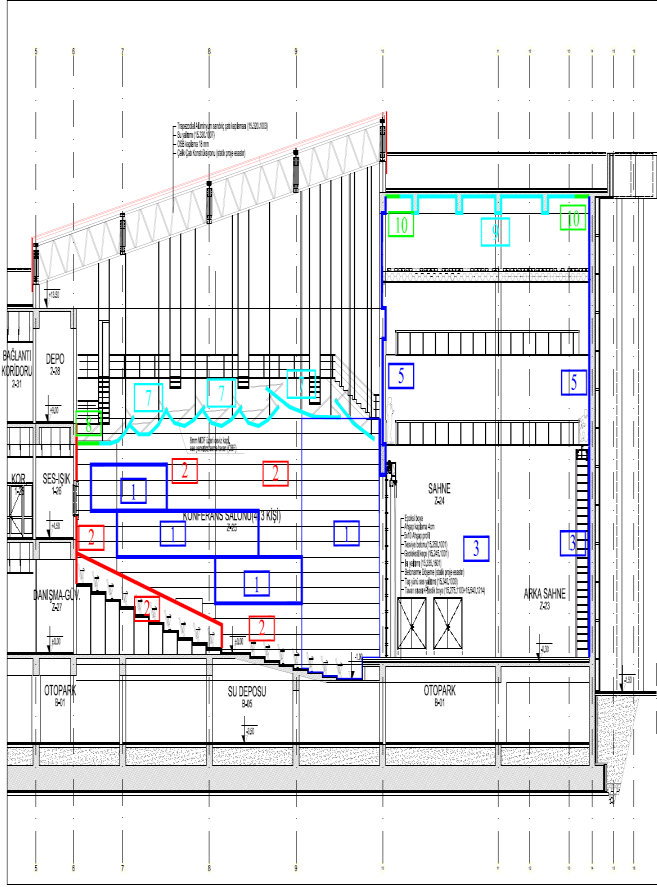


Şekil 3. Çok Amaçlı Salonun Odeon görselleri-sırasıyla konferans, konser ve tiyatro işlevi



- | | |
|----|-----------------------------------|
| 1 | Duvar Ses Yansıtıcı Yüzeyler |
| 2 | Duvar Ses Yutucu Yüzeyler |
| 3 | Duvar Ses Yansıtıcı Yüzeyler |
| 4 | Duvar Ses Yutucu Yüzeyler |
| 5 | Duvar Ses Yansıtıcı Yüzeyler |
| 6 | Duvar Ses Yansıtıcı Yüzeyler |
| 7 | Asma Tavan Ses Yansıtıcı Yüzeyler |
| 8 | Asma Tavan Ses Yutucu Yüzeyler |
| 9 | Asma Tavan Ses Yansıtıcı Yüzeyler |
| 10 | Asma Tavan Ses Yutucu Yüzeyler |

Şekil 4. Salon içerisinde kullanılması önerilen malzemelerin yerleşimi, plan



- | | |
|----|-----------------------------------|
| 1 | Duvar Ses Yansıtıcı Yüzeyler |
| 2 | Duvar Ses Yutucu Yüzeyler |
| 3 | Duvar Ses Yansıtıcı Yüzeyler |
| 4 | Duvar Ses Yutucu Yüzeyler |
| 5 | Duvar Ses Yansıtıcı Yüzeyler |
| 6 | Duvar Ses Yansıtıcı Yüzeyler |
| 7 | Asma Tavan Ses Yansıtıcı Yüzeyler |
| 8 | Asma Tavan Ses Yutucu Yüzeyler |
| 9 | Asma Tavan Ses Yansıtıcı Yüzeyler |
| 10 | Asma Tavan Ses Yutucu Yüzeyler |

Şekil 5. Salon içerisinde kullanılması önerilen malzemelerin yerleşimi, kesit

Önerilen akustik tasarım, Giresun Kültür Merkezi Çok Amaçlı Salonu'nun içerisinde barındırdığı 3 farklı işlev için ortak bir düzenleme olarak geliştirilmiş olup, her bir kullanım senaryosu için değişken akustik koşulları sağlamak adına özellikle sahne ağızı ve sofitada uygulanacak şekilde hareketli sistemler ve düzenlemelere gidilmiştir (Tablo 1). Her işlev için mimari uygulama projesi üzerinde geliştirilen sistemler, bilgisayar simülasyon sistemi ile analiz edilerek değerlendirilmesi yapılmış ve hacim akustiğine yönelik, ülkemizde yürürlükte olan yönetmeliklerin, uluslararası standartların ve literatürün önerdiği, akustik konfor koşullarının sağlanmasına yönelik öneriler geliştirilmiştir.

Giresun Kültür Merkezi Çok Amaçlı Salonunun, konferans, konser ve tiyatro işlevleri için kullanımı; Tablo 1.'de verilmiştir.

Tablo 1. Konferans, konser ve tiyatro işlevi için salonun kullanımı

İşlevler	Birleşen Hacimler Sistemi (Coupled Volumes System)	Sahnenin Hareketli Ses Yansıtıcı Yüzey Sistemi (Movable Orchestra Shell)	Akustik Perde Sistemi (Acoustical Curtains)
Konferans İşlevi	KAPALI (Sofita + Yan/Arka Sahneler)	SAHNE AĞZINDA (Sahne önünden 4 m ileride)	YOK
Konser İşlevi	AÇIK (Sofita + Yan/Arka Sahneler)	SAHNEDE (Orkestranın çevresinde)	YOK
Tiyatro İşlevi	AÇIK (Sofita+Yan Sahneler Açık, Arka Sahne Kapalı)	İPTAL (Arka sahnede depolanmakta)	SAHNEDE PERDE SİSTEMİ VAR

2.1. Konferans-Konser ve Tiyatro İşlevi - Odeon Simülasyon Programı Analizleri ve Değerlendirilmesi

Giresun Kültür Merkezi Çok Amaçlı Salonunda;

- Konferans işlevi için; konuşmacı kürsüsü arkasında yer alan sahne ağızından 4m ilerisinde, tekerlekler üzerinde hareket eden ses saçıcı yüzey tasarlanması ile ulusal/uluslararası mevzuata uygun koşullar sağlanarak, tasarımın doğruluğu kanıtlanmıştır (Tablo 2).
- Konser işlevi için; Birleşen Hacimler Sistemi ve sahnenin Hareketli Ses Yansıtıcı Yüzey Sistemi, entegre olarak tasarlanması ile ulusal/

uluslararası mevzuata uygun koşullar sağlanarak tasarımın doğruluğu kanıtlanmıştır (Tablo 2).

- Tiyatro işlevi için; Birleşen Hacimler Sistemi ve sofita arka kısmına asılan Akustik Perde Sistemi ile arka sahne, sofitadan koparılarak ve yan perdeler eklenerek sahne tasarlandığında ulusal/uluslararası mevzuatta yer alan uygun akustik konfor koşulları sağlanarak, geliştirilen akustik tasarımın doğruluğu kanıtlanmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Çok Amaçlı Salon- konferans, konser ve tiyatro işlevleri için geliştirilen önerinin hacim akustiği açısından analiz sonuçlarının değerlendirmesi

Hacim Akustiği Parametreleri	Optimum Değerler	Konferans Öneri Analiz Sonuçları	Konser Öneri Analiz Sonuçları	Tiyatro Öneri Analiz Sonuçları	Hissedilen Fark (JND)
Tmid Reverberasyon Süresi, sn (Reverberation Time)	$0,64 \leq T_{30,mid} \leq 0,96$ (Konferans) [2]	0,70			%5
	$1,44 \leq T_{30,mid} \leq 2,16$ (Konser) [2]		1,70		
	$1,12 \leq T_{30,mid} \leq 1,68$ (Tiyatro) [2]			1,30	
EDT Erken Sönümlenme Süresi, sn (Early Decay Time)	$EDT \leq T_{30,mid}$ (ortalama) [2]	0,70	0,80	0,60	%5
Δ SPL(A) Ses Basınç Seviyesi Farkı, dBA (Sound Pressure Level)	Δ SPL(A) < 10 dBA [2]	7,4	6,7	7,0	-
STI Konuşmanın İletim İndeksi (Speech Transmission Index)	0,75 < Çok iyi < 1,00	0,66 (iyi)	-	0,70 (iyi)	-
	0,60 < İyi < 0,75				
	0,45 < Orta < 0,60				
	0,30 < Zayıf < 0,45				
	0,00 < Kötü < 0,30 [2,4]				

D_{50} Konuşmanın Belirginliği (Definition)	$D_{50} > 0,50$ tüm frekanslarda [2]	125 Hz	0,61	-	125 Hz	0,55	%5
		250 Hz	0,63		250 Hz	0,68	
		500 Hz	0,65		500 Hz	0,75	
		1000 Hz	0,64		1000 Hz	0,77	
		2000 Hz	0,64		2000 Hz	0,77	
		4000 Hz	0,66		4000 Hz	0,79	
C_{80} Sesin Berraklığı veya Netliği (Clarity)	-5 dB; +5 dB (500 Hz - 1000 Hz) (Konser) [3]	-	4,8	-	8,3	1 dB	
	$C_{80} > +4$ dB (500 Hz - 1000 Hz) (Tiyatro) [2]						
LF_{80} Erken Yan Yansıma Oranı (Early Lateral Energy Fraction)	0,05; 0,35 (125 Hz - 1000 Hz) [3]	-	0,201	0,165	%5		

3. SONUÇ

Konferans, konser ve tiyatro gibi farklı işlevlere hizmet veren, çok amaçlı salonlarda; birbiri ile çelişen ve birbirinden çok farklı akustik koşulların, aynı hacim içerisinde sağlanması gerekmektedir.

Bu çalışmada; Giresun Kültür Merkezi Çok Amaçlı Salonu'nda, konferans, konser ve tiyatro işlevleri için sağlanması gereken akustik koşullar, hacim akustiğine yönelik olarak analiz edilmiş, uluslararası standartlarda ve literatürde önerilen akustik parametrelere göre değerlendirilmiştir.

“Giresun Kültür Merkezi Çok Amaçlı Salon” mimari uygulama projesi kapsamında mevcut proje koşullarında salon tasarımı sabit tutularak uygun olan akustik koşulların sağlanabilmesi amacıyla salonda; duvar, döşeme ve asma tavan malzemelerini kapsayan iyileştirmeler yapılmıştır. Konferans, konser ve tiyatro işlevlerine yönelik uygun akustik tasarım parametreleri, sahnede birleşen hacimler sistemi ve akustik perde sistemi tasarımı aracılığı ile sağlanma yoluna gidilmiştir. Bu bağlamda geliştirilen akustik tasarıma ilişkin ODEON Simülasyon Programı analizleri ve değerlendirilmeleri her işleve yönelik olarak ayrı ayrı ele alınarak Bölüm 2’de verilmiştir.

Yapılan bu analiz ve değerlendirmeler ışığında; Çok Amaçlı Salonda gerçekleştirilecek olan farklı işlevler (konferans, konser ve tiyatro) için geliştirilen

tasarıma ilişkin elde edilen parametreler, ulusal/uluslararası mevzuat ile karşılaştırıldığında; önerilen tasarımın doğruluğu ortaya konulmuştur (Tablo 2).

4. KAYNAKLAR

- [1] Mehta, M., Johnson, J., Rocafort, J., Architectural Acoustics Principles and Design, Merrill Prentice Hall, 301-306 (1999).
- [2] Demirel, F., Mimari Akustik Yayınlanmamış Ders Notları, Gazi Üniversitesi Mimarlık Fakültesi, Ankara (2021).
- [3] TS EN ISO 3382-1, Akustik- Odaların Akustik Parametrelerinin Ölçülmesi - Bölüm 1: Performans Boşlukları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara (2010).
- [4] TS EN 60268-16: 2012-01, Ses sistem cihazları-Bölüm 16: Konuşma iletim indeksi ile konuşma anlaşılabilirliğinin tarafsız sınıflandırılması, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara (2012).
- [5] Odeon A/S, "Room Acoustics Modelling Software, V 15.14 Auditorium", Denmark, (2018).

KÜÇÜK ODALARIN SES KAYIT VE KONTROL ODASI OLARAK AKUSTİK TASARIMI

Öğr. Gör. Murat Tıraş¹

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Beşiktaş, İstanbul, Türkiye

e-posta: murattiras@itu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma ses kayıt stüdyolarında yapılacak hacim akustiği tasarımını etkileyen faktörleri belirleyerek, bunların tasarım esnasında kullanımlarının esaslarını ortaya çıkarmayı amaçlamıştır. Bu çalışmada 48 m³ hacimli eğimli tavana sahip bir odanın akustik düzenleme yapılmamış mevcut durumunun hacim akustiği açısından yansım süresi ölçümleri yapıp değerlendirdikten sonra uluslararası kuruluşlardan ITU, EBU ve BBC'nin belirlemiş olduğu ölçütler gözetilerek hacim akustiği tasarımı yapıp uygulandıktan sonra, tekrar saha ölçüm sonuçları alınarak tasarımın başarı durumu değerlendirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda oda rezonanslarının hacim içerisinde renklenme oluşturacağı tespit edilmiş, bu renklenme problemi gidermek için Helmholtz rezonatör paneller uygulanmıştır. Aynı zamanda odaların yansım sürelerinin optimum değer aralığına gelebilmesi ve ilk yansıma gecikme sürelerinin kontrolü için ses yutucu ve dağıtıcı gereçler kullanılmış, genel olarak optimum yansım süresi aralığına ulaşılmıştır. Bu çalışma ses kayıt ve dinleme ortamlarının gerçek saha koşullarında düzenlenmesi ve raporlanması açısından özgündür. Araştırma içerisindeki bilgilerin, stüdyo kurulumu yapacak kişilere ve araştırmacılara bir veri kaynağı olması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Difüzyon, Kayıt odası, Kontrol odası, Oda rezonansları, Yansım süresi

TITLE

ABSTRACT

This study aimed to determine the factors affecting the design of the volume acoustics to be made in sound recording studios and to reveal the principles of their use during design. In this study, after measuring and evaluating the reflection time in terms of the volume acoustics of a room with a curved ceiling with a volume of 48 m³ in terms of volume acoustics, the volume acoustics design is made and applied by taking into account the criteria determined by ITU, EBU and BBC. The success status has been evaluated. As a result of the study, it was determined that the room resonances would cause coloration in the volume, and Helmholtz resonator panels were applied to eliminate this coloration problem. At the same time, sound absorbing and scattering devices were used to ensure that the reflection times of the rooms reach the optimum range and to control the first reflection delay times, and generally the optimum reflection time range was reached. This study is unique in terms of organizing and reporting sound recording and listening environments in real field conditions. It is aimed that the information in the research will be a source of data for the people and researchers who will set up the studio.

Keywords: Control room, Diffusion, Recording room, Reverberation time, Room resonances

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze ses her zaman merak edilen bir kavram olmuştur. İnsanlar sesin nasıl var olduğu ve kendileri tarafından nasıl algılandığını anlamak istemişlerdir. Bu merak sonucunda ses konusunda daha çok bilgi sahibi olmuşlar ve sesin kullanım alanını genişletmişlerdir. Konuşma ve müzik seslerinin sürekli gelişimi sonucunda sesin kayıt altına alınması gereksinimi doğmuştur. Bu gereksinim doğrultusunda sesin gürültüden etkilenmeden kaydedilebilmesi için kapalı ortamlar oluşturulmuştur. Kapalı ortamların gürültüden izole edilmesi için duvar, tavan, döşeme, kapı, pencere gibi yapı elemanları tasarlanmıştır. Ancak gürültüden izole olmak için girilen kapalı ortamların ses karakterinin, doğal sesi etkilediği görülmüş ve bu ses karakterini düzenleme gereksinimi meydana gelmiştir. Odanın ses karakterini belirlemek için öncelikli olarak sesin niteliği ve niceliğini tanımlayacak bazı parametreler kullanılmıştır. Bu parametrelerin denetim altına alınması için tasarlanan akustik gereçler, hacimlerin akustik koşullarının optimum değer aralıklarına gelmesi için kullanılmaktadır.

Sesin orijinal halini kayıt edebilmek için kayıt odalarının ses kaydını etkilemeyecek şekilde akustik düzenlenmesinin yapılması gerekir. Kontrol odalarında ise ses mühendislerinin kaydedilen sesi doğru duyabilmeleri ve buna göre düzenleme yapabilmeleri de oldukça önemlidir. Ses mühendisi her ne kadar kulaklıkla dinleme yaparak mimari akustik özellikleri devre dışı bırakabilse de akustik olarak iyi düzenlenmiş bir odada yapılan miks kadar olumlu sonuç elde edemeyecektir. Dinleyicilerin de bir mekân içerisinde kaydedilen sesi dinleyecekleri düşünüldüğünde, akustik düzenlemesi yapılmış odalar, ses mühendisinin kaydın nasıl duyulacağı ile ilgili doğru öngörülere sahip olarak, miks ve mastering aşamalarında orijinal sesin duyulabilmesi için gerekli düzenlemeleri yapmasına olanak sağlayacaktır [1].

Ses kayıt stüdyolarındaki çeşitli akustik düzenekler kullanılarak uygun akustik koşulların oluşturulması ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Kaminska ve arkadaşlarının (2013) yaptığı çalışmada QRD difüzörlerin ses kayıt stüdyolarında vurgusal yankı problemini ortadan kaldırdığını göstermiştir. 7 asal sayısına göre dizayn ettikleri difüzörü stüdyoya uygulayarak oda cevabındaki düzelmeyi göstermişlerdir [2].

Jovanovic (1996) BK Televizyon stüdyolarında akustik iyileştirme çalışmasını yapmıştır. Oda rezonanslarını, arka plan gürültü düzeylerini ve yansım süresini belirleyip akustik iyileştirme önerisini geliştirmiştir. Yapılan akustik iyileştirme sonucunda elde edilen yeni değerleri paylaşmıştır. İki tip ses yutucu panel tasarlayarak bunları stüdyonun duvarlarına dağıtmış, optimum yansım süresini elde etmiştir [3].

Rizzi ve Nastasi (2008) alçı duvar yapılarının stüdyolarda ki alt frekans ses yutum performanslarını sorguladıkları çalışmalarında kütle-boşluk-kütle şeklinde konumlandırılan alçı duvarların alt frekans bölgelerinde taş duvar yapılarına göre daha fazla rezonans olup, ses yutumu gerçekleştirdiğini göstermiştir. Oda mod frekanslarının etkinliğinin alçı duvar yapılarının olduğu stüdyolarda, alt frekans ses yutumunun daha fazla olmasından dolayı azaldığı görülmüştür [4].

Stamac ve arkadaşları (1997) bir müzik stüdyosunun kontrol odası için iyileştirme gerçekleştirmişlerdir. Tasarım kriteri olarak ilk 50 ms içinde tonmaystere ulaşan yansımaların doğrudan gelen sese göre 15 dB daha düşük düzeyde olmasını sağlayarak yansımadan bağımsız bölge (RFZ) oluşturmayı hedeflemişlerdir. Bas sesleri soğurmak için delikli panel soğurucular kullanmış, ses dağıtıcı olarak da N=11 ve N=19 asal sayılarına göre oluşturulmuş QRD difüzörleri tercih etmişlerdir. Sonuç olarak optimum değerlere ulaşılmış ve subjektif değerlendirmelerde de oldukça başarılı bulunmuştur [5].

Bu çalışmada ses kayıt stüdyolarında hacim akustiği tasarımını etkileyen faktörler belirlenmiş, bunların tasarım esnasında kullanımlarının esasları ortaya çıkarılmıştır. Hacim akustiği malzemelerinin, özellikle odanın kritik frekansının altında kalan frekans bölgeleri için kullanılan malzemelerin doğru konumlarda kullanımı önem arz etmektedir. Çok büyük ekonomik değeri olabilen müzik prodüksiyonlarının ses tasarımını doğru şekillendirecek ortamlarda yapılması gerekmektedir. Bu çalışma, hem malzemelerin frekans etki alanının hesaplanması, hem de ulaşılması gereken standart değerler hakkında bilgi sağlamıştır. Kayıt ve kontrol odası hacim akustiği tasarımı için izlenecek bir yöntem önerilmiş ve kullanılmıştır. Sonuçlar araştırmacılara ve stüdyo kullanıcılarına hacim akustiği malzemelerinin kullanımı hakkında bilgi verecektir.

2. TEMEL KAVRAMLAR

Bu çalışmada kullanılan bilgiler hakkında kısa bir literatür özeti verilmiştir. Bu bölümdeki bilgiler çalışmanın yöntemini, bulgu ve sonuç değerlendirme süreçlerini anlayabilmek adına gereklidir.

2.1 Oda Rezonansları

Kapalı hacimlerde ses dalgaları yansımalar yaparak ilerler. Yansıyan dalgalar duvarların ve diğer yüzeylerin yansıma özellikleri tarafından değiştirilir. Yüzeylerin boyutları ve şekilleri yansıyan sesin frekansına da bağlı olarak yansıma özelliklerini etkiler. Birçok yansımanın olmasından sonra oda sabit bir duruma gelir ve artık pratik olarak yansıyan ses dalgaları ses alanını etkile-

mez. Ancak dinleyicilerin işitme özelliklerinden dolayı ilk birkaç yansımadan sonraki ses alanının analizi, ses algısı için önemlidir. Oda içindeki bir dinleme noktasının ses analizi zaman fonksiyonuna bağlı olarak incelenmelidir. Hem fiziksel analizler hem de dinleyici deneyimleri göstermiştir ki oda özellikleri frekansa bağlı olarak değişmekte ve düşük frekanslarda küçük odalarda dinleme büyük odalara göre oldukça farklı olmaktadır.

Maddeler belli frekanslarda titreşim gerçekleştirirler. Maddelerin titreşim hareketi yaptığı bu frekanslara maddenin öz titreşim frekansı veya rezonans frekansı denir. Tek boyutta tel veya boruyu, iki boyutta plakaları, üç boyutta gerçekleşen titreşim hareketi için de oda içerisindeki hava örnek verilebilir.

Kapalı hacimdeki hava, katı cisimle aynı fiziksel prensibe göre davranır. Oda duvarlarının akustik özelliklerine, kapalı hacmin şekline, boyutlarına göre değişen frekanslarda oda rezonansları oluşur. Katı gövde ve oda, rezonans olmayan frekanslarda titreşime veya dalgalara zorlanabilir. Ancak bunlar uyarma sona erdikten sonra rezonans frekanslarına kayacaktır.

Oda modlarının tek boyuttaki durumunu anlayabilmek için karşılıklı iki duvar arasında iki ucu kapalı boru varmış gibi düşünülebilir. Borunun kapalı uçlarında maksimum basınç noktaları oluşacaktır. İki duvar arasında rezonans olan frekanstaki ses, hem sağdan hem de soldan gelen yansımalarının süper pozisyon oluşturması dolayısıyla daha güçlü bir etki oluşturur.

Oda rezonansları İngilizce de farklı isimlerle karşımıza çıkabilmektedir. Eigentones, room resonances, permissible frequencies, natural frequencies, modes kelimeleri oda rezonansları için kullanılır [6].

Oda rezonanslarını bulmak için Rayleigh'ın 1867 yılında geliştirdiği formül kullanılır.

$$f_{xyz} = \frac{v}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (1)$$

$n_x, n_y, n_z = x, y, z$ boyutlarının mod numaraları

$l_x, l_y, l_z = x, y$ ve z boyutunun uzunluğu(m)

$$v = \text{ses hızı} \left(\frac{m}{s}\right)$$

Oda rezonansları üç kısma ayrılır. Eksensel modlar iki yüzeyde, teğetsel modlar dört yüzeyde ve eğik modlar altı yüzeyde dolaşır. Daha az yüzeye temas eden modlar daha az soğurulacakları için daha şiddetlidirler.

2.2 Helmholtz Rezonatörler

Helmholtz rezonatörler bilinen en eski bas yutuculardır. Antik İskandinav kiliselerinde dairesel delikli hacimlerin bas yutucu olarak kullanıldığı gözlemlenmiştir.

Helmholtz rezonatörler boyun kısmındaki hava kütlesi ile iç hacimdeki havanın etkileşimi sonucu çalışan bir mekanizmadır. Rezonans frekansının ayarı kritiktir, boyun kısmındaki enerjinin soğurulması gerekir. Enerji soğurulmazsa ses ortamda kesildikten sonra da rezonatör tarafından tekrar yayılım gerçekleşir. Bu tür kullanım, yansım süresini arttırmak için orta çağ İskandinav kiliselerinde görülmektedir.

Helmholtz rezonatörler alt frekans bölgelerinde ihtiyaç duyulan yutulmayı sağlamak için kullanılır. Rezonatörün boyun kısmındaki hava ağırlığı ile iç hacimdeki havanın etkileşimi sonucu titreşen bir yay sistemi oluşur. Bu titreşimin dengelendiği durum rezonatörün içindeki hava kütlesinin öz titreşim frekansı olur. Boyun kısmındaki sürtünme arttırılarak yutucu etki arttırılabilir. Boyun açıklığı 1 cm'den büyük olan rezonatörlerde bu sürtünme azalacağı için tekrar yayılan enerji, yutulan enerjiden fazla olur [7].

Rezonatörün hacmindeki hava, kütle, boyun kalınlığı ve delik çapı, öz titreşim frekansını belirler. Helmholtz rezonatörlerin öz titreşim frekansı merkez olmak üzere belli bir frekans bant genişliğinde yutma etkisi olabilir. Bu frekans bant genişliği, rezonatörün içerisinde kullanılan lifli soğurucuların ses dalgasını taşıyan hava tanecikleri ile sürtünmesi sonucu belirlenir. Cam bir rezonatörün içerisinde çok az sürtünme olacağı için enerjinin büyük kısmı dışarıya doğru saçılır. Bu durumda alt frekans bölgesinde difüzyon sağlar. Rezonatörün yutuculuk bant genişliği çok dar olur ve seçimli bir rezonatör gibi davranır. Helmholtz rezonatörlerin delik kısmının hemen arkasına konulacak hava geçirgen lifli malzemeler yutuculuk bant genişliğini arttırarak daha geniş bir frekans aralığında etkili olmasını sağlar [8].

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Kayıt ve kontrol odalarının hacim akustiği tasarımı yapılırken ulaşılmaması beklenen optimum yansım süresi değerlerinin elde edilmesi ve oda rezonanslarının yaratacağı olumsuz duyum özelliklerinin giderilmesi için ses yutucu ve dağıtıcı malzemelerin tasarımı ve konumlandırılması önem kazanır. Bu çalışmada kontrol ve kayıt odası olarak kullanılacak bir odanın düzenleme öncesi yansım süresi ölçümleri yapıp, oda modları belirlenip hacim akustiği tasarımı yapılmıştır. Tasarımın uygulanmasının ardından son ölçümler yapıp planlanan optimum değerlere ulaşıp ulaşılmadığı değerlendirilmiştir. İzlenen yöntem Şekil 1' de sistematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. Yöntem

3.1. Mevcut durum yapı özellikleri

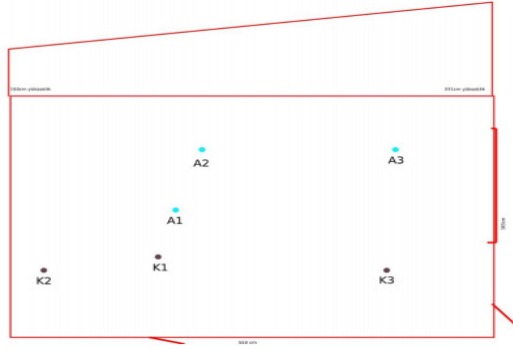
Kayıt ve kontrol odası olarak kullanılacak odanın hacmi 48 m³, uzunluğu 5.50 m, genişliği 3.65 m, yüksekliği 1.5 metre ile 3.31 metre arasındadır. Duvarlarda gaz beton üzerine kumaş kaplı ses yutucu paneller bulunmaktadır. Yer döşemesi linolyumdur. Stüdyo odasında 2 adet ahşap kapı, 1 adet gözlem penceresi bulunmaktadır.



Şekil 2. Düzenleme öncesi oda fotoğrafları

3.2. Oda ölçümleri

ISO 3382-2 mühendislik ölçüm yöntemi standartlarına uygun olarak kaynak ve mikrofon konumları belirlenmiştir. Ölçümlerde bir adet hoparlör, hoparlör yükseltici, omnidirectional Behringer ECM8000 ölçüm mikrofonu, mikrofon tripodu, Presonus ses kartı, bilgisayar, ARTA yazılımı kullanılmıştır. Ölçümlerde arka plan gürültü seviyesi, EDT, T10,T20, T30, C80, C50, parametreleri 125 ile 4000 Hz merkez oktav frekans bant aralığında ölçülmüştür. Hoparlör yerden 150 cm yukarıya, mikrofon yerden 120 cm yukarıda olacak şekilde konumlandırılmıştır. 3 farklı kaynak konumu, ve 3 farklı mikrofon konumu kullanılmıştır. Her mikrofon konumunda 3 ölçüm yapılmıştır. Odaya geniş bant beyaz gürültü verilmiştir. Toplam 48 ölçüm yapılmıştır.



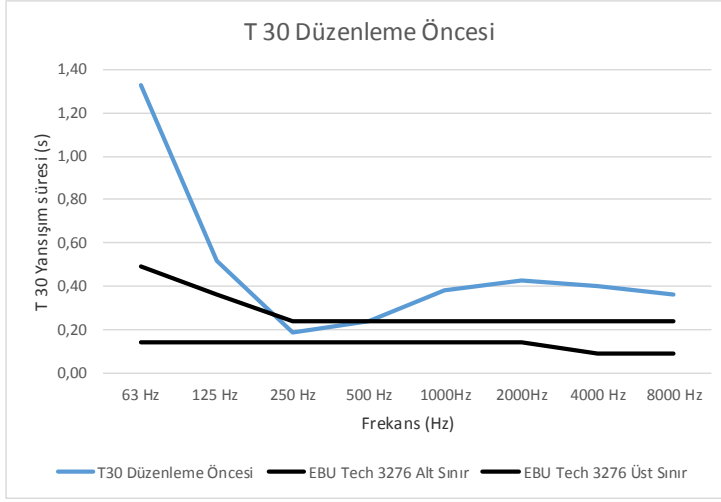
Şekil 3. Ölçüm noktaları

3.3. Yansıma süresi

Kayıt ve kontrol odası olarak kullanılacak odanın düzenleme öncesi yansıma süresi değerleri şekilde gösterilmiştir. Düzenleme öncesinde yansıma süresi değerleri 250 Hz ve 500 Hz bölgelerinde EBU Tech standartlarına göre sınır değerlerin içerisinde, diğer frekans bölgelerinde ise sınır değerlerin dışındadır.

Tablo 1. Düzenleme öncesi yansıma süresi

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
T30 Düzenleme Öncesi	1,33	0,52	0,19	0,24	0,38	0,43	0,40	0,36
EBU Tech 3276 Alt Sınır	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,09	0,09
EBU Tech 3276 Üst Sınır	0,49	0,36	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24




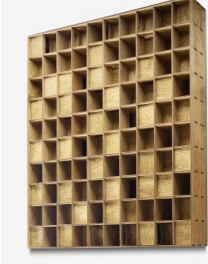


Şekil 4. Düzenleme öncesi T 30 yansıma süresi

3.4. İyileştirme çalışmaları

Düzenleme öncesi hacim akustiği ölçüm sonuçlarına göre 63 Hz ve 125 Hz bölgelerinde bas soğurucu akustik gereçlerin kullanılması gerektiği değerlendirilmiştir. Ayrıca yayıncı ses alanı oluşturmak için ses dağıtıcı ve saçıcı gereçlerin kullanılması öngörülmüştür. Bu nedenle bas soğurucu olarak yarıklı rezonatör paneller, Ses dağıtıcı olarak skyliner difüzörler ve 2D QRD difüzörler kullanılmıştır. Özellikle ilk yansıma noktalarına sünger soğurucular kullanılmıştır (Tablo 2).

Bas seslerin soğurulması için yarıklı helmholtz paneller köşelere ve duvar kesişim noktalarına uygulanmıştır. Tavanın eğimli olması sonucunda oda modları tam olarak belirlenemediği için arkasında ses soğurucu malzeme kullanılan yarıklı rezonatörün etkili olduğu frekans aralığının geniş olacağı öngörüldüğü ve genel olarak modların köşelerde ve duvar kesişim noktalarında maksimum basınç göstereceği düşünüldüğünden bu noktalarda kullanım gerçekleştirilmiştir (Şekil 5).

Tablo 2. Kullanılan akustik gereçler

			
Yarıklı Helmholtz panel (11 adet)	2D QRD difüzör	Skyliner difüzör	Ses yutucu sünger

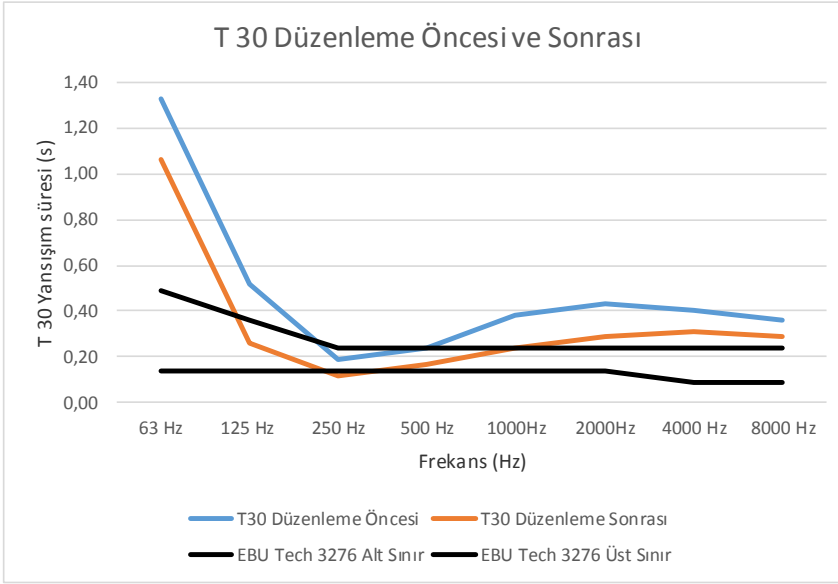


Şekil 5. Düzenleme sonrası oda fotoğrafları

İyileştirme çalışmaları sonucunda elde edilen yansımam süresi değeri ile düzenleme öncesi yansımam süresi değeri karşılaştırması Şekil 6'da görülmektedir.

Tablo 3. Düzenleme öncesi ve sonrası yansımam süreleri

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
T30 Düzenleme Öncesi	1,33	0,52	0,19	0,24	0,38	0,43	0,40	0,36
T30 Düzenleme Sonrası	1,06	0,26	0,12	0,17	0,24	0,29	0,31	0,29
EBU Tech 3276 Alt Sınır	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,09	0,09
EBU Tech 3276 Üst Sınır	0,49	0,36	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24



Şekil 6. Düzenleme öncesi ve sonrası yansıma süreleri

4. SONUÇ

Yapılan düzenleme sonucunda 63 Hz bölgesinde yansıma süresi 0,27 saniye azalmasına rağmen sınır değerlerin üstünde kalmıştır. Bu durumun nedeni olarak bu frekans bölgesinin ölçümünün zor olması ve kullanılan yarıklı rezonatörlerin yarık büyüklüklerinin fazla olmasından dolayı etki alanının daha üst frekanslara doğru kayması olarak düşünülmüştür.

125 Hz bölgesinde ise yansıma süresi düzenleme sonrasında sınır değerler içerisinde gerçekleşmiştir. 250 Hz frekans bandında düzenleme öncesinde yansıma süresi sınır değerler içerisinde yer almakta iken, düzenleme sonrasında sınır değerlerin biraz altına inmiştir. 500 ve 1000 Hz bölgelerinde sınır değerler sağlanmıştır. 2000 Hz, 4000 Hz ve 8000 Hz bölgeleri için yansıma süresi için azalış gerçekleşmiş ancak yine de sınır değerlerin üstünde kalmıştır. Kullanılan difüzörlerin yayıncı ses alanı oluşturarak bu frekans bölgelerinde ki ses yutumunu arttırdığı gözlenmiştir.

5. KAYNAKLAR

- [1] M. Long, "Design of Studios and Listening Rooms," *Archit. Acoust.*, pp. 829–871, 2014, doi: 10.1016/b978-0-12-398258-2.00021-0.
- [2] P. Kamińska, M., Kobylt and B. K. and J. S. Sokolnicki, "Convention Paper," *Audio Eng. Soc. Conv. Pap.* 8890, pp. 1–11, 2013.
- [3] M. S. Jovanovic, "Acoustics of BK Studio Alfa Preprint 4255 (P-8) Acoustics of BK TV Studio ALFA," *AES Conv. Pap.*, vol. 55, 1996.
- [4] L. Rizzi and F. Nastasi, "Small studios with gypsum board sound insulation: a review of their room acoustics, details at the low frequencies," *AES Conv. Pap.* 7467, 2008.
- [5] D. Stamac, Ivan., Mladen, Skalec., Zenko, "ONE-YEAR EXPERIENCE WITH REBUILT CONTROL ROOM IN MARIBOR," *AES Conv. Pap.*, vol. 102, 1997.
- [6] F. A. Everest, *Master Handbook of Acoustics*, vol. 53, no. 9. Mc Graw Hill, 2001.
- [7] D. R. Raichel, *The Science and Applications of Acoustics Second Edition*. New York: Springer Science+Business Media, Inc, 2006.
- [8] A. Everest and M. Shea, "how to bulda small budget recording studio.pdf." Mc Graw Hill, USA, 2012.

KAYIT STÜDYOLARININ AKUSTİK TASARIM YAKLAŞIMLARI VE ÖRNEK UYGULAMA

Dilara Kelle¹

İstanbul Teknik Üniversitesi, Şişli, İstanbul, Türkiye
e-posta: dilarateke@gmail.com

Ayça Şentop Dümen²

İstanbul Bilgi Üniversitesi, Eyüp, İstanbul, Türkiye
e-posta: aycasentop@bilgi.edu.tr

Sevtap Yılmaz³

İstanbul Teknik Üniversitesi, Şişli, İstanbul, Türkiye
e-posta: demirkale@itu.edu.tr

ÖZET

Kayıt stüdyolarının, 50'li yıllardan günümüze uzanan gelişiminde akustik tasarımı konusunda pek çok önemli çalışma yapılmış, homojen ses koşullarının oluşturulması adına optimum oda boyutları, oda modlarının analizi, hoparlör ve alıcı konumlandırması ve yüzey özelliklerinin belirlenmesi için çeşitli yaklaşımlar önerilmiştir. Bu çalışmada kontrol odası ana tasarım prensipleri derlenmiş ve örnek bir oda üzerinde uygulanarak gösterilmiştir. Prensiplere uygun bir plan şeması geliştirilerek dalga akustiğine dayalı modelleme yapan COMSOL yazılımına aktarılmış, mod analizi ve frekans tanım alanında analizler yapılmıştır. Hesaplanan mod frekansları ve reverberasyon süresi de gözetilerek tasarlanan iç kabuk için LEDE (live-end-dead-end) ve RFZ (reflection free zone) yaklaşımları uygulanmıştır. İç kabuğun tanımlanmasının ardından analizler tekrarlanarak sonuçlar irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: kayıt stüdyosu, kontrol odası, oda modu, akustik simülasyon

ACOUSTICAL DESIGN APPROACHES FOR RECORDING STUDIOS AND APPLICATION ON A CASE STUDY

ABSTRACT

Acoustical design of recording studios has been widely studied together with its rapid development since 50's. In order to create homogeneous sound environment, various design approaches were proposed with regards to the optimum room dimensions, analysis of room-modes, loudspeaker - receiver positions and room boundary characteristics. This study outlines the main design approaches for control rooms and shows their applicability on an example room. A layout was developed according to the principles and modeled in a wave-based modeling software 'COMSOL', where mode-analysis and frequency domain analysis were performed. The interior boundaries were designed according to LEDE (live-end-dead-end) and RFZ (reflection free zone) approaches considering also the calculated mode frequencies and the reverberation time. The analyses were repeated after defining the interior boundaries and the results were discussed.

Keywords: recording studio, control room, room mode, acoustic simulation



1. GİRİŞ

Kayıt stüdyolarının 50'li yıllardan günümüze uzanan gelişiminde akustik tasarımı konusunda pek çok önemli çalışmalar yapılmıştır. Ancak günümüzde halen doğru bir şekilde akustik tasarımının yapılmaması sonucunda genellikle doğru bas seviyelerinin alınmasında problem çıkmaktadır. Çoğu zaman kontrol odasında kulağa doğru gelen bas düzeyi başka bir yerde çalıştığı zaman fazla bulunmaktadır. Bunun sebebi odadaki akustik düşüşler (nulls) sonucu oda içerisinde kulağa düşük gelen bas seviyesini tolere edebilmek için kullanılan yüksek bas düzeyinin başka bir ortamda abartılmış bulunmasıdır. Parça ancak hem stüdyoda hem de diğer ortamlarda iyi duyulduğu takdirde “taşınabilir”dir [1]. Öte yandan kontrol odaları hoparlörlere benzer şekilde müzik üretimi ve kayıt sürecinde ses mühendislerinin iletmek istedikleri müzik koşullarını sağlamak üzere bir araç olmalıdır. Bu süreçte kayıtlar bir araya getirilmekte, ses efektleri eklenmekte, kayıt dengeleri oluşturulmakta, enstrüman ve vokal etrafındaki ortam yaratılmaktadır. Bir diğer yandan kontrol odası aynı zamanda kayıt sonuçlarını denetleyebilmek için ortalama bir oturma odası akustik ortamını da oluşturabilmelidir. Çünkü pek çok müzik eseri oturma odası benzeri ortamlarda dinlenmek üzere kaydedilir [2]. Stereofonik ses teknolojileri ile beraber erken yansıma sorunları belirmiştir. Bu yansımaların kontrol edilebilmesi için fazla yutucu uygulanması ile başlangıçta akustik açıdan ölü hacimler olmuşlardır [3]. Diğer yandan stereo kayıtlar simetrisinin önemini artırmıştır [2].

Oda akustiği ile ilgili en önemli standart “ISO 3382-1: 2009 Odaların akustik parametrelerinin ölçülmesi - Bölüm 1: Gösteri mekanları” standardıdır [4]. Bu standart konser salonu, tiyatro gibi büyük hacimli yapılarda oda parametrelerinin ölçüm ve hesabı ile ilişkilidir. Bu standart küçük hacimli ve yaygın ses alanı karakterine sahip olmayan odalarda kullanılamamaktadır. Küçük odalarla ilgili bir standart bulunmamaktadır. Yıllar içerisinde kontrol odalarının hacim akustiği tasarımı için çeşitli yaklaşımlar ortaya konulmuştur. Bunlardan en çok ses getireni LEDE - canlı taraf-ölü taraf (*live-end-dead-end*) prensibi olmuştur [5]. Bu prensipten yola çıkarak geliştirilen RFZ - yansısız alan (*reflection free zone*), çok küçük odalar için geliştirilen MyRoom prensibi günümüzde yaygınlaşan surround ses sistemine uygun düzenlemeler bunu takip etmiştir [6]. Küçük odaların tasarımı için International Telecommunication Union (ITU) tarafından ve European Broadcasting Union (EBU) tarafından düzenlenmiş bazı öneriler bulunmaktadır. Kontrol odası tasarımı ile ilgili ITU'nun iki önemli yayını bulunmaktadır: ITU-R BS.1116-1 [7] ve ITU-R BS.775-1 [8]. Bunlardan birincisi dinleme koşulları ile ilişkilidir. Oda boyutları, oranlar, reverberasyon süresi, ses alanı vb. konuları içermektedir. İkincisi

ise hoparlör düzeni ile alakalıdır. EBU'nun ise dinleme işlevinin ön planda olduğu ortamlar için üç önemli yayını bulunmaktadır: Monofonik ve iki kanallı stereofonik sesler için EBU Tech 3276-1998 [9] ve EBU Tech 3286 [10].

Bu çalışmada, literatürden elde edilen verilere uygun olarak tasarlanan hacimde, kabuk biçimine bağlı olarak odanın düşük frekans davranışı ve oda modları ele alınmış, frekans tepkisindeki sorunlar incelenmiştir.¹ Elde edilen sonuçlar optimum değerlerle karşılaştırılarak tasarım kriterleri üzerinden kabuğun etkinliği ve odanın geometrisi değerlendirilmiştir.

2. KAYIT ODALARININ AKUSTİK AÇIDAN TASARIMI

Bir kayıt odasında oluşabilecek akustik sorunlar (1) alçak frekanslarda oluşan modlar, (2) hoparlör sınır alan etkileşimi, (3) konsol yüzeyi ve ekipmanlardan gelen güçlü erken yansımalar, (4) paralel yüzeyler arası oluşan tekrarlı eko, (5) geç yansımaların yoğunluğu, (6) yetersiz saçıcılık ve yetersiz akustik sarmalanma şeklinde kendini göstermektedir. Bu sorunların çözümü için literatürde yer alan prensipler bu bölümde aktarılacaktır.

2.1. Oda modlarının değerlendirilmesi

2.1.1. Oda boyutları

Küçük odaların akustik tasarımında öncelikle modların incelenmesi ve olumsuz etkilerinin azaltılması gerekmektedir. Oda boyutları mod karakteristiğini belirleyen en önemli parametredir. Büyük ve akustik açıdan olumlu odalarda mod yoğunluğunun arttığı ve pürüzsüzleştiği gözlemlenmektedir. Akustik uzman projenin erken aşamalarından itibaren projeye dahil olduğunda optimum boyutlar ve oda formu konusunda yönlendirme yaparak modları düzenleyebilmektedir. Kayıt odaları için en uygun boyutların bulunması pek çok araştırma konusu olmuştur. Geçmişte Sabine, Bolt, Sepmeyer ve Loudon tarafından önerilen bazı hacim oranları bulunmaktadır. Walker, pratikliği sağlamak açısından bazı altın oranları tanımlamak yerine bir aralık tanımlayan aşağıdaki formülü önermiştir [11]:

$$1.1 \frac{w}{h} \leq \frac{l}{h} \leq 4.5 \frac{w}{h} - 4 \quad \text{ve} \quad l < 3h \text{ ve } w < 3h \quad (01)$$

¹ Bu çalışmada sunulan kontrol odası Prof. Dr. Sevtap Yılmaz tarafından 2014-15 Bahar döneminde verilen "Radyo ve Televizyon Stüdyolarının Akustik Tasarımları" adlı doktora dersi kapsamında çalışılmış, Prof. Dr. Sevtap Yılmaz tarafından BAP projesi kapsamında alınan Comsol yazılım lisansı ile 2021 yılında simülasyon ortamında analizleri tamamlanarak yayın haline getirilmiştir.

Bu formülde w eni, l boyu, h : yüksekliği göstermektedir. EBU ve ITU bunun yanı sıra l , w , h birbirinin %5 tam sayı oranlarında kalıyorlarsa bunun olumsuz olacağını çünkü bu durumun mod oluşma olasılığını arttırdığını belirtmektedir [9]. Günümüzde tasarımcılar ilk yaklaşım olarak bu yöntemi yaygın olarak kullanmaktadırlar. Ayrıca frekans tepki eğrisine bağlı olarak optimizasyon yöntemleri de geliştirilmiştir [12].

2.1.2. Modların etkin frekans aralığı

Oda hacmi ve boyutlarına bağlı olarak mod bölgesi Schroeder bağıntısı ile yaklaşık hesaplanabilir. Kesme frekansı (f_{kesme}) ile kritik frekans (f_{kritik}) arasında yer alan mod bölgesinde modların etkisini azaltmak için oda dış kabuğu rijit ve asimetrik olmalıdır. Sorunlu modlar için alçak frekans yutucuları (yaylı, panel, helmholtz tipi vb.) tasarlanmalıdır. Kritik frekansın (f_{kritik}) üstündeki bölgede saçıcılar ve yutucular etkinlik kazanır [13].

$$f_{kesme} = \frac{c_0}{2 \cdot l_{en \text{ uzun kenar}}} \quad (02)$$

$$f_{kritik} = 2102 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad (03)$$

Bu denklemlerde f : frekans, Hz, V : hacim, m^3 , l : Kenar uzunluğu, $m = 4 \cdot (L_x + L_y + L_z)$, c_0 : sesin hızı, m/sn göstermektedir.

2.1.3. Mod yoğunluğu ve aralığı

Genel olarak frekans yükseldikçe mod sayısı da artmaktadır. Mod yoğunluğu ne kadar fazla olursa renklenme o kadar az olacaktır. Dikdörtgen ve yaygın bir ortamdaki mod yoğunluğunu hesaplamak için bir takım formüller bulunsa da, odadaki duvar, pencere ve kapıların alçak frekanslardaki diyaframatik yutucu davranışı, asimetrik oda biçimlerinin etkisi ve mod enerjilerini hesaplamak için dalga akustiğine dayalı simülasyon yöntemi kullanılmalıdır. Oluşan modların frekans dağılımı değerlendirilirken kullanılacak kabuller aşağıda derlenmiştir [3, 14-16]:

- Mod sayısı frekansla beraber düzenli bir biçimde artmalıdır. Her 1/3 oktav bant eşit sayıda ya da bir öncekinden daha fazla sayıda moda sahip olmalıdır.
- Hiç bir frekansta iki mod olmamalıdır. Yalnızca, mod yoğunluğu 5'e eşit ya da 5'ten büyük olan 1/3 oktav bantlarda çakışma tolere edilebilmektedir.

- Frekans arttıkça mod sayısı azalır ya da modlar çakışır pik veya düşüşler oluşur. Ancak bir önceki frekans bandına göre yalnızca bir eksik moda sahip frekans bantları eğer bu bantta toplam mod sayısı 3 ya da daha fazlaysa iyi kabul edilebilir.
- Mod oluşan frekanslar arası mesafe %5'in altında olmalı ancak çakışmalıdır.
- Eksenel mod frekansları arasındaki fark 20 Hz'den fazla olmamalıdır [15]
- Kullanılan oda boyutlarının yanı sıra boyutların yaklaşık %3'ü kadar küçük ve büyük hali için de hesaplar tekrarlanmalıdır. Kriter gerçek odayı ve iki hayali odayı sağlamalıdır.

Bu kabullerin yanı sıra optimum mod aralığının subjektif algı testleri ile belirlenmesi üzerine çalışmalar sürmektedir. Örneğin Fazenda ve Wankling 2008'de yaptıkları subjektif algı çalışmaları ile optimum mod aralığını araştırmış, frekans ve Q faktörden bağımsız olarak modal bant genişliği için %25 - 40 aralığının hedeflenmesi gerektiğini belirtmiştir [16]

2.2. Hoparlör ve alıcı konumlarının belirlenmesi

Kaynak konumu odanın davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Hoparlörden yayılan direkt ses ile odanın özellikle hoparlöre yakın yüzeylerinden gelen yansımalar etkileşime girebilmektedir. Yapılan psikoakustik deneylerde kaynak ve alıcı konumunun önem sıralamasında düşüş ('decay') süresinden sonra ikinci sırada geldiği görülmüştür. Hoparlörün üç kenara yakın olduğu (köşede olduğu) durumda modlar ve bas enerjisinin dengesiz artışı sebebi ile akustik ortam en kötü algılanmıştır [17]. Hoparlörün yakın olduğu duvarlardan gelen yansımalar özellikle düşük frekanslarda direkt ses ile etkileştiğinde faz açısına bağlı olarak birleşebilirler veya birbirlerini sönmüleyebilirler [18]. Bu nedenle hoparlörün duvar içine yerleştirilmesi ya da tavan - döşeme ve duvar yüzeylerine asimetric mesafede yerleştirilmesi önemlidir.

Diğer bir konu hoparlör sayısıdır. Hoparlör aralıkları stereo ses düşünülerek belirlendiğinden bu hoparlörlerden mono ses çalındığında enstrüman karakteristikleri ve zamansal özellikler yanlış algılanmaktadır. Örneğin saksofonun algılanan kaynak genişliği çok fazla olmaktadır. Bu sorunun çözümü için ekstradan bir orta monitörün bulundurulması önerilmektedir. Hoparlör yüksekliği gerçek mikrofona ve enstrüman yüksekliklerine yakın olmalıdır [3].

Hoparlörler yerleştirilirken, hoparlörler ve dinleyici arası eşkenar üçgen oluşturulur. Üçgenin dinleyici konumundaki köşesinin yeri ile ilgili farklı yaklaşımlar vardır. Köşenin ses mühendisinin arkasında olması durumunda

algılanan enerjinin büyük kısmı direkt ses olmaktadır. Bu sayede taraklama etkisi ve ses alanının bozulması ihtimalleri önlenir. Diğer bir kısım tasarımcı ise köşeyi tam ses mühendisinin olduğu konumda tutmaktadır. Dinleyicilerin hoparlöre uzaklığı: 2.0 - 4.0 metre ve hoparlörler arasındaki düz aksın dinleyici pozisyonuna dik uzaklığı yaklaşık 1.8 - 3.6 metre olmalıdır [3, 19].

2.3. Yüzey kaplama özelliklerinin belirlenmesi

Oda geometrisinin yanı sıra kullanılan malzemeler de büyük önem taşımaktadır. Geleneksel olarak odanın akustik iyileştirmesi oda modlarının hesaplanması ve sorunlu frekanslara özel bas tuzaklarının tasarlanması şeklinde gerçekleşir. Oda içerisinde yutucu miktarı, yutucu ve yansıtıcıların konumu çok sayıda çalışmaya konu olmuştur. Geometrik temellere ve yutucu kullanımına dayalı yaklaşımlarda ortak konu güçlü ve yönlü yansımaların engellenmesi ve dolayısıyla renklenmenin ve frekans tepkisindeki düzensizliklerin önüne geçmektir. Erken yansıma süresi Beranek'in de belirttiği gibi mekan algısı için oldukça önemlidir. Erken yansımalar eğitilmiş bir dinleyiciyi odanın ne kadar küçük olduğu hakkında bilgilendirmekte ve daha uzun erken yansıma süresine sahip olan kayıt stüdyosundaki akustik şartların kontrol odasında algılanmasının önüne geçmektedir. Bunun yanı sıra yaklaşık eşit enerjiye sahip direkt ve yansıyan ses havada karşılaştıkları zaman tarak süzgeci ('*comb filter*') etkisi yaratmaktadır. Yansımanın gecikme süresi ne kadar az ise bu etki o kadar artmaktadır. Diğer bir konu, arka duvarlardan gelen yansımalar sebebi ile tarak süzgeci ('*comb filter*') etkisinin oluşmasıdır [5]. Bu sorunların çözümü için önerilen yaklaşımlardan canlı taraf-ölü taraf ('*live-end-dead-end*' - LEDE) ve yansısız alan ('*reflection free zone*' - RFZ) temel prensipleri çalışmada uygulanmıştır.

LEDE yaklaşımında ana fikir, erken yansımaları konsol alanından uzaklaştırma ve geç yansımaların homojen saçılımına dayanır. Buna göre odanın ön kısmı yutucu olmalıdır. Bu sayede ses mühendisi yalnızca hoparlörlerden gelen sesi duyacaktır ve ses netliği artacaktır. Ancak tamamen anekoik bir oda istenmediğinden, yansıtıcı yüzeyler oda içerisinde uygun yüzeylere yerleştirilerek hacim algısı sağlanmalıdır. Bu yüzeylerden gelecek yansımalar çok keskin olduğu takdirde tarak süzgeci ('*comb filter*') gibi filtreleme etkilerine sebep olacağından oda arkasında saçıcı yüzeyler oluşturulmalıdır. Odanın simetrik olması ve düşük frekanslarda reverberasyon süresinin kontrol edilmesi diğer gerekliliklerdir. Odanın ön tarafının yutucu kaplanması ile ilk yansıma gecikme süresi ('*initial time delay gap*' - ITDG) artmakta ve dinleyicide daha büyük bir odada olduğu hissini uyandırmaktadır. Kontrol odasının ITDG'si-

nin stüdyonun ITDG'sinden daha büyük olması ve daha düşük seviyede olması sayesinde reji, stüdyonun ITDG'sini duyabilmektedir. Arka duvarlardan gelen yansımalar, ön duvarlar gibi tarak süzgeci etkisine sebep olmamaktadır ve saçıcı yüzeyler sayesinde sık ve çok sayıda tarak süzgeci oluşmakta, rejinin kulağına yoğun ve birbirine yakın yansımalar ulaşmaktadır [2, 5, 20].

RFZ yaklaşımı, LEDE prensibinin devamı olarak başka tasarım grupları ve saçıcı üreticileri tarafından geliştirilmiştir. Odalardaki düşük frekans sorunları modlar ve dinleyici noktasındaki frekans davranışları ile sınırlı kalmamaktadır. Diğer bir problem hoparlör-sınır girişimi yanıtı (*speaker boundary interference response* - SBIR) olarak adlandırılmaktadır. Hoparlör, arkasındaki duvardan belli bir mesafe uzaklıkta konumlandırıldığında arkadan yansıyan dalga, hoparlörden yayılan dalga ile etkileşime girerek frekans davranışlarında anormalliklere sebep olmaktadır. Bu etki sanal kaynak görüntüsü oluşması nedeniyle oluşmaktadır. RFZ tasarım yaklaşımında köşeler 120 derece açılı olacak şekilde yüzeyler eğildiğinden sanal kaynak sayısı azalmaktadır. Monitörler 120 derece açı oluşturan bu duvarlara gömülerek yerleştirildiğinde (*flush mounted*), sanal kaynaklardan dinleyici pozisyonuna ses yansıması önlenmektedir. Bu prensip plana uygulanabildiği gibi kesite de uygulanabilmektedir. RFZ, LEDE'nin uzantısı olduğundan yutucu ve saçıcı uygulanacak yüzey tanımları LEDE ile aynıdır [3].

2.3.1. Reverberasyon süresinin kontrolü

Reverberasyon süresinin kontrol odası akustiğindeki önemi tartışmalıdır. Oda içerisinde yaygın bir ses alanı bulunmadığından ve çok fazla yutucu olduğundan kontrol odası akustik tasarımında reverberasyon süresinden daha önemli olan oda modlarıdır [2]. Kontrol odasında işitilecek akustik ortamın aynı zamanda normal bir oturma odasına yakın olması hedeflendiğinden fazla yutuculuktan kaçınılmalıdır. Bu yüzden istenen reverberasyon süresi aralığı 0.3 – 0.4 sn olarak tanımlanmıştır [6, 11]. Küçük odaların reverberasyon süresi hesabında Sabin yönteminden ziyade Eyring hesap yöntemi kullanılmaktadır. Sabin denklemi yutucu malzemelerin homojen yerleştirilmesi ve yutuculuğun düşük olması durumunda daha doğru sonuç vermektedir. Kontrol odası akustiği bu kriteri sağlamamaktadır [21].

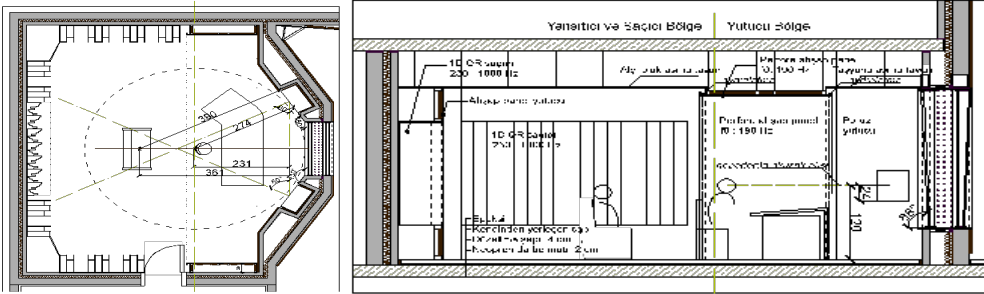
3. ÖRNEK ODA ANALİZİ

Bu bölümde yukarıda aktarılan tasarım prensipleri bu çalışma için tasarlanan örnek bir plan üzerinde uygulanmış ve oda modları dalga-bazlı akustik modelini uygulayan COMSOL v.5.3a (Lisans no: 17076462) simülasyon yazılımından yararlanarak değerlendirilmiştir.

3.1. Oda geometrisi

Oda modlarının etkin çözümü için rijit kabuğun asimetrik olması tercih edilir. Bu çalışmada hem ideal olarak belirtilen oda boyutlarının kontrolü, hem de paralel yüzeylerden kaynaklanabilecek sorunları gözlemlemek adına dikdörtgen bir oda ele alınmıştır. Yalnız hoparlörlerin yer aldığı duvarda simetri kırılmış ve RFZ tasarım prensibini sağlayacak şekilde açılarak hoparlörler duvara gömülü yerleştirilmiştir. Oda boyutları Walker oda boyutu kriterlerini sağlayacak şekilde 5.6 x 8.16 x 3.5 m olarak belirlenmiştir. Bu boyutlar Sepmeyer'in oranlarını (2,33(l);1.6(w);1(h) *3,5) ve ITU, EBU kriterlerini de sağlamaktadır.

Hoparlör yüksekliği ve açısı konsol ve çevre duvarlardan uygunsuz yansımalara sebep olmayacak şekilde düzenlenmiştir. Hoparlör konumu belirlenirken monitörlerin akustik aksının kulak hizasında (1,2 m) olması göz önünde bulundurulmuştur ve dinleyici – hoparlör mesafesi kriterleri sağlanmıştır. Dinleyici-hoparlör mesafesine uygun olarak orta-alan (*mid-field*) monitörler kullanılmıştır. 82 cm yüksekliğe sahip monitör yatay uygulanarak konsoldan kaynaklı sesin gölgelenme etkisi önlenmiştir. Oda da ses mühendisi dışında bulunacak dinleyiciler için Franssen'in önerdiği gibi hoparlörlerin aks çizgilerinin oluşturduğu alanda ilave oturma ünitesi konumlandırılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Kontrol odası plan ve enine kesiti

3.2. Simülasyon ortamına odanın tanımlanması

Hacim akustiğinde genel olarak kullanılan üç modelleme metodu bulunmaktadır; dalga bazlı akustik (*wave-based acoustic*) metodu, geometrik akustik (*geometrical acoustic*) metodu ve difüzyon denklemi (*diffusion equation*) metodu. Geometrik akustikte sesin dalga özellikleri göz ardı edilerek, basitçe enerjinin eklemesiyle hesap modelleri oluşturulur. Dalga bazlı modellerde ise ses dalgası faz bilgisi taşıdığı için faz etkileşimi de sonuç olarak modellenir

[22]. Suh ve Nelson'ın faz bilgisi taşıyan modeller ile geleneksel enerji modelleri arasında yaptıkları karşılaştırmalarda, faz etkileşiminin yarattığı değişikliklerin özellikle ilk yansımalarda dramatik farklılıklar oluşturduğu görülmüştür [23, 24]. Ölçümlerle yapılan karşılaştırmalarda, sonlu eleman yöntemiyle ('*Finite Element Method*' - FEM) empedansın hesap modeline dahil olması, alçak frekanslarda model sonuçlarının ölçümlerle daha fazla örtüşmesini sağlamış, aynı zamanda bu tutarlılık öznel testlerle doğrulanmıştır [25].

Hacim mod bilgisi ve akustik parametrelerin elde edilmesi; rezonans analizi ('*eigenfrequency*'), zaman tanım alanında ('*time domain-transient*') analiz ve frekans tanım alanında ('*frequency domain*') analiz olmak üzere üç farklı hesap ara yüzünden elde edilebilmektedir. Bu analizlerde, ortamın, kaynak ve sınır koşullarının özelliklerinin dalga teorisine uygun olarak tanımlanması gerekmektedir. Özellikle alçak frekanslarda önem kazanan faz bilgisine uygun olarak yüzey tanımlanması ses yutum katsayısı yerine faz bilgisi taşıyan empedans olarak yapılmalıdır. Aynı zamanda enerji bazlı modellerden farklı olarak saçıcı yüzeylerde saçıcılık katsayısı yerine gerçek formuyla eş olarak modellenip hesaplanır. Kaynak olarak modellerde monopole-dipole ve quadropole gibi yayılım tipleri tanımlanabilir. Alıcı olarak noktasal analizler dışında binaural parametreler için modelde kafa aktarım fonksiyonu ('*head related transfer function*' - HRTF) tanımlanması gerekmektedir.

Bu çalışmada öncelikli olarak analiz edilecek ortamın modeli sketch-up programında modellenerek COMSOL CAD-Import modülü ile hesap arayüzünde tanımlanmıştır. Analiz tipine göre kaynak özellikleri, yüzey özellikleri, kaynak ve alıcı konumları belirlenerek hesaplar yapılmıştır. Rezonans analizi ve frekans tanım alanı analizi olarak iki hesap yöntemi bağıntıları sırasıyla Denklem 4 ve 5'te verilmiştir [26].

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} \nabla p \right) + \frac{\lambda^2 p}{\rho_c c^2} = 0 \quad (04)$$

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p - q) - \frac{\omega^2 p}{\rho_c c^2} \right) = Q \quad (05)$$

Rezonans analizi dış kabuk baz alınarak ('*hard-boundary*') hesaplanmıştır. Böylelikle iç kabuk sönümlenmesi göz ardı edilerek alıcı ve kaynak gözetimsiz hacim geometrisi ve boyutlarına bağlı rezonans dağılımı elde edilmiştir. Frekans tanım alanı analizinde ise iç kabuk formu ve özellikleri tanımlanarak kaynak ve alıcı konumuna bağlı frekans bazında basınç değişimi analizleri yapılmıştır.

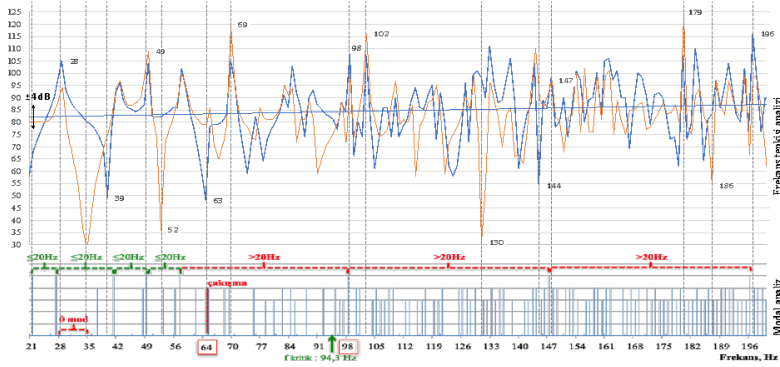
Modelin kesinliğini belirleyen en önemli değişkenler yüzey tanımı ve ayrıklaştırma ('*discretization*') yani kafes boyutudur. Aynı zamanda zaman tanım alanı analizlerinde belirlenen zaman aralıkları da modelin çözünürlüğünü yükselterek sonuçların kesinliğini artırmaktadır. Fakat kafes boyutu ve zaman ya da frekans aralıklarının artması bilgisayar hesap yükünü de artırdığından, hesapları mümkün kılabilmek için optimum aralıkları kullanmak gerekmektedir. Çalışma kapsamında mod ve frekans tanım alanında analiz kullanıldığından kafes boyutu maksimum frekans değerine göre belirlenmiştir. İdeal boyut olarak $\lambda/d \geq 4.8$ önerilmektedir [27]. Çalışmada kullanılan frekans analiz aralığı 20-300Hz olarak belirlenmiş buna bağlı olarak maksimum eleman boyutu 220Hz'ye göre 0.23m olarak (DOF=107641) alınmıştır. Sonuçların doğruluğunda diğer önemli etmen olan empedans bilgisi ölçüm ya da ampirik yöntemlerle elde edilebilmektedir, fakat yutuculuk değeri kadar kolay ulaşılması mümkün olmamaktadır. Faz değişimi özellikle panel tipi diyaframatik sönümleyicilerde önem kazanmaktadır ve doğru bir analiz için $Z(re)$ ve $Z(im)$ kompleks empedans değerleri olarak tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmada yüzey yutuculuk değerleri yansıma katsayısına çevrilmiş, aşağıdaki bağıntı ile empedans verisi olarak tanımlanmıştır [28].

$$Z = \rho_0 c \frac{1 + \sqrt{1 - \alpha}}{1 - \sqrt{1 - \alpha}} \quad (06)$$

Bu formülde Z: empedans, ρ_0 ve c: sesin hızını (m/s) göstermektedir.

3.3. Oda Modları

Modların etkin olduğu frekans bölgesi $f_{kesme} = 21$ Hz, $f_{kritik} = 94$ Hz aralığı olarak hesaplanmıştır. Modların frekans dağılımı ve ses mühendisi ile oda orta noktasındaki dinleyici konumu için frekans tepki analizleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Mod dağılım grafiğinde enerjisi en yüksek olan ekstenel modlar uzun çizgi ile gösterilmiş, tanjant ve oblik modlar göreceli olarak bunu takip etmiştir.



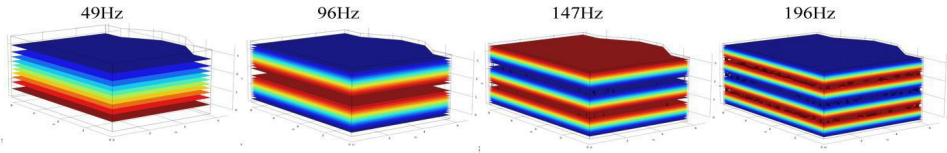
Şekil 2. Mod dağılımı ve frekans tepkisi analizi (Mavi: Ses mühendisi pozisyonu, Turuncu: Odanın orta noktasında dinleyici pozisyonu)

- Genel olarak bakıldığında ses mühendisi konumunun oda ortasında yer alan dinleyici konumundan daha olumlu olduğu gözlemlenmektedir. Bunun sebebi orta ekseninde modların daha etkin olmasıdır.
- Optimum hacim boyutları kullanılmasına rağmen 31,5 Hz merkez frekanslı 1/3 oktav bandında mod sayısı yetersizdir (Çizelge 1) ve frekans tepkisi analizinde o frekans aralığında ses enerjisinde düşüşe sebep olmaktadır.

Tablo 1. 1/3 oktav bant mod dağılımı

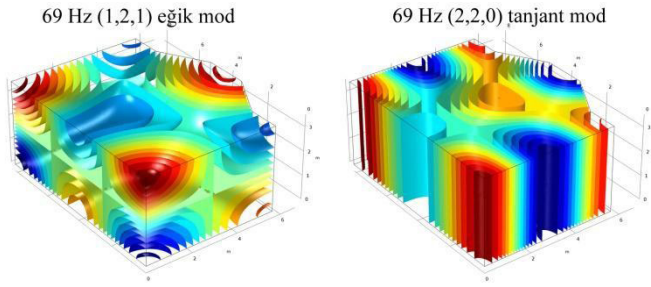
merkez frekans, Hz	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160
1/3 oktav banttaki mod sayısı	0	1	1	0	2	3	9	9	19	33	69

- 56 Hz ve 98 Hz eksenel modları arasında 20 Hz'den fazla mesafe olduğu görülmüştür. 49 Hz eksenel modunun harmoniklerinde bu sorun tekrarlanmakta ve renklenme oluşmaktadır. Tavan ve döşemenin paralel olması ve odanın en dar uzunluğunu oluşturması bu soruna sebep olurken, odanın ön bölgesinde paralelliğin bozulması ile mod biçimi amorfleşmiş ve enerjisi düşmüştür (Şekil 3).



Şekil 3. 49 Hz'de oluşan (0,0,1) eksenel mod ve katları

- 64,2 Hz'de iki tanjant mod çakışmıştır ancak bu 1/3 oktav bant aralığında 5'ten fazla mod bulunduğu için mod dağılım kriteri sağlanmaktadır. Frekans tepkisi incelendiğinde ses mühendisi konumunda önemli düşüş vardır. Bu düşüşün alıcı kaynak etkileşiminden olduğu düşünülmektedir. Kaynak ile ses mühendisi arasındaki mesafe, 63 Hz dalga boyunun yarısı olan 2.7 metreye eşittir ve faz çakışmasına bağlı olarak ses basıncını bu noktada düşürmüştür.
- 69,0 Hz ve 69,7 Hz modlarının birbirine çok yakın olması ve en yakın modlarla mesafesinin %5 kriterini sağlamaması öbikleşme (*'bunching'*) yaratmaktadır. Bununla ilişkili olarak ses enerjisinin bu bölgede hem ses mühendisi hem de dinleyici konumu için pik yaptığı görülmüştür (Şekil 4).



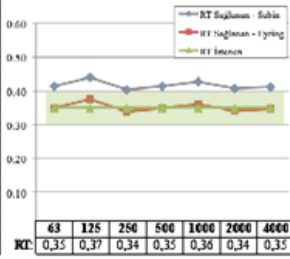
Şekil 4. 69 Hz'de oluşan (1,2,1) eğik modu ve (2,2,0) tanjant modu

3.4. Yüzey malzemeleri ve reverberasyon süresi kontrolü

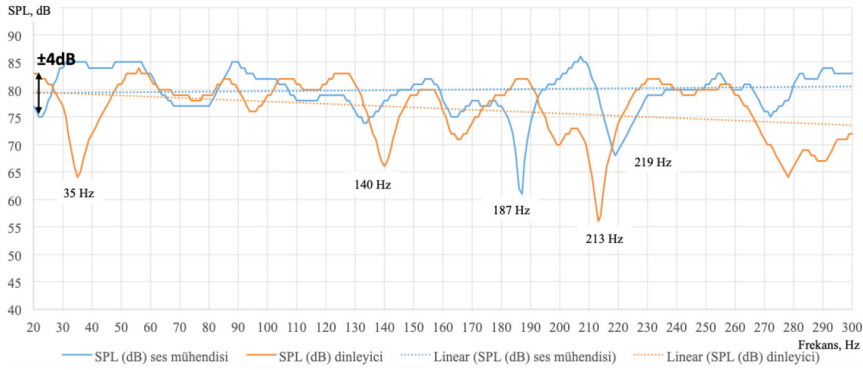
LEDE tasarım prensibine uygun olarak ses mühendisinin kafa hizasından itibaren kontrol odasının tüm arka bölgesinde rijit ve saçıcı yüzeyler, ön bölgede ise yutucular tanımlanmıştır. Mod sorunu görülen frekanslar için yutucuların etkin frekansı (f_0) tanımlanmış ve bunlar antinod bölgelerinde (köşe ve kenarlarda) konumlandırılmış. Saçıcılar Schroeder 1D QR saçıcı dizisi formüllerinden yararlanarak boyutlandırılmıştır, birisi $f_0 = 250$ ve $f_{max} = 1000$ Hz'e kadar, diğeri $f_0 = 500$ ve $f_{max} = 4000$ Hz'e kadar çalışmak üzere iki tip tasarlanmıştır. Saçıcının etkin olduğu en düşük frekans 125 Hz'dir. Saçıcının etkin bir şekilde çalışması için saçıcı ile alıcı arasında hedeflenen dalga boyunun 3 katından daha fazla mesafe olması kriteri kontrol edilmiştir. Oda iç kabuğu simetriktir. Malzemeler istenen reverberasyon süresini sağlamak üzere boyutlandırılmıştır. Çizelge 2'de odada kullanılan malzemelerin yutuculuk katsayıları ve Eyring yöntemi ile hesaplanan reverberasyon süresi değerleri verilmiştir. Sonuçlar 0,35 sn reverberasyon kriterini sağlamakta ve 1/3 oktav bantta homojen bir ortam sağlamaktadır. Çizelgenin grafik ifadesinde görüldüğü gibi Sabine denklemi, Eyring denkleminde daha yüksek sonuç vermekte ve yutucu ortamı temsilde yetersiz kalmaktadır.

Tablo 2. Reverberasyon süresi hesabı

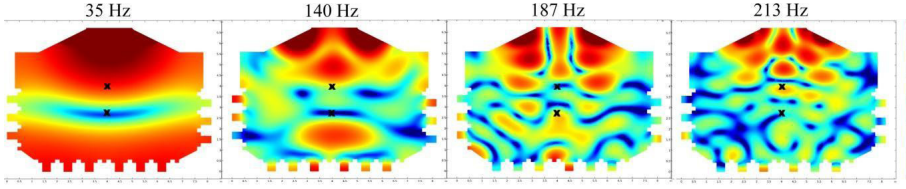
Malzemeler		63	125	250	500	1000	2000	4000	
Ön duvar	Yürücü bölge	5cm taşıyıcı, 40 kg/m ³	0,1	0,15	0,7	0,6	0,6	0,85	0,9
	Gözetli penceresi	Akustik cam	0,18	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Yan duvar	Yürücü bölge	Perfore panel (1,5cm, 1cm delik gapı, 4cm mesafe), 30cm yükseklik ve 5cm taşıyıcı ile	0,98	0,95	0,85	0,8	0,8	0,7	0,6
	Saçıca bölge	1D QRD panel (referans değer: RFG 734)	0,23	0,23	0,24	0,35	0,23	0,2	0,2
	Kapı	Akustik kapı	0,35	0,35	0,39	0,44	0,49	0,54	0,57
Arka duvar	Saçıca bölge	1D QRD panel (referans değer: RFG 734)	0,23	0,23	0,24	0,35	0,23	0,2	0,2
	Koyu bas yutucu	Bas tuzağı (referans değer: RFG bass trap)	0,99	0,54	0,36	0,21	0,26	0,32	0,46
	Kenar panel yut.	Ahşap panel, arkasında taşıyıcı ile	0,25	0,14	0,1	0,1	0,1	0,1	0,08
Tavan	Yürücü bölge	Perfore panel (1,5cm, 1cm delik gapı, 4cm mesafe), 30cm yükseklik ve 5cm taşıyıcı ile	0,98	0,95	0,85	0,8	0,8	0,7	0,6
	Yürücü bölge -2	Taşıyıcı asma tavan	0,45	0,49	0,53	0,53	0,75	0,92	0,99
	Yarıştıca bölge	Akustik asma tavan	0,2	0,2	0,15	0,1	0,08	0,04	0,02
Zemin	Epoksi		0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	
Mobilya	Masa		0,1	0,1	0,13	0,14	0,17	0,18	0,15
	Koltuk		0,4	0,4	0,5	0,58	0,61	0,58	0,68



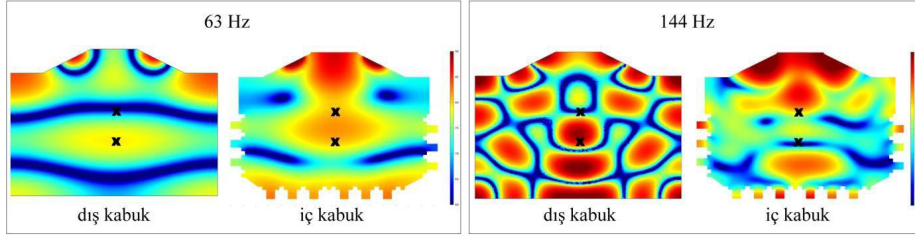
Yüzey malzemeleri uygulandıktan sonra alınan frekans tepki grafiği Şekil 5'te verilmiştir. Dış kabuğun analizinde görülen pik ve düşüşler, yutucu ve saçıcıların etkisiyle özellikle ses mühendisi konumunda yumuşamıştır. ITU ve EBU kriterine göre frekans bazında basınç değişimi ± 4 dB aralığında kalmalı ve düz frekans cevabı elde edilmelidir. Ses mühendisi konumunda bu kriter sağlanmakta ancak oda ortasında yer alan dinleyici konumunda sağlanamamaktadır. Oda ortası konumlarının mod oluşumu açısından dezavantajlı olduğu bilindiğinden bu sorun dinleyici konumunun değiştirilmesi ile çözülebilecektir.

**Şekil 5.** Yüzey kaplamaları ile frekans tepki analizi

Şekil 6 frekans tepki grafiğinde sorunlu olduğu tespit edilen frekanslar için 1.2m yükseklikteki plan düzleminde ses basınç dağılımını göstermektedir. Grafikte ses mühendisi ve dinleyici konumları çarpı ile işaretlenmiştir. Öte yandan dış kabuk analizinde ses mühendisi konumunda önemli düşüş gösteren 63 Hz ve 144 Hz frekanslarında iç kabuğun eklenmesi ile sorunun çözümlendiği görülmektedir (Şekil 7). Çalışma kapsamında kulaklar arası iltis (IACC) parametresi kontrol edilmemiştir, ancak iç kabuğun simetrik oluşu ile hacim içerisinde dengeli basınç dağılımı sağlanmış ve olası sorunlar önlenmiştir (Şekil 6,7).



Şekil 6. Sorunlu frekanslar için ses basınç dağılım grafiği



Şekil 7. 63 Hz ve 144 Hz için dış ve iç kabuk koşullarında ses basınç dağılımı karşılaştırması

4. SONUÇ

Bu çalışmada kayıt odası tasarım prensipleri özetlenmiş ve örnek bir oda üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir. Prensiplere uygun olarak tasarlanan kontrol odası dalga teorisine dayalı COMSOL yazılımı ile modellenmiş ve oluşan modlara bağlı olarak frekans tepkisindeki sorunlar yorumlanmıştır. LEDE prensibi uygulanarak tasarlanan iç kabuğun eklenmesi ile hacim akustikindeki iyileşme gösterilmiştir. Oda dış kabuğu biçimi incelendiğinde ön bölgede paralelliğin kırılması olumlu sonuç verirken, diğer düzlemlerdeki paralel yüzeylerin kuvvetli eksenel modlar oluşturduğu görülmüştür. Özellikle odanın en kısa boyutlarını oluşturan tavan – döşeme paralelliğinin bozulması bu anlamda faydalıdır. Oda ortasındaki dinleyici konumunda modların etkisi oldukça belirgindir ve dinleyicinin konumunu değiştirerek bu sorunun önüne geçmek mümkündür. Çalışmada uygun olduğu belirtilen hacim boyutları kullanılmasına karşın gözlemlenen bu sorunlara dayanarak hem hacim boyutlarının belirlenmesinde hem de dinleyici ve hoparlör konumlarının belirlenmesinde optimizasyon yöntemlerinden yararlanılmasının önemli olduğu söylenebilir. Ayrıca modların etkin olduğu frekans aralığının Schroeder teorisinin önerdiği kritik frekanstan daha yüksek olduğu görülmüştür.

Yüzelelere uygulanan yutucu ve saçıcılar frekans tepkisindeki pik ve düşüşleri yumuşatmıştır. Küçük odalarda önemi tartışmalı bir parametre olsa da

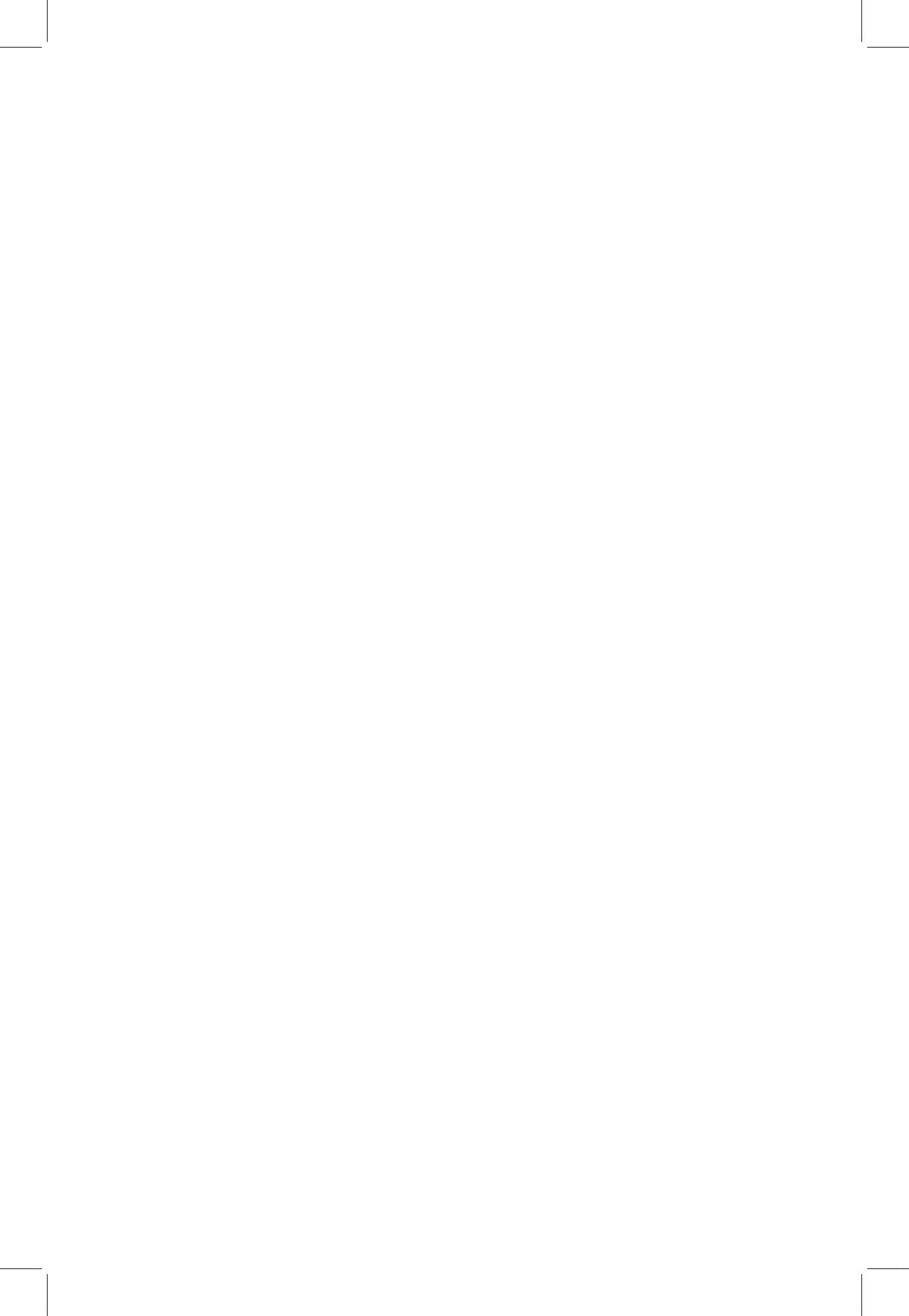
reverberasyon süresi kontrolü yapılmış ve 0,35 sn kriteri sağlanmıştır. Çalışma kapsamı mod analizi ve frekans tanım alanında analizler ile sınırlı tutulmuştur. Ancak zaman tanım alanında analizler de kayıt stüdyosu tasarımında büyük önem taşır. Pek çok kontrol odası tasarım yaklaşımının dayandığı önemli bir parametre ilk yansıma gecikme süresidir. Değerlerin kontrolü yapılarak kontrol odası ITDG'sinin kayıt odasınınkinden daha uzun olması şartı sağlanmalıdır. Modun algılanabilirliğini ifade eden Q-faktör ve modal düşüş gibi subjektif algı ile ilişkilendirilen diğer parametreler de ayrıca hesaplanmalıdır.

5. KAYNAKLAR

- [1] Winer, E., *A New Approach to Small Room Acoustics*, in *Electronic Musician*. 2004.
- [2] Voetmann, J., *50 Years of Sound Control Room Design*, in *Forum Acusticum*. 2005: Budapest.
- [3] Munster, B.J.P.M.v., *Beyond Control: Acoustics Of Sound Recording Control Rooms - Past, Present And Future*. 2003.
- [4] 3382-1, B.E.I., *Acoustics- Measurement of room acoustic parameters*, in *Part 1: Performance spaces*. 2009.
- [5] Davis, D. and C. Davis, *The LEDE- Concept for the Control of Acoustic and Psychoacoustic Parameters in Recording Control Rooms*. Journal of Audio Engineering Society, 1980. 28(9).
- [6] Laukkanen, P., *Evaluation of Studio Control Room Acoustics with Spatial Impulse Responses and Auralization*, in *Electrical Engineering*. 2014, Aalto University: Finland.
- [7] BS.1116-1, I.-R., *Methods For The Subjective Assessment Of Small Impairments In Audio Systems Including Multichannel Sound Systems*. 1997: Geneva.
- [8] BS.775-1, I.-R., *Recommendation ITU-R BS.775-1 Multichannel Stereophonic Sound System With And Without Accompanying Picture*. 1994.
- [9] 3276, E.T., *EBU Tech. 3276 – 2nd edition Listening Conditions For The Assessment Of Sound Programme Material: Monophonic And Two-Channel Stereophonic*. 1998: Geneva.
- [10] 3286, E.T., *EBU Tech 3286 Assessment Methods for the Quality of Sound Material - Multichannel*. 2000.
- [11] Walker, R., *Controlled Image Design: The Management Of Stereophonic Image Quality*. 1995, British Broadcasting Corporation Research & Development Department, Technical Resources Division.
- [12] D'Antonio, P. and T. Cox, *Determining Optimum Room Dimensions for Critical Listening Environments: A New Methodology in Convention; 112th, Audio Engineering Society*. 2002, Audio Engineering Society Munich, Germany p. 5498-5635.
- [13] Schroeder, M.R. and K.H. Kuttruff, *On Frequency Response Curves In Rooms. Comparison Of Experimental, Theoretical, And Monte Carlo Results For The Average Frequency Spacing Between Maxima*. Journal of Acoustical Society of America, 1962. 34(1): p. 76-80.
- [14] Bonello, O.J., *New Criterion For The Distribution Of Normal Room Modes*. Journal of the Audio Engineering Society, 1981. 29(9): p. 597-605.
- [15] Gilford, C.L.S., *The Acoustic Design of Talks Studios and Listening Rooms*. Journal of the Audio Engineering Society, 1979. 27(1): p. 17-31.



- [16] Fazenda, B. and M. Wankling, *Optimal Modal Spacing And Density For Critical Listening*, in *Audio Engineering Society*. 2008: San Francisco, CA, USA.
- [17] Wankling, M.F., Bruno; Davies, William J., *The Assessment of Low-Frequency Room Acoustic Parameters Using Descriptive Analysis*. *Journal of Audio Engineering Society*, 2012. 60(5).
- [18] Newell, P., *Recording Studio Design*, ed. S. edition. 2008, Oxford, UK: Focal Press.
- [19] D'Arcy, R. and H. Flynn, *RA: The Book Vol 1: The Recording Architecture Book of Studio Design*. 2011, London: Black Box Limited.
- [20] Everest, F.A. and K.C. Pohlmann, *Master Handbook of Acoustics*. 2009: The McGraw-Hill Companies.
- [21] Neubauer, R. and B. Kostek, *Prediction of the Reverberation Time in Rectangular Rooms with Non-Uniformly Distributed Sound Absorption*. *Archives of Acoustics*, 2001. 26(3).
- [22] Yousefzadeh, B. and M. Hodgson, *Energy- And Wave-Based Beam-Tracing Prediction Of Room-Acoustical Parameters Using Different Boundary Conditions*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012. 132(3): p. 1450-1461.
- [23] Suh, J.S. and P.A. Nelson, *Measurement Of Transient Response Of Rooms And Comparison With Geometrical Acoustic Models*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1999. 105(4): p. 2304-2317.
- [24] Hong-wei, W. and H. Kun-peng, *Simulation of Room Impulse Response by using Hybrid Method of Wave and Geometrical Acoustics*. *Journal Of Temporal Design In Architecture And The Environment*, 2009. 9(1): p. 9-13.
- [25] Pelzer, S., M. Aretz, and M. Vorländer, *Quality Assessment Of Room Acoustic Simulation Tools By Comparing Binaural Measurements And Simulations In An Optimized Test Scenario*, in *Forum Acusticum*. 2011: Aalborg, Denmark.
- [26] COMSOL, M., *Comsol Multiphysics User Guide*. 2018.
- [27] Okuzono, T., et al., *Fundamental Accuracy Of Time Domain Finite Element Method For Sound-Field Analysis Of Rooms*. *Applied Acoustics*, 2010. *Applied Acoustics*(71): p. 940–946.
- [28] Kuttruff, H., *Room Acoustics*. 5th ed. 2009: Spon Press.



YENİ NESİL AÇIK KAYNAKLI SONLU ELEMANLAR YAZILIMI KULLANIMIYLA ÜÇ BOYUTLU HACİMLERİN AKUSTİK MODAL ANALİZİ

Mete Ögüç¹

Metzen Akustik, Sultangazi, İstanbul, Türkiye

e-posta: info@metzenakustik.com

Ali Fethi Okyar²

Yeditepe Üniversitesi, Ataşehir, İstanbul, Türkiye

e-posta: okyar@yeditepe.edu.tr

Aleyna Güney³

Yeditepe Üniversitesi, Ataşehir, İstanbul, Türkiye

e-posta: aleyna.guney@std.yeditepe.edu.tr

ÖZET

Kapalı bir hacmin akustik yapısı belirli bir frekans aralığındaki duran dalga karakteristiği ve bunlara bağlı normal modlar incelenerek değerlendirilebilmektedir. Dikdörtgen prizma ve silindir gibi basit şekilli boşluklar için yapılan hesaplarda analitik çözümler kullanılabilir. Fakat karmaşık geometriler için bilgisayar destekli hesaplama yöntemlerini kullanmak gerekmektedir. Bu tip hesapları yapabilen yazılımların lisansları oldukça pahalı olduğu için çoğu kimse ve kurum bu imkana sahip olamamaktadır. Yeni nesil Python tabanlı açık kaynaklı kısmi diferansiyel denklem çözücü ile bu problem çözülmüş, analitik çözümleriyle de kıyaslanarak elde edilen sonuçlar yapılan hata analizi ile değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: genelleştirilmiş özdeğer problemi, modal analiz, açık kaynak

**ACOUSTIC MODAL ANALYSIS OF THREE-DIMENSIONAL
VOLUMES USING A NEW GENERATION OPEN-SOURCE FINITE
ELEMENT SOFTWARE**

ABSTRACT

It is possible to evaluate the acoustic behavior of an enclosed space by examining the standing waves in a certain frequency range and their associated normal modes. Analytical solutions can be used in calculations made for simple-shaped cavities such as rectangular prisms and cylinders. However, it is necessary to use numerical calculation methods for complex geometries. Since the licenses of software that can make such calculations are quite expensive, most people and institutions cannot have this opportunity at all. This problem has been solved with a Python based new generation open-source partial differential equation solver, and the results have been comparatively evaluated with their analytical solutions by error analysis.

Keywords: *generalized eigenvalue problem, modal analysis, open-source*

1. GİRİŞ

Endüstriyel ve akademik çalışmalarda akustik analizler için çoğunlukla ticari yazılımlar tercih edilmektedir. Ancak ticari yazılımlarla yapılan analizlerde çözüm süreci net olarak gözlemlenmemektedir. Ticari yazılımların kaynak kodlarına erişim çoğunlukla kısıtlı olduğu için kullanıcılar ve akademik camia arka planda yapılan hesaplarla ilgili verilere ulaşamaz. Bu durum, çözüm sürecinde oluşabilecek olası hataların bulunması önünde de bir engeldir. Ticari yazılımların oldukça pahalı lisans ücretleri ise oldukça az sayıda kullanıcı kitlesine sahip olmalarına sebep olmaktadır.

Açık kaynaklar günümüzde bilimsel çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Açık kaynakların tercih edilmesi için en önemli etken, yapılan bir çalışmanın bağımsız araştırmacılar tarafından tekrarlanabilmesidir. Açık bilim ve açık kaynak bir bütün olarak kabul edilir. Bilimsel topluluklar genellikle az sayıda araştırmacıdan oluşsa da açık kaynak hem üretilen fikirlerin muhafazasını hem de yaygınlaşmasını sağlamaktadır [1].

Özellikle akustik problemlerin modellenmesinde diferansiyel denklemlerin çeşitli yöntemlerle çözülmesine ihtiyaç duyulmaktadır. FEniCS, kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü için kullanılan açık kaynaklı bir yazılımdır. Kullanıcılara bilimsel modelleri Python ve C++ dillerinde hızlı bir şekilde verimli sonlu eleman koduna çevirebilme imkânı tanır.

Bu çalışmada yapılan analizler için FEniCS tercih edilmiştir. FEniCS'in analiz sürecinde zayıf form, basınç gradyanı ve geometri üzerindeki düğüm noktaları koordinatları gibi parametreler net bir şekilde gözlemlenebilmekte ve müdahale edilebilmektedir [2].

2. AKUSTİK MODAL ANALİZ

Akustik mod, sınırlı bir akışkan hacmin içerisinde ilerleyen ve bu hacmin duvarlarına çarpan dalgaların kendi üzerlerine geri yansıtılarak duran bir dalga oluşturması olarak açıklanır. Hacimlerin alt frekanslardaki akustik performansı mod dağılımı incelenerek tahmin edilebilmektedir [3]. Üç boyutlu dikdörtgen prizma bir hava hacmi için duran dalgalar

$$f_{lmn} = \frac{c}{2\pi} \left[\left(\frac{l\pi}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{m\pi}{L_y} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L_z} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

doğal frekans f , hacmin boyutları L_x , L_y ve L_z ve ses hızı c için hesaplanabilir. Karmaşık geometrilerin modal analizi için ise sayısal yöntemlere başvurulması gerekmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi bu alanda uzun yıllardır başa-

ıyla uygulanmaktadır. Basit geometrilerin akustik analizleri için varyasyonel fonksiyonellerin kullanılması ile akustik model analiz için sonlu elemanlar yöntemleri 1960'lı yılların sonlarından itibaren geliştirilmeye başlanmıştır [4,5]. Akustik basınç için homojen Helmholtz denklemi

$$\nabla^2 P(\mathbf{x}, \omega) + (\omega^2/c^2)P(\mathbf{x}, \omega) = 0, \quad \mathbf{x}: (x, y, z) \in V, \quad (2)$$

açılmalık frekans ω , ses hızı c ve sınırlı bir V hacmi içerisinde herhangi bir konum (x, y, z) için kararlı hal ses basıncı P olacak biçimde yazılır. Bu denklemin zayıf formu bir ağırlıklandırma fonksiyonu $v(\mathbf{x}, \omega)$ ile çarpılarak elde edilebilir:

$$-\int_V \nabla v(\mathbf{x}, \omega) \cdot \nabla P(\mathbf{x}, \omega) dV + \omega^2 \int_V (1/c^2)v(\mathbf{x}, \omega)P(\mathbf{x}, \omega) dV. \quad (3)$$

Sonlu elemanlar çözümü için sürekli akışkan ortam n_f sayıda düğüm noktası ile ayrıklaştırılır. Basınç P , her bir düğüm noktasında yaklaşık basınç p olarak aşağıdaki gibi tanımlanır,

$$P(\mathbf{x}, \omega) \approx p(\mathbf{x}, \omega) = \sum_{i=1}^{n_f} N_i(\mathbf{x}) \cdot p_i(\mathbf{x}, \omega) = [N]\{p_i\}. \quad \mathbf{x}: (x, y, z) \in \Omega. \quad (4)$$

Global şekil fonksiyonları Denklem 4 içerisinde $(1 \times n_f)$ boyutlarındaki $[N]$ vektörü olarak yer almaktadır. Yaklaşık basınç gradyanı, ∇p , ise

$$\nabla P \approx \nabla p = [\partial][N]\{p_i\} = [B]\{p_i\}, \quad (5)$$

gradyan operatörleri (3×1) boyutlarındaki $[\partial]$ vektörü, global şekil fonksiyonları gradyan bileşenleri ise $(3 \times n_f)$ boyutlarındaki $[B]$ matrisi olacaktır. Ağırlıklandırma fonksiyonu $v(\mathbf{x}, \omega)$ ve gradyan vektörü $\nabla v(\mathbf{x}, \omega)$ de Galerkin ağırlıklı kalıntı yöntemiyle basınç ve basınç gradyanı için yukarıda yapıldığı gibi açılabilir. Bu açılımlar zayıf form (Denklem 3) içine integral terimleri olarak girerek akustik sertlik ve akustik kütle matrislerini oluşturmamızı sağlarlar. İlk önce,

$$-\int_V \nabla v(\mathbf{x}, \omega) \cdot \nabla P(\mathbf{x}, \omega) dV = -\int_V ([B]\{v_i\})^T [B]\{p_i\} \cdot dV = -\{v_i\}^T \cdot [K]\{p_i\}, \quad (6)$$

ile $[K]$ olarak tanımlanan $(n_f \times n_f)$ akustik sertlik matrisi elde edilir. İkinci olarak ise, aynı yöntem ile akustik kütle matrisi $[M]$ elde edilir:

$$\omega^2 \int_V (1/c^2)v(\mathbf{x}, \omega)P(\mathbf{x}, \omega) dV = \omega^2 \{v_i\}^T \cdot [M]\{p_i\}. \quad (7)$$

Hacim içi akustik mod şekilleri, sönümlenmeyen ve kaynaksız bir sistem için,

$$\omega^2 \{v_i\}^T \cdot [M] \{p_i\} - \{v_i\}^T \cdot [K] \{p_i\} = \{v_i\}^T \cdot (\omega^2 [M] - [K]) \{p_i\} = 0, \quad (8)$$

ile hesaplanabilir. Bu sistem için sonlu elemanlar modeli $\omega = 2\pi f$ için

$$\omega^2 \mathbf{M} - \mathbf{K} = 0, \quad (9)$$

olacaktır. Denklem 9 için Betik 1’de gösterildiği gibi FEniCS’te kurgulanacak bir özdeğer analizi ile çözüm ağı oluşturulan herhangi bir geometri için mod şekillerini ve karşılık gelen doğal frekansları hesaplamak mümkündür.

Betik 1. Zayıf form denklemi FEniCS kodu ekran görüntüsü.

```
M_form = inner(1/(c_air**2)*u, v)*dx
K_form = -inner(grad(u), grad(v))*dx

K, M = PETScMatrix(), PETScMatrix()
assemble(K_form, tensor = K)
assemble(M_form, tensor = M)
```

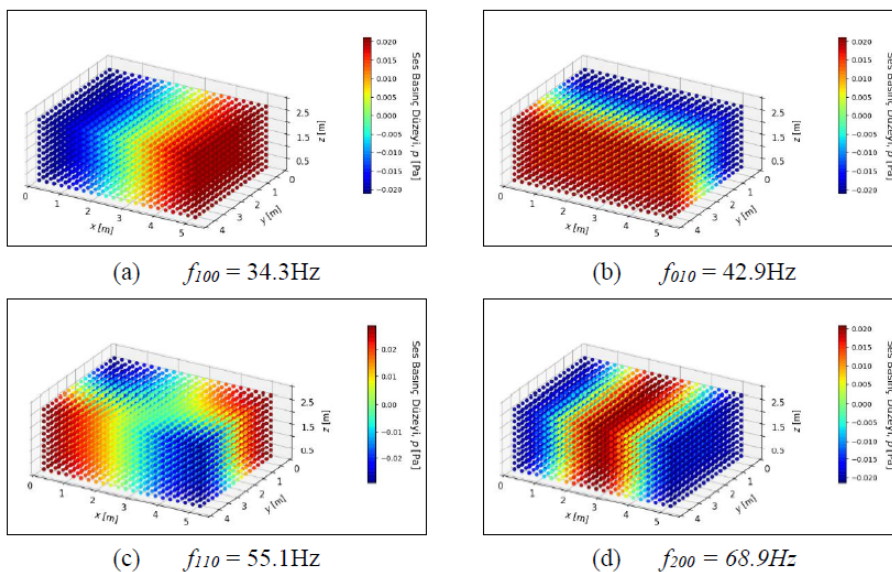
3. SAYISAL SONUÇLAR

Dikdörtgen prizma biçiminde ve boyutları $L_x = 5\text{m}$, $L_y = 4\text{m}$, $L_z = 2.5\text{m}$ olan bir hava hacmi için akustik modlar Denklem 1’de verilen analitik çözümün Python diliyle kodlanmasıyla elde edilmiştir. FEniCS’te çözüm ağı oluşturulan ve sonlu elemanlar yöntemi ile geliştirilmiş özdeğer analizi yapılan aynı boyutlardaki hacim için elde edilen sonuçlar analitik çözümle kıyaslanarak model doğrulanmıştır. Sonuçlar Tablo 1’de gösterilmektedir.

Tablo 1. Dikdörtgen prizma bir hava hacmi için çözüm sonuçları.

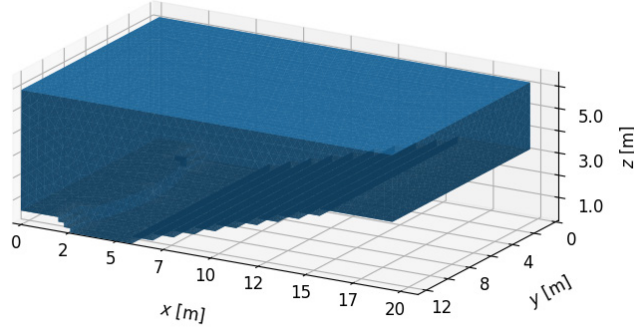
Mod	l	m	n	Analitik Çözüm	Sonlu Elemanlar
1	1	0	0	34.3 Hz	34.3 Hz
2	0	1	0	42.9 Hz	42.9 Hz
3	1	1	0	54.9 Hz	55.1 Hz
4	0	0	1	68.6 Hz	68.9 Hz
5	2	0	0	68.6 Hz	68.9 Hz
6	1	0	1	76.7 Hz	77.2 Hz
7	0	1	1	80.9 Hz	81.5 Hz
8	2	1	0	80.9 Hz	81.5 Hz
9	0	2	0	85.8 Hz	86.2 Hz
10	1	1	1	87.9 Hz	88.7 Hz

FEniCS ile hesaplanan mod şekillerine bazı örnekler Şekil 1’de gösterilmektedir.



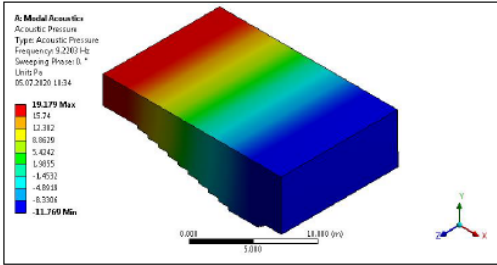
Şekil 1. Dikdörtgen prizma hava hacmi için akustik modal analiz FEniCS çözümü.

Düzensiz şekle sahip bir geometri örneğini değerlendirmek için ise bir konferans salonu modeli akustik modal analizi yapılmıştır. Mimari modeli .STEP uzantılı bir dosya olarak hazırlanmış olan bu hacim için açık kaynak kodlu bir yazılım olan GMSH v.4.6.0 ile 90201 adet üçgen piramit sonlu elemandan ve 20261 noktadan oluşan bir çözüm ağı üretilmiştir (Şekil 2).

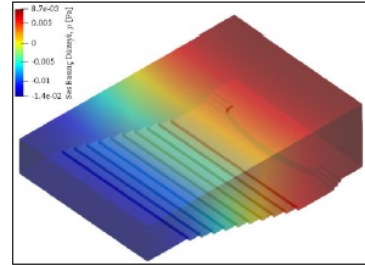


Şekil 2. Konferans salonu örneği için GMSH’te oluşturulan çözüm ağı.

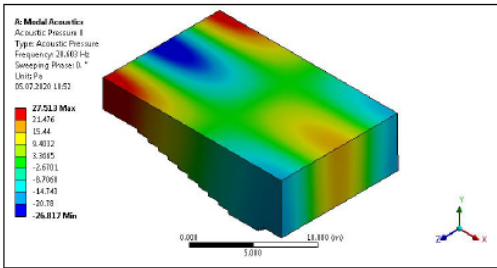
Aynı problem FENiCS ve ANSYS ile çözdürülmüştür. Her iki yazılımla yapılan sonlu elemanlar çözümü ile elde edilen mod şekilleri ve hesaplanan doğal frekanslar Şekil 3’te gösterildiği üzere birbirlerine oldukça yakındır. FENiCS hesap sonuçları bir diğer açık kaynaklı yazılım olan ParaView 5.6.2’ye aktarılarak görselleştirilmiştir.



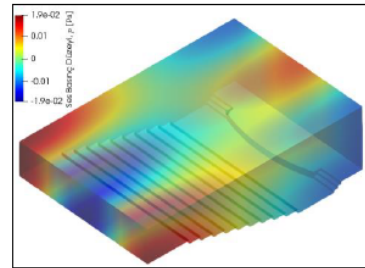
(a) ANSYS, $f_{100} = 9.2\text{Hz}$.



(b) FENiCS, $f_{100} = 9.1\text{Hz}$.



(c) ANSYS, $f_{111} = 28.6\text{Hz}$



(d) FENiCS, $f_{111} = 28.4\text{Hz}$

Şekil 3. Konferans salonu örneği için ANSYS ve FENiCS’te yapılan sonlu elemanlar yöntemi akustik modal analiz ile mod şekilleri ve doğal frekansları hesaplanmıştır.

4. SONUÇ

Bir dikdörtgen prizma hava hacmi için FEniCS'te yapılan akustik modal analiz analitik çözüm ile kıyaslanarak doğrulanmıştır. Düzensiz şekle sahip bir geometri için ise sonlu elemanlar yöntemi akustik modal analiz çözümleri bir konferans salonu için FEniCS'te ve ANSYS'te çözdürülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. FEniCS'te doğru kurgulanan bir model ile güvenilir sonuçlar elde edilebileceği gösterilmiştir.

Ticari yazılımlar ile kıyaslandığında, FEniCS'te oluşturulan bir modelin çözüm süreci gözlemlenebilmektedir. Üstelik yazılım dili ticari yazılımlara kıyasla çok daha karmaşık problemlerin modellerini kurgulamaya imkan tanımaktadır. Sönümlenme ve kaynak terimi probleme dahil edilerek bu model ile birçok akustik probleme çözümler sunulabilir. Genel olarak akustik modelleme için FEniCS ve açık kaynak kodlu yazılımlar ile başarılı sonuçlar elde edilebileceğini ayrıca gösterdiğimizi umuyoruz.

5. KAYNAKLAR

- [1] Adler, S., Open Source/Open Science 1999, Linux Journal, 70es, 10-es, 2000.
- [2] Logg, Anders, Kent-Andre Mardal, and Garth Wells, (Eds.), Automated solution of differential equations by the finite element method: The FEniCS book, Vol. 84, Springer Science & Business Media, 2012.
- [3] Ballou, Glen. Handbook for sound engineers. Taylor & Francis, 2013.
- [4] Craggs, A., The Use of Simple Three-Dimensional Acoustic Finite Elements for Determining the Natural Modes and Frequencies of Complex Shaped Enclosures, Journal of Sound and Vibration, Vol. 23, No. 3, pp.331-339, 1972.
- [5] Gladwell, G.M.L., Zimmermann, G., On Energy and Complementary Energy Formulations of Acoustic and Structural Vibration Problems, Journal of Sound and Vibration, Vol. 3, No. 3, pp.233-241, 1966.

KÜÇÜK HACİMLERDE MODLARIN ODA GEOMETRİSİ VE ODA ORANLARI İLE İLİŞKİSİNİN İNCELENMESİ

İlkay Sefer¹

İstanbul Teknik Üniversitesi, Taksim, İstanbul, Türkiye
e-posta: sefer17@itu.edu.tr

Sevta Yılmaz Demirkale²

İstanbul Teknik Üniversitesi, Taksim, İstanbul, Türkiye
e-posta: demirkale@itu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, oda modlarının, hacmin şekil ve boyut özellikleri ile ilişkisi ve oda oranlarının modlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmanın amacı, tasarım sürecinin malzeme kararlarının verilmediği ilk aşamasında, şekil ve boyut özelliklerinin akustik kaliteye etkisini incelemektir. Çalışmanın birinci aşamasında, birbirinin tam sayı katlarına sahip oranlı hacimlerin modal davranışlarının ve ses yayılımının akustik kusurlar içerdiğini gösterir. En kötü sonucu 1:1:1 oranlı hacim; en iyi sonucu 1:0.57:1.28 oranlı hacim verir. İkinci aşamada küp hacmin köşe ve yüzeylerine uygulanan değişiklikler sonucunda modal karakteristiğinin nasıl etkilendiği incelenmiştir. Hacmin köşe ve yüzeylerine; köşelere dış bükey elemanlar yerleştirilmesi, düşey lata sistemi ve yüzey paralelliğinin bozulması uygulanmıştır. En etkin ve olumlu akustik durum, hacimde yüzey paralelliklerinin bozulduğu örnekte görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Mod, Küçük Oda, Oda Geometrisi, Oda Oranı

INVESTIGATION OF MODES VIA RELATIONS ROOM GEOMETRY AND ROOM RATIO IN SMALL ROOMS

ABSTRACT

The aim of the study is to investigate the effect of shape and size properties on acoustic quality in the first stage of the design process, where material decisions are not made. The first stage study on a seven-element matrix shows that the modal characteristics and diffusion of sound is not good in the room, which is the integer multiplication between the dimensions. The 1:1:1 cube room has been the worst result in terms of mode. The 1:0.57:1.28 room has been the best result in terms of mode. The modal characteristic of the cube room how was affected by the shape interventions on the corners and surfaces of the room has been investigated as the second stage of the study. To the room; placement of convex quarter cylinders, applying the vertical slats, and the splaying of the room surface for break parallelism were applied. The most effective acoustic solution can be seen in the example where splaying surfaces and break parallelism.

Keywords: Modes, Small Room, Room Geometry, Room Ratio

1. GİRİŞ

20.yy'ın ikinci yarısında matematiksel oranların tasarıma uygulanması mimaride önemli bir konu haline geldi. Leon Battista Alberti, güzelliği temel geometriler ve sayısal ilişkiler olarak ifade eder. Alberti belirli oda oranlarını mimari olarak güzel kabul eder. Bu oranlar: 1:1, 1:2, 1:3, 2:3, 4:9, 3:8, 3:4, 9:16, 1:4 [1]. Dikdörtgen odalarda düzgün frekans tepkisi elde etmek için, en uygun modal yanıtı veren boyut oranları üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bolt, Rettinger ve çok sayıda yazar, küçük oda boyutları hakkında önerilerde bulunmuştur [2]. Bolt, dikdörtgen odalarda düzgün frekans tepkisi elde etmek için, odanın düşük frekanslı ses dağılımını boyut oranlarına göre sınıflandırma girişimlerinde bulunmuştur. En uygun modal yanıtı veren 1:1.25:1.6 oda oranını belirler [3]. Błaszak, Schroeder frekansına kadar olan bir frekans aralığını inceler ve 1:1.2:1.4 oranını en iyi oran olarak ifade eder [4]. Sepmeyer, modal tepkinin düzensizliğini en aza indirmek için, 1:1.14:1.39, 1:1.28:1.54 ve 1:1.6:2.33 oda oranlarını belirler [5]. Louden, yüksek frekanslarda mod mesafesinin az olmasını düzenli bir durum olduğunu kabul eder ve 1:1.4:1.9 oranını belirler [6]. Milner ve Bernhard 1:1.186:1.439 oranını belirler [7]. Volkman 2:3:5 oda oranını belirler [8]. Bolt, en iyi oranlardan biri olarak kabul edilen geometrik oranı 1:1.5:2.5 belirler [9, 10, 11, 12]. Meissner, küçük ve orta hacimli odalar için 1:1.48:2.12, 1:1.4:1.89 ve 1:1.2:1.45 oranlarını büyük hacimler için 1:1.2:1.44 oranını belirler [13]. Sarris, çalışılmış mevcut oranların ortalama ses basınç varyanslarını inceleyen bir yöntem kullanarak 1:2.19:3 oranını belirler [14].

2. ODA ORANLARININ İNCELENMESİ

Çalışma kapsamında, bir odayı oluşturan 6 adet yüzeyin (tavan ve döşeme xy düzlemi, en duvarları xz düzlemi, boy duvarlar yz düzlemi) geometrisinin, oda modlarına etkisi incelenmiştir. Modal analizi yapılan hacimlerin dış ortamdan tamamen yalıtıldığı varsayıldı. Küçük odalar sesin dalga boyu ile hacmin boyutlarının kıyaslanabilir olduğu ve modların etkin olduğu bir hacim türüdür. Odanın müzik pratiği ve eğitimi amacıyla kullanılacağı kabulü ile düşük frekans seslerin önemi artmaktadır. Müzik sesi (<100 Hz.) ve konuşma sesi üzerinde etkili olmakla birlikte müzik sesi temelinde şekillenen, belirli oranlardaki hacimler bilgisayar benzetimi aracılığıyla değerlendirildi. Küçük hacimlerin akustik incelemesinde dalga akustiği teorisi uygulanmalıdır. Bu bağlamda çalışmada dalga akustiği teorisini destekleyen ve hesaplama yöntemi olarak bu teoriyi kullanan COMSOL Multiphysic yazılımı kullanıldı. Çalışma için modellenen geometriler COMSOL Multiphysic yazılımına aktarılıp hesaplama için gerekli düzeyde modellendiği ve hesaplama uygunluğu

yazılımın gerekleri (yüzeylerin Mesh olarak, işlenmesi, ses yayılımını sağlama-sı ve hesaplama için hacmin içerisinde ortam malzemesi olarak hava atanması, frekans aralığının ve mod frekansı sayısının belirlenmesi) doğrultusunda kontrol edildi ve gerekli bilgiler girildi. Benzetim sonucunda elde edilen frekans ve basınç değeri verileri kullanılarak oda frekans tepki eğrisi grafiği oluşturuldu ve hacmin incelemesi yapıldı. Çalışmanın birinci aşamasından elde edilen sonuçlar ile ikinci aşamada; birim hacmin belirlenip bu hacmin yüzey ve köşe geometrisi değiştirilerek modlar üzerinden akustik incelemesi yapıldı. Yüzey ve köşe değişimlerinin hacmin modal karakteristiğine etkisi incelendi. Hacimlerin belirlenmesinde literatürdeki mimari ve akustik oran türleri kullanıldı. Çalışmanın birinci aşamasında 3 adet mimari/görsel oranlı, 3 adet akustik oranlı ve birim küp olmak üzere 7 farklı oran üzerinde çalışıldı. Bu oranlar mimaride genel olarak kullanılan ve/veya akustik çalışmalar sonucu elde edilen oda oranlarıdır. **Tablo 1** oda oranlarını gösterir. Hacim ve çınlama süresi parametreleri sabit tutulup oda oranları ve şekil değişimlerinin etkisi incelendi.

Tablo 1. Yükseklik boyutuna göre eşitlenmiş oda oranları ve eşit hacim altında oda boyutları.

Uzunluk	Genişlik	Yükseklik	Oran Türü	Uzunluk (m)	Genişlik (m)	Yükseklik (m)	Hacim (m ³)
L	W	H		L	W	H	V
3	2	1	Harmonik	12.6440	8.10960	4.05480	400
1.6	1.26	1	Altın Oran	9.33204	7.34898	5.83252	400
1.6	0.6	1	European	11.95041	4.48140	7.46901	400
1.5	0.75	1	Alberti	10.62659	5.31329	7.08439	400
1	1	1	Birim Küp	7.36806	7.36806	7.36806	400
0.6	0.4	1	Alberti	7.11379	4.74252	11.85631	400
1.285714	0.571429	1	Alberti	10.49863	4.66606	8.16560	400

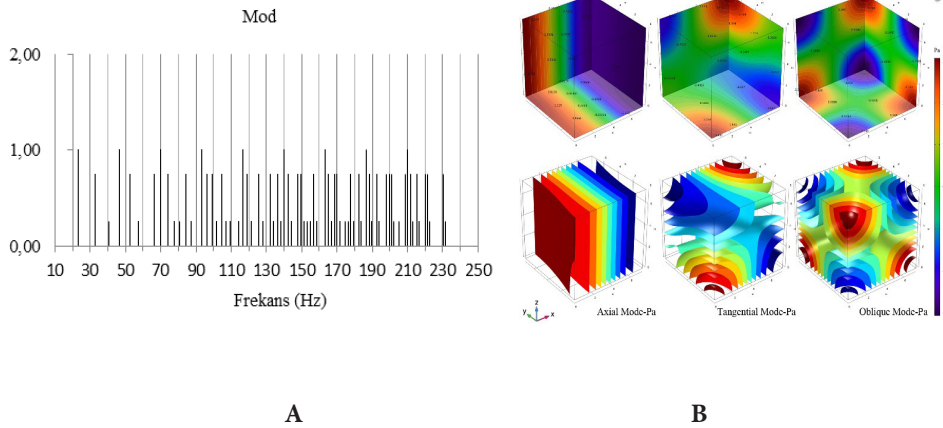
2. HESAPLAMA KABULLERİ VE DEĞERLENDİRME

Odalar, küçük hacim akustiği kriterlerine ve modal bölge karakteristiğine uygun olarak incelendi. Bu doğrultuda odaların kritik frekansı, $f_c=100$ Hz. çınlama süresi literatür araştırmasına göre, $RT=1$ s. kabul edildi ve hacim, $V=400$ m³ olarak belirlendi. Yazılımın Pressure Acoustics, Frequency Domain (acpr) fizik hesaplama birimi kullanılarak mod frekansları ve basınç değerleri elde edildi. Frekans ve basınç seviyesi değerleri birleştirilerek oda frekans tepki eğrisi grafikleri oluşturuldu. Müzik üzerindeki etkileri göstermek için, 16 Hz. ile 100 Hz. bölgesinde modlara karşılık gelen frekanslar hesaplandı. Mod gösterimleri, ilgili mod frekansı için mutlak ses basıncı (Pa) değerleridir. Modelde duvarların, zeminin ve tavanın tüm sınırlarının mükemmel bir şekilde rijit

olduğu varsayılır. Hacim içerisindeki basınç dağılımını 0 Pa ile 1 Pa aralığındaki bir skalada ifade edilir. 0 Pa hacim içerisindeki basınç minimumunu (0 basınç noktasını) gösterir. Mod dalgalarının birbirini güçlendirmesi sonucunda 1 Pa değerinden büyük basınç değerleri de görülür. Negatif basınç değerleri basıncın pozitif basınç değerine göre ters yönde oluştuğunu ifade eder. Negatiflik durumu basınç konumunun doğrultusunu ifade eder. Mod çizelgelerinde renklenme durumu + ve - olarak gösterilir. + renklenme olduğunu ifade eder. Modlara ait görseller, frekans ve basınç değerleri benzetim sonucunda elde edildi. Frekans tepki eğrisi üzerindeki değerler frekans eksenine ait değeri ifade eder. Frekans tepki eğrisi grafikleri her hacim için 1 Pa değerinin dB cinsi karşılığında başlar. Sesin hacim içerisindeki hızı 343 m/s olarak, yoğunluğu 1.2 kg/m^3 olarak belirlenmiştir.

2.1. Kübün değerlendirilmesi

Şekil 2A hacmin aksiyel, teğet ve oblik modlarına ait modal yoğunluğunu ve dağılımını gösterir. Yansımalarından kaynaklı enerji düşüşleri dikkate alınarak, modlar düşey eksende farklı görece mod şiddetleri ile ifade edilirler.



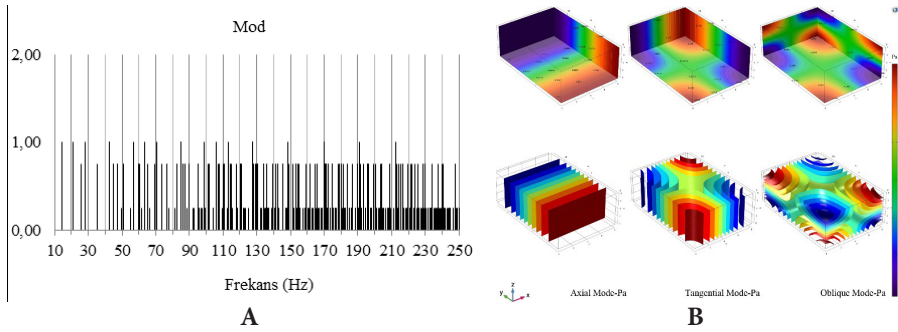
Şekil 2. 1:1:1 hacmi modal yoğunluk grafiği ve mod basınç değeri (Pa) gösterimleri.

Aksiyel mod=1, teğet mod=0.75 ve oblik mod=0.25 değeri ile ifade edilir. Sadece bir boyut (eksen) tarafından desteklenen tekil frekans yoktur. Örneğin, 23.3 Hz. hacmin tüm boyutları tarafından desteklenir. Tüm aksiyel mod frekansları hacmin 3 boyutu tarafından desteklenir. Yine 131 Hz modu da üç kez meydana gelir ve her üç boyut (eksen) tarafından desteklenir. Bu odada 23.30 Hz, 46.60 Hz, 69.90 Hz, 93.21 Hz ve 116.51 Hz frekansları akustik olarak sorun oluşturabilecek frekanslardır. Spektrum boyunca modların oldukça

iyi bir dağılımı vardır. Modların birbirine mesafeleri bakımından hacim Bonello kriterini sağlamamaktadır. Modlar arasındaki mesafe hacmin Boyutlar aynı olduğundan mesafe sürekli olarak kendini tekrarlar. Tüm aksiyel, teğet ve oblik modlar hacim, birbirinin tam katı olduğundan birbirlerinin tam sayı katları olarak oluşmaktadır. Bu oda boyutuna bağlı olarak hep aynı frekans ve katlarında mod oluştuğunu gösteririr. **Şekil 2B** hacmin ilk aksiyel, teğet, oblik modunu gösterir.

2.2. Harmonik oranın değerlendirilmesi, 3:2:1

Şekil 3A hacmin aksiyel, teğet ve oblik modlarına ait modal yoğunluğunu ve dağılımını gösterir.



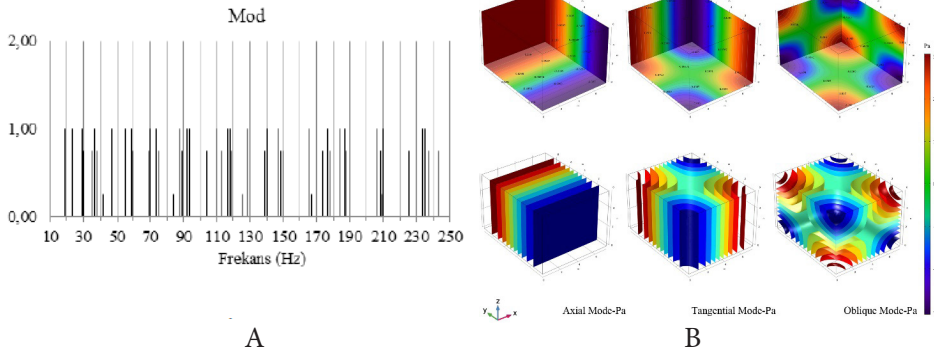
Şekil 3. 3:2:1 hacmi modal yoğunluk grafiği ve mod basınç değeri (Pa) gösterimleri.

Sadece bir boyut (eksen) tarafından desteklenen tekil frekanslar mevcuttur. Hacimde yükseklik ekseninin (H) birinci aksiyel modu olan $f_{0,0,1}=42.35$ Hz. ve genişlik (W) ekseninin ikinci aksiyel modu olan $f_{0,2,0}=42.35$ Hz ile çakışmaktadır. Bu durum oda oranlarının birbirinin sıralı tam katı olmasından kaynaklanmaktadır. 42.35 Hz, 84.69 Hz, 127.04 Hz, frekansları akustik olarak sorun oluşturabilecek frekanslardır. Bu frekanslar hacimde birden fazla kez oluşmaktadır. Yine boyutların sıralı kat olması dolayısıyla modlar arasındaki mesafe birbirinin katları olarak oluşur. Modların birbirine mesafeleri bakımından hacim Bonello kriterini sağlamamaktadır. **Şekil 3B** hacmin ilk aksiyel, teğet, oblik modunu gösterir.

2.3. Altın oranın değerlendirilmesi, 1.26:1.6:1

Şekil 4A hacmin aksiyel, teğet ve oblik modlarına ait modal yoğunluğunu ve dağılımını gösterir. Hacimde tüm eksenlerin frekansları birbirinden farklı olarak oluşur. Bu durum oda oranlarının birbirinin tam katı olmamasından

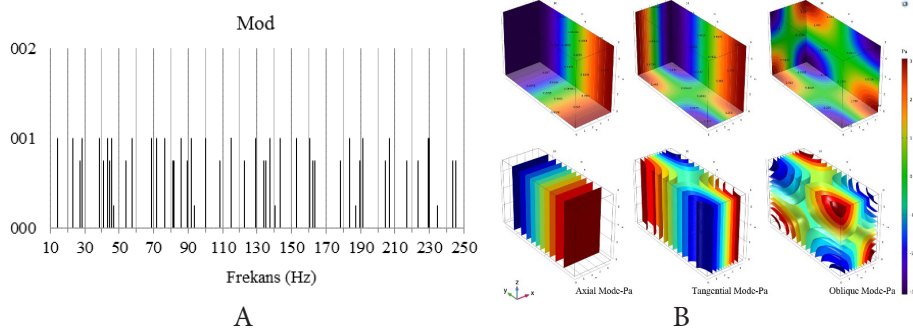
kaynaklanır. Spektrum boyunca modların dağılımı düzensizdir. Spektrum grafiği belirli frekanslarda sıklaşırken belirli frekans aralıklarında hiç mod göstermez ve seyrelir. Frekans bölgelerindeki modlar kendi içerisinde 2 veya 3'lü gruplar olarak birbirine yakın oluşur. **Şekil 4B** hacmin aksiyel, teğet ve oblik modlarına ait modal yoğunluğunu ve dağılımını gösterir. Bu grupların birbirleri ile arasındaki mesafeler oldukça fazladır. Spektrum boyunca modlar arası mesafe düzensizlik gösterir. 70 Hz ve 110 Hz frekans bölgelerinde birbirine çok yakın modlar gözlemlenirken, 60-70 Hz, 90-110 Hz, 190-210 Hz frekans aralıklarında büyük boşluklar görülür. Modların birbirine mesafeleri bakımından hacim Bonello kriterini sağlamamaktadır.



Şekil 4. 1.26:1.6:1 hacmi modal yoğunluk grafiği ve mod basınç değeri gösterimleri.

2.4. European oranının değerlendirilmesi, 1.6:0.6:1

Şekil 5A hacmin aksiyel, teğet ve oblik modlarına ait modal yoğunluğunu ve dağılımını gösterir.

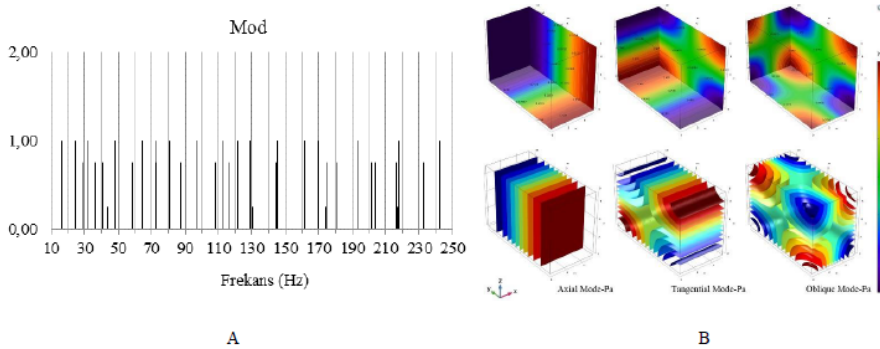


Şekil 5. 1.6:0.6:1 hacmi modal yoğunluk grafiği ve mod basınç değeri (Pa) gösterimleri.

Yukarıdaki oran türlerinin incelenme mantığı ve analiz şekli üzerinden devam edildiğinde; tekil frekanslar mevcuttur. Tüm eksenlerin mod frekansları birbirinden farklı olarak oluşur. Spektrum grafiği belirli frekanslarda sıklaşırken belirli frekans aralıklarında hiç mod göstermez ve seyrelir. Modların birbirine mesafeleri bakımından hacim Bonello kriterini sağlamamaktadır 1.6:0.6:1 oranlı hacimde diğer hacimlerde en duvarları arasında oluşan ikinci aksiyel mod tavan ve döşeme duvarları arasında oluşmaktadır. Bu durumun nedeni yüksekliğinin en boyutuna oranla büyük olmasıdır. **Şekil 5B** hacmin ilk aksiyel, teğet, oblik modunu gösterir.

2.5. Alberti oranının değerlendirilmesi, 1.5:0.75:1

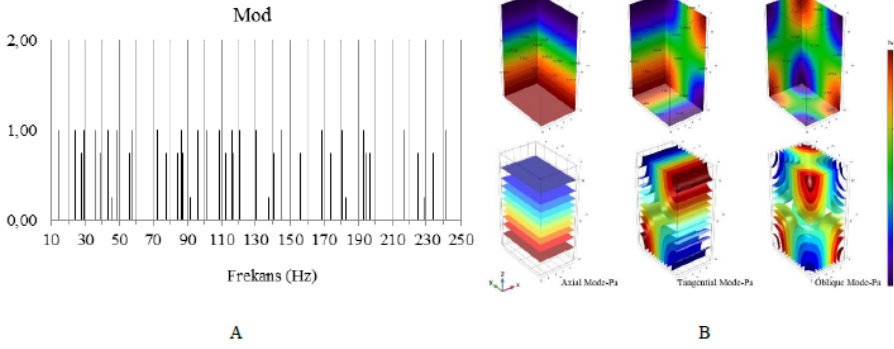
Şekil 6A hacmin aksiyel, teğet ve oblik modlarına ait modal yoğunluğu ve dağılımını gösterir. Spektrum boyunca modların dağılımı düzensizdir. Spektrum grafiği belirli frekanslarda sıklaşırken belirli frekans aralıklarında hiç mod göstermez ve seyrelir. Modların birbirine mesafeleri bakımından hacim Bonello kriterini sağlamamaktadır.



Şekil 6. 1.5:0.75:1 hacmi modal yoğunluk grafiği ve mod basınç değeri (Pa) gösterimleri.

2.6. Alberti oranının değerlendirilmesi, 0.6:0.4:1

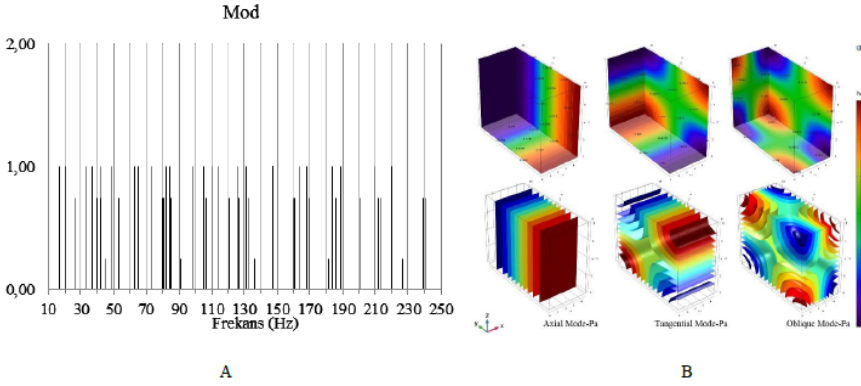
Şekil 7A hacmin aksiyel, teğet ve oblik modlarına ait modal yoğunluğunu ve dağılımını gösterir. Spektrum boyunca modların dağılımı belirli gölgeler dışında düzenlidir. Spektrum grafiği belirli frekanslarda sıklaşırken belirli frekans aralıklarında seyrelir. Modların birbirine mesafeleri bakımından hacim Bonello kriterini sağlamamaktadır.



Şekil 7. 1.5:0.75:1 hacmi modal yoğunluk grafiği ve mod basınç değeri (Pa) gösterimleri.

2.7. Alberti oranının değerlendirilmesi, 1.28:0.57:1

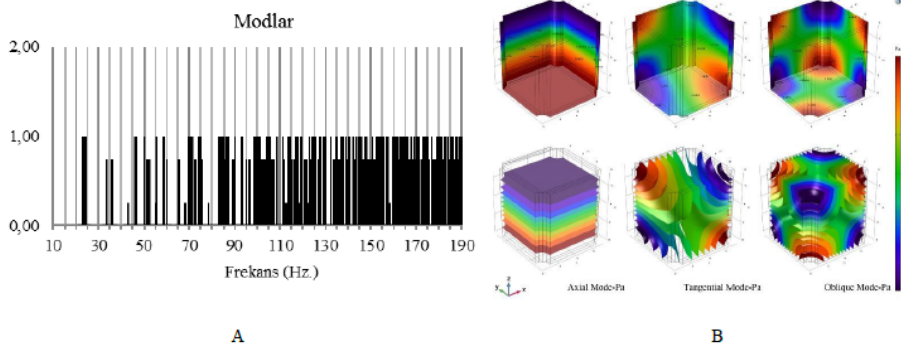
Sadece bir boyut (eksen) tarafından desteklenen tekil frekanslar mevcuttur. Spektrum boyunca modların dağılımı nispeten düzenlidir.



Şekil 8. 1.5:0.75:1 hacmi modal yoğunluk grafiği ve mod basınç değeri (Pa) gösterimleri.

2.8. Birinci küp alternatifinin incelenmesi

Küp hacme uygulanan birinci köşe değişimi; odanın dört köşesine yerleştirilen ve oda yüksekliğince devam eden, 0,92 m yarı çapında dış bükey silindirik elemanlar kullanılmasıdır. Şekil 9 hacmin aksiyel, teğet ve oblik modlarını ve mod yoğunluğunu gösterir.

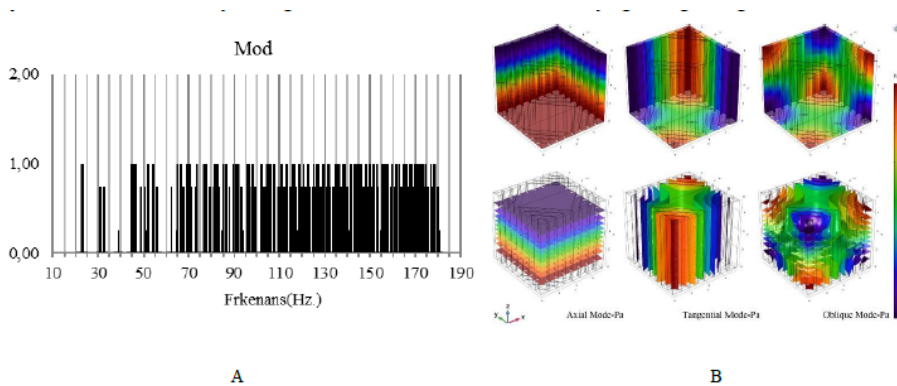


Şekil 9. 1.5:0.75:1 hacmi modal yoğunluk grafiği ve mod basınç değeri (Pa) gösterimleri.

Küp hacme kıyasla düşük frekanslarda bir etki oluşturmamıştır. Hacmin modal yoğunluğu belirli frekans aralıklarında sıklaşırken özellikle düşük frekans bölgesinde belirgin bir seyreklik gösterir.

2.9. İkinci küp alternatifinin incelenmesi

Küp hacme uygulanan ikinci yüzey değişimi; odanın yüzeyleri boyunca yerleştirilen ve oda yüksekliğince devam eden, 10x40 cm boyutlarında düşey latalar kullanılmasıdır. Latalar arası mesafe lata aksından 92 cm olacak şekilde hacmin dört duvar yüzeyine konumlandırılmıştır. Şekil 10 hacmin aksiyel, teğet ve oblik modlarını ve mod yoğunluğunu gösterir.

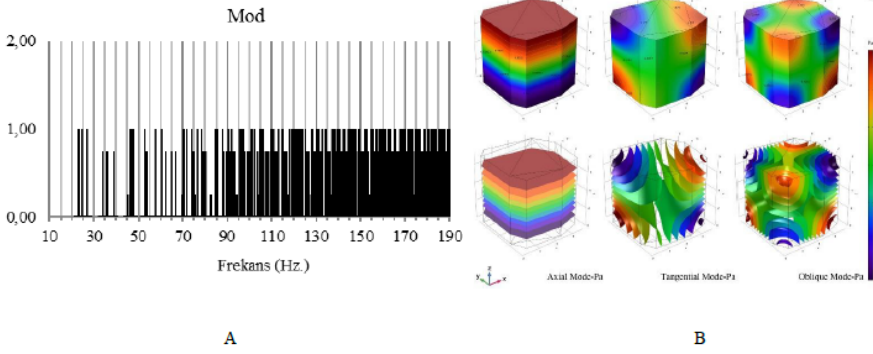


Şekil 10. 1.5:0.75:1 hacmi modal yoğunluk grafiği ve mod basınç değeri (Pa) gösterimleri.

Hacmin modal yoğunluğu belirli frekans aralıklarında sıklaşırken özellikle düşük frekans bölgesinde belirgin bir seyreklik gösterir. Sadece bir boyut (eksen) tarafından desteklenen tekil frekanslar ve çakışık frekanslar mevcuttur. Mod frekansları küp hacme kıyasla düşük frekans değerlerinde etkili bir değişim göstermemiştir.

2.10. Üçüncü küp alternatifinin incelenmesi

Küp hacme uygulanan üçüncü yüzey değişimi; odanın yüzeylerinin farklı derecelerde açlandırılmasıdır. Mimari kullanım açısından hacmin bir yüzeyi sabit tutulmuştur. **Şekil 11B** hacmin aksiyel, teğet ve oblik modlarına ait modal yoğunluğunu ve dağılımını gösterir.



Şekil 11. 1.5:0.75:1 hacmi modal yoğunluk grafiği ve mod basınç değeri (Pa) gösterimleri.

Hacmin modal yoğunluğu belirli frekans aralıklarında sıklaşırken özellikle düşük frekans bölgesinde belirgin bir seyreklik gösterir. Bir eğri biçiminde 0 basınç çizgisi oluşmuştur. Hacmin yüzeylerinin paralelliğinin bozulması modların biçim ve konum özelliklerini değiştirmiştir. Hacmin orta noktasında oluşan basınç konumu değişmiştir. Köşe pahlarının boyutsal özellikleri dolayısıyla hacmin yeni köşeleri olarak davrandıkları ve basınç noktalarının bu yeni köşelerde olduğu görülür.

3. SONUÇ

Bir hacmin akustiği, o hacimde kullanılan elemanların malzeme (yutuculuk, yansıtıcılık ve saçıcılık) ve şekil (düzlem ve eğri) özellikleri ile şekillenir. Malzeme kararlarının alınmadığı, mekânın geometrik olarak tasarlandığı ilk planlama aşamasında, yüzey ve boyutlara ait geometrik oran ve biçim özel-

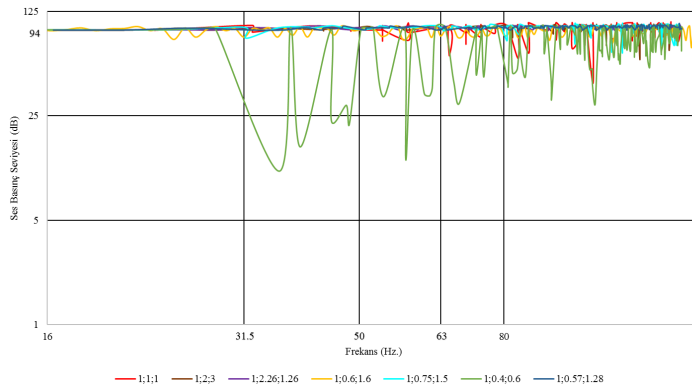
likleri hacmin modal karakteristiği üzerinde etkilidir. Modların oluşumu ve hesaplanması malzeme bilgilerinde bağımsız olarak şekil ve boyut üzerinde yapılır. Malzeme, modların ses basıncı (Pa) değerleri üzerinde etkilidir; ancak modların hacim içerisindeki şekil ve konum özelliklerini etkilemez.

3.1. Oda oranlarının etkisinin incelenmesi

Modlarının incelendiği 7 oran modal karakteristikler açısından farklı frekans ve basınç değerleri verir. Ancak modların konum ve şekil özellikleri aynıdır. Hacimlerde aksiyel mod; yz, xz ve xy yüzeylerinin orta noktalarında, teğet mod; yz ve xz yüzeylerinin kesişimi olan köşe noktalarında oblik mod; yz, xz ve xy yüzeylerinin kesişimi olan köşe noktalarında olduğu görülür. Hacimlerde aynı frekansa sahip modların hacmin farklı yüzeyleri tarafından desteklendiği görülür. Bu durum özellikle 1:1:1, 3:2:1, 1.5:0.75:1 ve 0.6:0.4:1 oranlı hacimlerde oranları arasında tam sayı ilişkisi ve ortak bir sayı böleni bulunan durumlarda görülür. Bu çakışık modlar, modlar arası mesafe kriterlerini sağlamaz. Oranları arasında sayısal ortak bölen ilişkisi olmayan 1.28:0.57:1 ve 1.6:1.26:1 oranlarına sahip hacimlerde çakışık mod olayı görülmemiştir.

3.2. Frekans tepki (frekans-desibel ilişkisi) eğrisinin incelenmesi

Hacimlerin frekans tepkileri (frekans-desibel ilişkisi) üzerinden incelendiğinde hacimler arasında basınç farkları gözlenmiştir. Tüm hacimlerde tepe ve vadi noktalarının frekans arttıkça sıklaştığı ve arttığı görülür. Modlara ait benzetim görselleri incelendiğinde + ve - basınç değerlerinin olması sesin oda içerisinde homojen bir yayılım göstermediğini ifade eder. Köşe noktalarında ses basıncı orta eksene göre artmaktadır. 60 dB bir konuşma sesi kabul edilirse köşe noktalarda düzeyinin yükseldiği ve küçük odada sesin anlaşılabilirliğini olumsuz etkilediğini gösterir.



Şekil 12. 7 oran türüne ait hacimlerin frekans tepkisi eğrileri. Eğri üzerindeki değerler frekans ekseninde yer almaktadır.

3.3. Köşe elemanlarının ve paralelliğinin bozulmasının etkisinin incelenmesi

Köşe elemanlarının etkisinin incelenmesi: küp hacimde oluşan modların frekans, konum, biçim özellikleri ile frekans tepkisinin hacmin köşelerine ve yüzeylerine yapılan değişiklikler sonucunda değiştiği görülmüştür. Köşelere dış bükey elemanlar eklenmesi (1 inci hacim); frekans değerleri birim küp hacim ile benzer oluşur. Dış bükey köşe formunun sesi yayıcı etki gösterdiği ve basınç çizgilerinde kaymalar olduğu görülür. Yüzeylere düşey latalar eklenmesi (2 inci hacim); beklenildiği gibi düşük frekanslarda difüzör etkisi göstermemiştir. Hacmin köşe noktalarında basınç maksimumu, orta noktasında basınç minimumu (0 basınç noktası) görülür. Bu şekil değişimlerinin yüzey boyutları itibariyle düşük frekanslarda hacmin modal karakteristiğini (frekans, konum, biçim) etkili bir biçimde değiştirmedeği görülmüştür. Yüzey paralelliğinin bozulması (3 üncü hacim); frekans değerleri birim küp hacim ile benzer oluşur. Köşelerde, dikdörtgen prizma davranışı olarak karşımıza çıkan, basınç maksimumu oluşmuştur ancak küp hacimde plan düzleminin merkezinde oluşan 0 basınç noktası paralelliğin bozulması ile merkezden uzaklaşmıştır. Hacmin yüzey paralelliklerinin bozulması, hacmin basınç noktalarının konumlarını değiştirir. Çalışılan 3 hacim içerisinde modal karakteristiğinin en etkin değiştiği örnek yüzey paralelliğinin bozulduğu olmuştur. Hacim içerisinde yayılımını etkileyecek yüzey düzensizlikleri oluşturmak modun konum özelliklerini belirlemek açısından önemlidir.

3.4. Oda oranlarının mimari tasarım açısından incelenmesi

Oda modlarının incelendiği 7 oran türünün mimari tasarım kriterleri açısından görsel ve işitsel olarak sağladığı artı ve eksi yanları vardır. Görsel algı, oranların birbiri ile uyumunu, orantılı ve göze güzel gözükmeleri durumunu ifade eder. İşitsel algı, hacimde modların genel karakteristiğini, sesin yayılımını ve basınç durumunu ifade eder. **Tablo 2** mimari tasarım açısından hacimlerin değerlendirilmesini gösterir.

Tablo 2. Mimari tasarım açısından hacimlerin değerlendirilmesi.

Oran Türü	Oranlar			Frekans Tepki Eğrisi	Renklenme Durumu	Görsel Algı	İşitsel Algı (Akustik)	Sonuç
	L	W	H					
Harmonic	3	2	1	Basınç Farkına Göre	Var	+	-	- - + -
Golden Ratio	1.26	1.6	1	Basınç Farkı Az	Var	+	+	+ - + +
European	1.6	0.6	1	Basınç Farkı Fazla	Var	+	+	- - + +
Alberti	1.5	0.75	1	Basınç Farkı Fazla	Var	+	-	- - + -
Cube	1	1	1	Basınç Farkı Çok Fazla	Var	-	-	- - - -
Alberti	0.6	0.4	1	Basınç Farkı Çok Fazla	Var	+	-	- - + -
Alberti	1.28	0.57	1	Basınç Farkı Az	Var	+	+	+ - + +
Birinci Hacim	1	1	1	Basınç Farkı Fazla	Var	-	-	- - - -
İkinci Hacim	1	1	1	Basınç Farkı Çok Fazla	Var	-	-	- - - -
Üçüncü Hacim	1	1	1	Basınç Farkı Fazla	Var	-	+	- - - +

Tabloda, basınç farkının fazla olması ve renklenme negatif olarak işaretlenmiştir. Küp hacim tüm boyutlarının eşit olması mekan algısını olumsuz etkilediğinden negatif işaretlendi. Modların daha önce yapılan analizlerine göre işitsel algı değerlendirildi. Tüm bu değerlendirmeler sonucunda en çok pozitif işareti alan oranlar mimari tasarım açısından değerlendirmenin sonucunu verir. Mimari tasarım açısından ele alındığında altın oranlı hacim hem görsel hem de işitsel algı açısından olumlu sonuçlar vermektedir. Her iki tasarım kriterini de birlikte karşılayabilmektedir.

4. KAYNAKLAR

- [1] Padovan, R. (2007). *Proportion: Science, Philosophy, Architecture*. Londra: E & FN Spon.
- [2] Long, M. (2006). *Architectural Acoustics*, UK: Elsevier Academic Press.
- [3] Bolt, R. (1946). Note on Normal Frequency Statistics for Rectangular Rooms. *Journal of the Acoustical Society of America*, 18, 130-133. <https://doi.org/10.1121/1.1916009>
- [4] M.A. Błaszak, Acoustic design of small rectangular rooms: Normal frequency statistics, *Applied Acoustics*, Volume 69, Issue 12, 2008, Pages 1356-1360, ISSN 0003-682X, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2007.10.005>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X07001685>)
- [5] Sepmeyer, L.W. (1965). Computed Frequency and Angular Distribution of the Normal Modes of Vibration in Rectangular Rooms. *Journal of the Acoustical Society of America*, 37, 413-423. <https://doi.org/10.1121/1.1909344>
- [6] Louden, M.M., Dimension Ratios of Rectangular Rooms with Good Distribution of Eigentones, *Acustica*, 24: 101-104, 1971.
- [7] Milner J., Bernhard R. (1989), An investigation of the modal characteristics of nonrectangular reverberation rooms, *Journal of the Acoustical Society of America*, 85, 772-779. <https://doi.org/10.1121/1.397549>
- [8] J.E.Volkman. (1942). Polycylindrical Diffusers in Room Acoustical Design. *J.Acoust.Soc. Am.*, 13 Temmuz. Sayfa 234-243.
- [9] Bolt, RH. (1939). Frequency distribution of eigentones in a three-dimensional continuum. *J. Acoust. Soc. Am.* Vol.10 p258
- [10] Bolt RH. (1947). Normal frequency spacing statistics. *J. Acoust. Soc. Am.* Vol.19 p79
- [11] Bolt RH. (1939). Normal modes of vibration in room acoustics: angular distribution theory. *J. Acoust. Soc. Am.* Vol.11 p74
- [12] Bolt RH. (1946). Note on normal frequency statistics for rectangular rooms. *J. Acoust. Soc. Am.* Vol.18 p30
- [13] Meissner, M. (2018). A Novel Method for Determining Optimum Dimension Ratios for Small Rectangular Rooms. *Archives of Acoustics*. Vol. 43, Sayı 2.
- [14] J. Sarris, "A New Method for the Determination of Acoustically Good Room Dimension Ratios," Paper 9047, (2014 April.).

YANKISIZ ODALAR İÇİN SES YUTMA KATSAYISI YÜKSEK AKUSTİK KAMA (WEDGE) TASARIM VE ÜRETİMİ

Onur AKAYDIN¹

Yük. Müh, Pro-Plan Ltd. Şti., e-posta: onur@proplan.com.tr

Alper AKGÜL²

Müh. E-MBA, Pro-Plan Ltd. Şti., e-posta: alper@proplan.com.tr

Ezgi TÜRK GÜRKAN³

Yük. Mim, Pro-Plan Ltd. Şti., e-posta: ezgi@proplan.com.tr

H. Temel BELEK⁴

Prof. Dr., Pro-Plan Ltd. Şti., e-posta: belek@proplan.com.tr

ÖZET

Günlük yaşantımızda kullandığımız ve dünya pazarlarında rekabet eden ürünlerin artan yaşam kalitesine paralel olarak daha sessiz olmaları beklenmektedir. Uluslararası standartlar, tüm bu ürünlerin ses gücü ölçümlerinin yapılarak etiket değerlerinin ürün üzerinde belirtilmesini öngörmüştür. Ar-Ge ve ürün geliştirme amacına yönelik bu ölçümlerin büyük bir bölümü ISO 3740-3747 serisi standartlara göre tam veya yarı yankısız akustik odalarda yapılmaktadır. Üründen kaynaklanan sesin ölçümler esnasında yankısız oda içindeki yüzeylerden yansımalarını önlemek için ses yutumu çok yüksek kama şeklinde özel olarak imal edilmiş akustik yutucu elemanlar kullanılır. Yapılan çalışmanın amacı, akustik kamaları ISO 10534-1 standardına göre ülkemizde üretilebilmek için bir test sistemi geliştirmek ve bu akustik kamaları kullanarak uluslararası akredite edilmiş yarı ve tam yankısız odalar yapabilmektir.

Anahtar Kelimeler: Ses yutma katsayısı, akustik malzemeler, empedans tüpü, yankısız odalar, ses gücü ölçümleri

HIGH ABSORPTION WEDGE DESIGN AND PRODUCTION FOR ANECHOIC ROOMS

ABSTRACT

Products that we use in our daily lives which compete in the world markets are expected to be quieter in parallel with the increasing quality of life. International standards require that the sound power measurements of all these products should be performed and labeled on the product. Most of these measurements for R&D and product development purposes are made in full or semi-anechoic acoustic chambers according to ISO 3740-3747 standard series. In order to prevent the reflection of the sound originating from the product from the surfaces in these rooms, specially manufactured acoustic absorber elements in the form of a wedge with very high sound absorption are used. The aim of this study is to develop a test system for developing these acoustic wedges locally, based on the ISO 10534-1 standard and to be able to construct full or semi-anechoic acoustic chambers which provide sound absorption at different frequencies with domestic infrastructure.

Keywords: *Sound absorption coefficient, acoustic materials, impedance tube, anechoic rooms, sound power measurements*

1. GİRİŞ

1.1. Kapsam

Akustik gürültü düzeyi ve **ses kalitesi** gibi parametreler, ses üreten herhangi bir ürünün ürün kalitesini her geçen gün biraz daha fazla belirlemektedir. Gerek tüketicinin beklentileri, gerekse de işçi ve toplum sağlığı odaklı yasal düzenlemeler ve yönetmeliklerle belirlenen ürün ses gücü düzeyi sınırları; makine ve cihaz üreticilerine akustik gürültü konusunda giderek daha sessiz ürünler üretme zorunluluğu getirmektedir.

Sessiz ürünler geliştirmek için konulan hedef ve beklentilerin yükselmesi ve bu sesleri üreten kaynakların ölçüm ve analizler yardımıyla belirlenmesi, Ar-Ge ve ürün geliştirme aşamalarında ilave zorluklar oluşturmaktadır. Örneğin, giderek daha düşük ses seviyelerini ölçebilmek için çok daha sessiz **akustik ölçüm odalarına** ihtiyaç duyulmaktadır. Diğer yandan, geçmişte daha geniş hata toleransları ile ölçümler yapılabilirken; ürünlerin sessizleşmesi ve teknolojinin de gelişmesi ile birlikte, bu hata toleranslarının da giderek daraldığı gözlenmektedir. Akustik alanındaki araştırma ve geliştirme çalışmaları yapan uzmanlar, yapılan deney ve analizlerin yeterli düzeyde güvenilir ve tekrarlanabilir olmasını sağlayabilmek için özel akustik ölçüm odalarına ihtiyaç duymaktadırlar.

Bir akustik ölçüm odasında güvenilir bir ölçüm yapabilmek için, ölçümü yapılan ürün haricindeki diğer tüm akustik bileşenlerin, örneğin; üründen çıkıp duvarlardan geri yansıyan sesin ve geri-plan gürültüsünün yapılan ölçüme katkısı, **tanımlanabilir** ve **tekrarlanabilir** olmalıdır. Bu nitelikteki ölçüm odaları başlıca iki gruba ayrılmıştır; *yankısız (anekoik) odalar* ve *çınlanım (reverberasyon) odaları*. Bu odaların sağlanması gereken nitelikleri tarif eden standartların en bilineni **ISO 3740 serisi** olup; değişik oda tipleri ve doğruluk seviyeleri için ISO 3741, ISO 3742, ..., ISO 3747 standartları da tanımlanmıştır.

Yankısız odalarda kesinlik (precision) düzeyinde hassas ölçümlerin yapılabilmesi için gerekli koşulları **ISO 3745** standardı tanımlar, [1]. Standart, herhangi bir ölçüm noktasında **ters kare yasasına** göre *hesaplanmış* ve *ölçülmüş* ses basınç düzeyleri arasındaki fark için bir limit belirlemiştir (± 1.5 ila ± 3 dB). Kapalı odalarda böylesi bir farkın en büyük nedeni, üründen çıkan seslerin oda duvarlarından yansıyıp ölçüm noktalarına tekrar geri gelmesidir. Bu yansımalar ne kadar az olursa, o kadar daha fazla **doğrudan ses** ölçülebilecek; böylece tanımlanabilir ve tekrarlanabilir bir ölçüm ortamı sağlanmış olacaktır.

Sesin yüzeylerden yansımalarını önlemek için, ses yutumu çok yüksek kama (wedge) şeklinde özel olarak imal edilmiş, akustik yutucu elemanlar kullanılmaktadır. ISO 3745:2003 standardında, odada kullanılacak yutucu elemanların ses yutma katsayısının (α) öngörülen frekans aralığı boyunca 0.99 veya

üzerinde olması önerilmektedir. Bu odalarda yapılan deneylerin alt kesim frekansının genellikle 50 Hz - 100 Hz aralığında olduğu düşünülürse, bu düşük frekanslar için hedefi, alışılagelmiş ev ve stüdyo tipi akustik yutucu malzemeleri ile sağlanamayacak kadar iddialı bir hedeftir. Gerçekten de, kullanılan yutucu malzemenin ses yutma katsayısının olduğu durumlarda, oda duvarlarına yaklaştıkça ISO 3745 ters kare yasası için toleransların güçlkle sağlanıyor olduğu görülmektedir, [2].

Bu yutucu elemanların ses yutma katsayısı, ISO 10534-1 standardına göre imal edilmiş özel bir empedans tüpü içinde ölçülmektedir. Bu elemanlar ve aksesuarları ülkemizde henüz üretilmemekte ve yüksek fiyatlarla yurt dışından ithal edilmektedir. Bu nedenle bu gibi yankısız odalar yurt dışı firmalar tarafından çok yüksek bedeller ile yapılmaktadır.

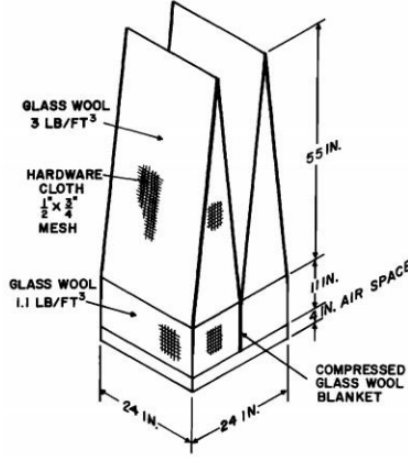
Bu çalışmanın amacı, akustik kamaların ISO 10534-1 standardına göre test edilmesi için bir test sistemi geliştirmek ve geniş bir frekans aralığında ses enerjisinin 99%'unun yutulmasını sağlayan bu akustik kamaları yurt içi imkanlar ile üreterek ülkemize önemli bir bilgi birikimi ve döviz tasarrufu kazandırmaktır.

1.2. Literatür Araştırması

Empedans tüpü deney sisteminin tasarımı, imalatı ve geliştirilmesine yönelik ihtiyaç duyulan hemen hemen tüm detaylar ISO 10534-1 standardında yer almaktadır, [3]. Literatür araştırması genellikle akustik kamaların tasarımı ve imalatına yönelik gerçekleştirilmiştir. Araştırma sırasında, farklı form ve dolgu malzemesine sahip akustik kamaların karşılaştırıldığı çalışmalara rastlanmıştır. Akustik kamaların dolgu malzemesinin genellikle camyünü / taşıyünü olarak tercih edildiği görülmektedir.

Beranek ve Sleeper 1946 yılında anekoik oda tasarımı hakkında kaleme aldıkları makalede, yutucu yüzeyine dik şekilde gelen ses enerjisinin 99%'unu yutabilecek kamalar için 6 geometrik aday içinden en optimum tasarımın, **üçgen prizma başlı kama (wedge)** tasarımı olduğunu göstermiştir, [4]. Nitekim günümüzde de en popüler yutucu geometrisi bu kama geometrisidir. Beranek'in yutucu kamaları camyünüdür ve geometrik boyutları deneme-yapılma yöntemiyle optimize edilmeye çalışılmıştır, [4].

Ingerslev tarafından yapılan deneylerde ise, Grünzweig ve Hartmann'ın Ludwigshafen'de ürettiği, 120kg/m³ yoğunlukta, Sillan sürecinden geçirilmiş, camyünü kamalar en iyi alternatif olarak belirlenmiştir, [5]. Bundan farklı olarak, Koidan, 3 lb/ft³ (48 kg/m³) yoğunlukta dolgu malzemesinin uygun olduğunu belirtmektedir, [6]. Koidan'ın akustik kama tasarımı Şekil 1 ile verilmiştir.

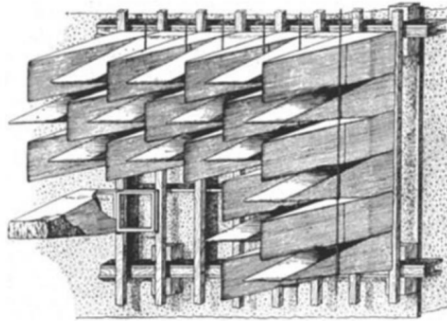


Şekil 1. Koidan tarafından önerilen akustik kama tasarımı

Akustik kamaların montaj biçimlerinin, kullanılacakları yankısız odaların performansı üzerine

olan etkilerine yönelik çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Daha uzun kamaların özellikle düşük frekans bölgesinde daha fazla yutuma sahip olduğu ortaya konmaktadır. Akustik kama boyutu büyüdüğünde yankısız odada ölçülebilen en düşük sınır (cut-off) frekansının da azaldığı belirtilmektedir [4].

Beranek'in çalışmasında düşük frekans bölgesinde yutumun artırılması için, akustik kamaların, monte edileceği rijit duvar elemanı ile arasında bir hava boşluğu bırakılması öngörülmüştür. Bu nedenle montaj için bir ızgara sistem önerilmektedir. Beranek'in önerdiği bu montaj biçimi Şekil 2'de paylaşılmaktadır.



Şekil 2. Beranek tarafından önerilen montaj biçimi

Koidan, 2 inç (5,08 cm) kaide üzerinde 52 inç (132,08 cm) uzunlukta bir kamanın 16 inç (40,64 cm) hava boşluğu ile monte edilmesi durumunda 50 Hz cut-off frekansına ulaşıldığını belirtmektedir [6].

Kenarları eğrisel formda olan akustik kamaların, düz kamalara oranla ses yutumu açısından fazla farkının olmadığı, verilen firenin ekonomik getirisinin daha dikkate değer olduğu vurgulanmıştır [4].

Yankısız akustik oda yapımında önde gelen bir firma olan Eckel'in akustik kamalar hakkındaki önerilerini de dikkate değerdir. Üretilen kamalar, farklı form ve ölçülerde olmakla birlikte, farklı kaplama malzemelerine de sahiptir. Dolgu malzemesi olarak camyünü veya sünger kullanılan modeller mevcuttur. Firma dış kaplaması perfore sac olan kamalar üretmektedir. Beranek'in çalışmasına uygun olarak ürettikleri "EW Standart Anechoic Wedge" ürünü, maksimum geniş bant yutum davranışı gösterdiği belirtilmiştir. Firmanın ürettiği akustik kama görselleri Şekil 3'te paylaşılmaktadır.



Şekil 3. Eckel'in ürün gamındaki çeşitli kama tasarımları

IAC firması tarafından camyününden imal edilmiş akustik kamaların kullanım zorluklarına dikkat çekilmektedir. Darbelere karşı korunmasız olması, camyünü dolgu liflerinin ortama saçılma potansiyeli ve bakım kolaylığı gibi nedenler ile kamaların perfore sac levhalar ile kaplanması önerilmektedir, [8]. Bu çalışmada; montaj, bakım ve güvenlik gereksinimleri avantajları da dikkate alınarak metal kaplama sacların tercih edilebilirliği ortaya konmuştur.

2. DENEY SİSTEMİNİN TASARIMI

"EN ISO 10534-1:2001 Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 1: Method using standing wave ratio" standardında empedans tüneli için gerekli yapım kriterleri özetlenmiş ve proje kapsamında imal edilen empedans tüpü için hedef olarak belirlenmiştir.

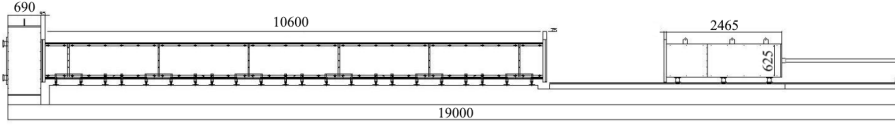
Tasarım kriterleri ve Tablo 1'de yer alan teknik özellikler aşağıda özetlenmektedir.

- Empedans tüneli; 50 Hz – 250 Hz frekans aralığında minimum rezonansa girmeyecek şekilde ağır ve rijit olmalıdır.
- Test numunesini taşıyan bölüm empedans tüneline ayrı bir ünite olmalıdır.
- Numune (kama) taşıyan bölüm ve empedans tüneline iç boyutları %0.2 mertebesinde uyumlu olmalıdır.
- Flanş bağlantılarının yüzeyleri pürüzsüz olmalı ve vazelin kullanılarak sıkı bir şekilde bağlanabilmelidir.
- Numune yerleştirilen tünel parçasının son plakası en az 20 mm kalınlığında olmalıdır. Numune taşıyan bölüm içinde numune takılan düzlem ile son plaka arasında 2.4 m boşluk bırakılmalıdır.
- Numune taşıyan bölümde 20 mm kalınlığında hareketli bir plaka ile numune arkasında 0.326 m – 2.15 m arasında boşluk yaratılabilmelidir.
- Empedans tüneli içinde hareket eden mikrofon taşıyıcı sisteminin kapsadığı kesit alanı tünel kesit alanının % 5'inden büyük olamaz.
- Hoparlör taşıyan bölüm ile empedans tüneli arasında esnek bağlantı sağlanmalıdır.
- Hoparlör taşıyan bölümün içi fazla yansımanın engellenmesi amacıyla yutucu malzeme ile kaplanmalıdır.
- Hoparlör yüzey alanı, empedans tüneli kesit alanının 2/3'ünden küçük olmamalıdır.

Tablo 1. Empedans tütünün teknik özellikleri

Alt frekans sınırı,	40 Hz
Üst frekans sınırı,	264 Hz
Tüp uzunluğu	10.6 m
Tünel iç boyutları	625 x 625 mm
Tünelin en kesitinde en uzun kenar,	0.625 m
Dikdörtgen veya kare kesitli tüneller için olmalı	$0.625 \leq 0.652$
Dikdörtgen veya kare kesitli tüneller için olmalı	$165 \leq 170$

Tütün genel görünüşü ve deney ortamı ise Şekil 4 ve Şekil 5'te görülmektedir.



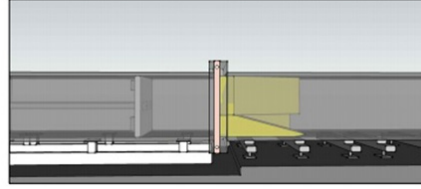
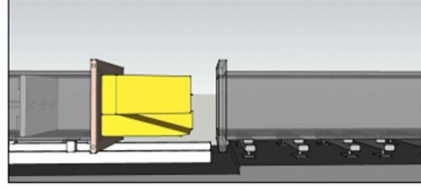
Şekil 4. Empedans tüpünün şematik çizimi (sağdan görünüş)



Şekil 5. Tünelin genel görünüşü (solda), deney ortamı (sağda)

Yapısal kökenli gürültülerin, uzun tünel yapısına iletilmemesi için zeminde titreşim yalıtımı yapılmıştır. Titreşim yalıtıcıları üstünde taşınacak bu toplam kütle için yaklaşık 32,000 kg civarında olacağı ve sistemin doğal frekansının 20 Hz'den küçük olması gerektiği dikkate alınarak uygun titreşim yalıtım malzemeleri seçilmiştir.

Akustik kamaların tüpün içine montajı için, öncelikle kamanın hareketli bir "numune yerleştirme bölümü"ne montajı ve ardından bu bölümün raylar üzerinde ilerlemek suretiyle tüpe doğru yaklaşarak tüp içine yerleştirilmesi sağlanmıştır. İlgili düzeneğe ait görseller Şekil 6 ile verilmiştir.



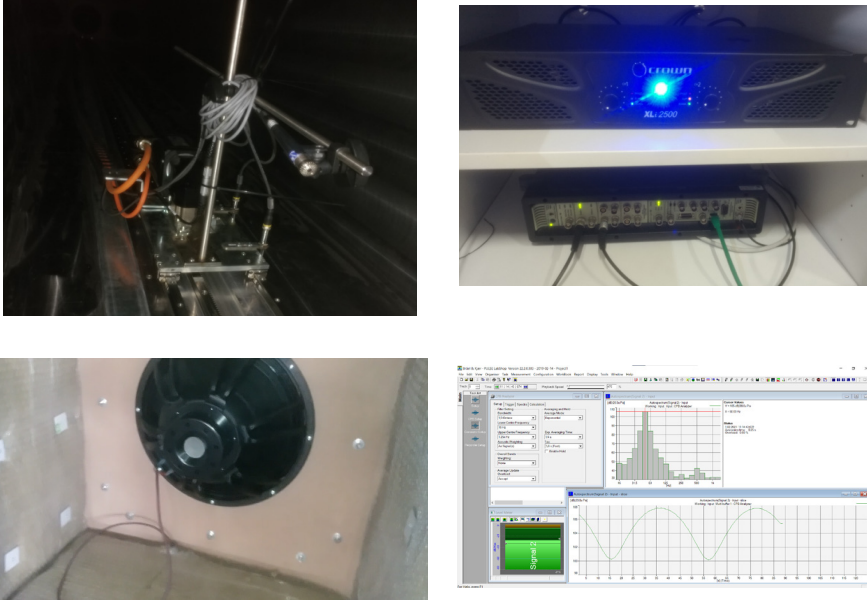
Şekil 6. Kamanın numune tutucuya montajı (solda), numune yerleştirme bölümünün tüp ile bağlantı şekli (sağda)



Şekil 7. Mikrofon taşıyıcı robot mekanizması

Tüpün içinde oluşan durağan dalga profilinin otomatik olarak ölçülebilmesi için tüp içerisindeki lineer bir ray üzerinde hareket eden mikrofon taşıyıcı robot mekanizması yerleştirilmiştir (Şekil 7). Mekanizma, tüp içerisindeki ses alanını etkilememesi için ölçüm yapılacak en üst frekans 264 Hz'in dalga boyunun 1/4'ünü (324 mm) geçmeyecek boyutlarda seçilmiştir.

Ölçüm sisteminde Brüel & Kjaer PULSE çok kanallı veri toplama sistemi, Brüel & Kjaer 4190-L-001 model serbest alan mikrofonu, Crown XLI 2500 model güç yükselticisi, B&C 21SW115 model 21" hoparlör sürücüsü yer almaktadır (Şekil 8).



Şekil 8. Ölçüm sisteminin ana bileşenleri

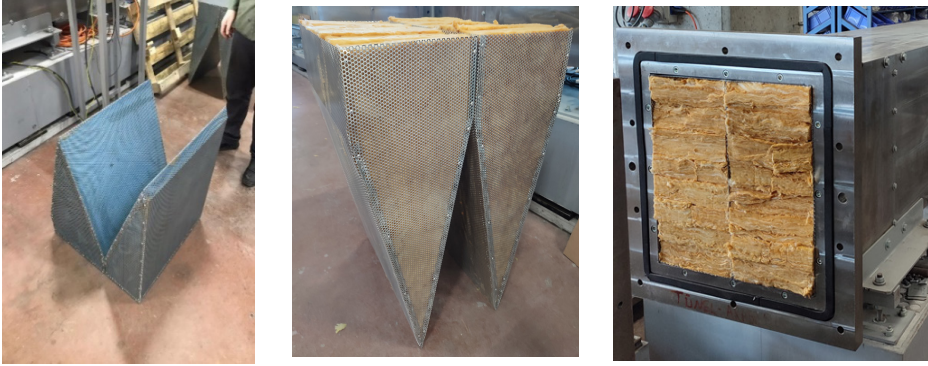
Ses ölçüm sistemi, mikروفon taşıyıcı robot, sinyal jeneratörü vb. bileşenlerin tümünün tek bir noktadan kontrolünü sağlayan özgün bir yazılım geliştirilmiştir. Yazılım ayrıca ISO 10534-1'e göre durağan dalgaların tepe ve çukur noktalarını tespit ederek ses yutma katsayısını otomatik olarak hesaplayıp sonuçları raporlandırma özelliğine sahiptir. Örnek bir ekran görüntüsü Şekil 9 ile verilmiştir.



Şekil 9. Geliştirilen özgün yazılım için örnek bir ekran görüntüsü

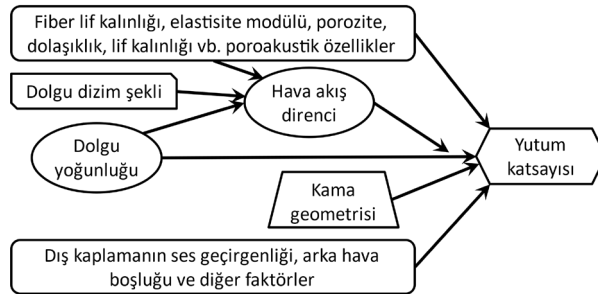
3. KAMA TASARIMI

İlk prototip (PROTOTİP A) için 125 Hz alt kesim frekanslı bir akustik kama hedeflenmiştir. Toplam uzunluğu 706 mm, kama genişliği 400 mm, dış gövdesi galvanizli perfore sac, dolgu malzemesi cam yünü olan bir numune imal edilmiştir. İkinci prototip (PROTOTİP B) ise 100 Hz alt kesim frekanslı olacak şekilde, 870 mm uzunluğunda, 312 mm kama genişliğine sahip, cam yünü dolgu malzemeli olarak üretilmiştir. Prototiplerin görüntüsü Şekil 10 ile verilmiştir.



Şekil 10. İmal edilen akustik kama prototipleri: PROTOTİP A (solda), PROTOTİP B (ortada), Empedans tüneline yerleştirilmiş PROTOTİP B (sağda)

İmal edilen deney düzeneği ile, ses yutma katsayısını etkileyen onlarca faktörün etkilerinin yön ve miktarının deneysel olarak belirlenmesi mümkün olmaktadır. Bu faktörlere örnek olarak; kama toplam boyu, baza/kama yüksekliği oranı, kama uç açısı ve uç kütlüğü; taban ölçüleri, dolgu malzemesinin hava akış direnci, porozitesi, yoğunluğu, dolaşıklığı; birden fazla çeşit dolgu malzemesi kullanımı, bunların dizilim şekilleri, yönleri ve sıralamaları; farklı montaj şekilleri, kama arkasında bırakılan hava boşluğu miktarı vb. sayılabilir. Bu faktörlerin birbirleriyle ilişkisi, çok yüzeysel olarak Şekil 11’de gösterilmiştir. Faktör sayısının fazlalığı, uygun akustik kama tasarımı için olası kombinasyon sayısını da arttırmaktadır.



Şekil 11. Ses yutma katsayısını etkileyen başlıca faktörler için basitleştirilmiş ilişki ağı

Kamaların tasarımı ve imalatı sırasında aşağıdaki kriterlere dikkat edilmektedir.

- Kamanın veya “kama + hava boşluğu”nun toplam uzunluğunun yaklaşık olarak olması önerilmektedir (: alt kesim frekansının dalga boyu), [1] [2].
- Kamanın baza yüksekliğinin, toplam kama uzunluğuna oranının yaklaşık 0.2 – 0.3 aralığında olması uygun görülmektedir, [2].
- Kumaş kaplı kamalarda, kumaş akustik olarak geçirgen olmalıdır (ses geçiş kaybı ilgilenilen frekans aralığında 0 dB’e olabildiğince yakın olmalıdır).
- Perfore sac gövdeli kamalarda, perforasyon oranının 40% ila 68% aralığında olmasının iyi sonuç verdiği görülmüştür, [10].
- Kamanın sivri ucu kütleştirilmek isteniyorsa, kütlük miktarı toplam kama boyunun 10%’unu geçmemelidir, [2].
- Uygun **dolgu malzemesi** ve **dolgu miktarı** seçilmelidir. Dolgu malzemesi; kamanın boyutlarına, uç açısına, hedeflenen alt kesim frekansına ve malzemelerin piyasadan temin edilebilirliğine göre seçilmelidir. Dolgu miktarı (malzemenin ne kadar gevşek veya sıkışık yerleştirileceği) ise, aday malzemenin yüksüz vaziyetindeki yoğunluk, hava akış direnci, elastisite modülü gibi poroakustik özelliklerine bağlı olarak seçilir. Bu seçimler, deneme/yanılma ile veya sonlu elemanlar yöntemi tabanlı modellemeler yardımıyla yapılmaktadır.
- Dolgu malzemesinin kama içine dizim şekli, malzemenin sesin geliş doğrultusundaki hava akış direncine bağlı olarak seçilmelidir. Zira cam yünü, kaya yünü gibi levha şeklinde satılan fiber esaslı malzemelerin hava akış direnci, levhanın farklı yönlerinde farklı sonuçlar vermektedir, [9].
- Hedef müşteri kitlesinin talep ettiği ve/veya yönetmeliklerin dikte ettiği diğer özellikler de gözetilmelidir. Örneğin yangına tepki sınıfı A1 (yanmaz) olan, çevresel ve pazar sürdürülebilirliği yüksek, toksikolojik açıdan olumsuz etkileri olmayan, iş güvenliği önlemleri gerektirmeyen, mekanik dayanımı ve uzun dönem performansı yüksek malzemeler seçilmelidir.

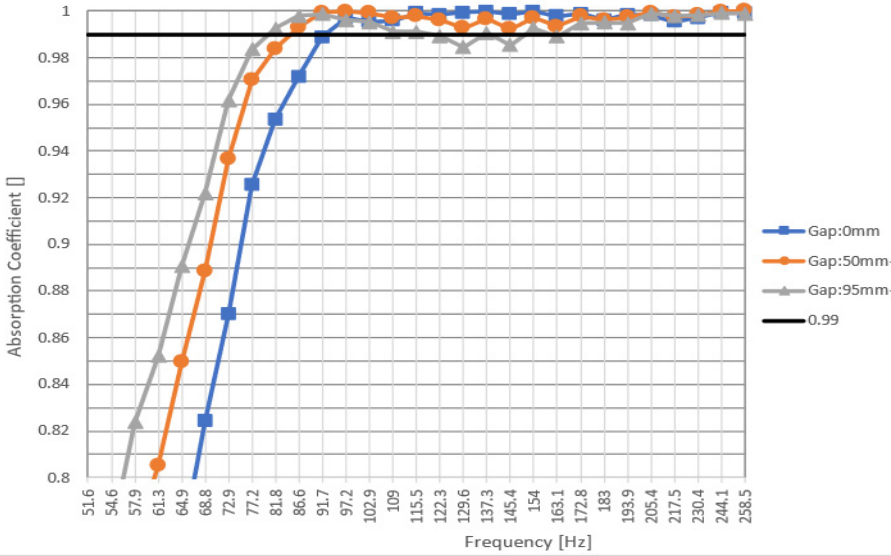
4. DENEY SONUÇLARI

Empedans tüpü deney düzeneğinin en önemli çıktısı ses yutma katsayısı () olmakla birlikte, yutum elemanına ilişkin kompleks yüzey empedansı (), kompleks yansıma katsayısı () gibi başka önemli çıktılar da elde edilmektedir.

Bu çıktılar, bilhassa sonlu elemanlar metodu (FEM) veya ışın izleme (ray tracing) tabanlı çeşitli simülasyon yazılımlarına girdi olabilmektedir.

Her ne kadar deney sistemi ile bugüne dek yüzlerce ölçümün çok farklı açılardan karşılaştırması yapılmış olsa da; bu çalışmada yalnızca birkaç örnek sunulmaktadır.

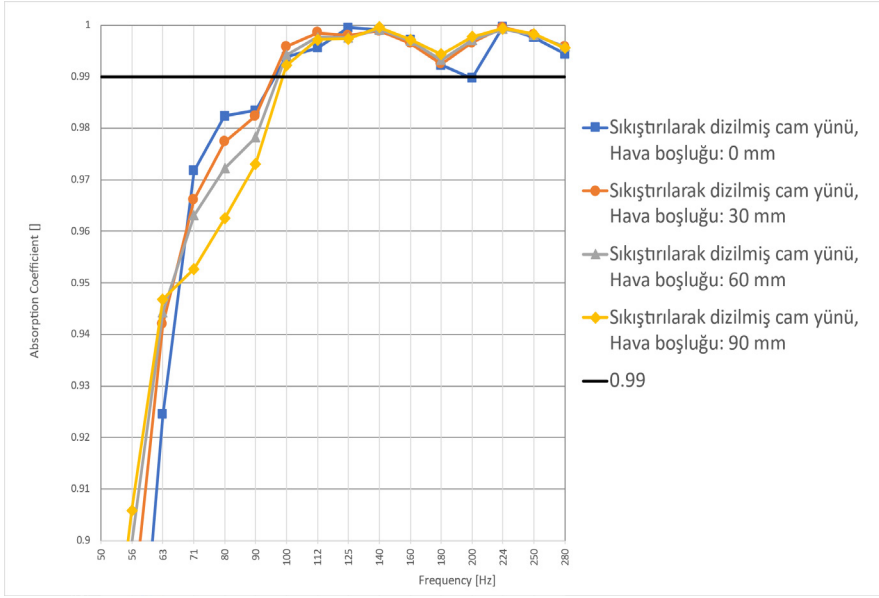
Şekil 12’de, 100 Hz alt kesim frekanslı bir kamanın arkasında bırakılan hava boşluğu miktarına bağlı olarak yutum eğrisinin değişimi görülmektedir. Hava boşluğu arttıkça alt kesim frekansı düşmekte, fakat orta frekans bölgesinde (bu örnekte 120-160 Hz aralığında) yutum değerleri düşmekte ve eğri boyun vermektedir.



Şekil 12. 100 Hz alt kesim frekanslı başarılı bir prototipte, arka hava boşluğu miktarının ses yutma katsayısı üzerindeki etkisi

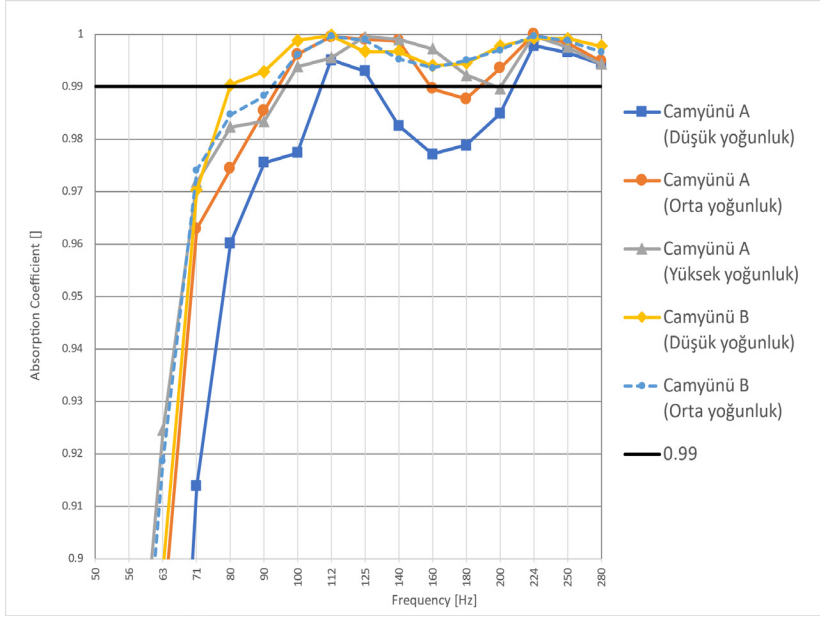
Şekil 13’te, gereğinden fazla cam yünü sıkıştırılarak doldurulan bir kamanın arka hava boşluğuna karşı verdiği tepki incelenmiştir. Bunun için cam yünü, nominal (yüksüz) yoğunluğunun 1.5 katı yoğunluğa ulaşacak kadar sıkıştırılarak dolgu yapılmıştır. Görüldüğü üzere, Şekil 12’deki prototipin aksine; hava boşluğu artmasına rağmen 100–125 Hz bölgesindeki yutum miktarı değişmemiş ve aynı zamanda alt kesim frekansı da düşmemiştir. Aksine 100 Hz altındaki frekanslarda yutum değerleri bir miktar azalmıştır. Bu durum, 70 – 90 Hz bölgesindeki ses dalgalarının, hava boşluğunun olduğu bölgeden veya rijit duvardan yansımak yerine bizzat kamanın ucuna yakın bir düzlemde geri yansıyor olmasıyla açıklanabilir. Zira akustik malzeme çok sıkıştırı-

rıldığı için hava akış direnci de yükselmektedir. Per Brüel'in de işaret ettiği üzere, akustik yutucu malzeme ne çok yumuşak (açık) ne de çok sert (akış direnci yüksek) olmalıdır; böylece sesin yansıdığı düzlem akustik malzemenin ortasında kalmakta ve iyi bir yutum değeri elde edilmektedir, [11].



Şekil 13. Sıkıştırılarak doldurulmuş bir kamanın yutum katsayısının, arka hava boşluğuna göre değişimi

Şekil 14'te ise, bir başka prototipin dolgu malzemesi ve dolgu yoğunluğu değiştirilmiş ve yutum performansları karşılaştırılmıştır. Kamanın geometrisi sabit kalmasına karşın, kullanılan farklı tipteki cam yünleri için optimum dolgu yoğunlukları da farklılık göstermektedir.



Şekil 14. Aynı sac gövdenin farklı tipteki cam yünleriyle ve farklı yoğunluklarla doldurulmasının yutum katsayısı üzerine etkisi

5. SONUÇLAR

Geliştirilen empedans tüneli sistemi kullanılarak, ülkemizde henüz üretilmeyen; 50 Hz – 125 Hz aralığında alt kesim frekansına sahip akustik kamaların yurt içinde **üretimi** ve bunların ISO 10534-1 standardına göre test edilmesi konusunda **önemli bir adım atılmış** ve ses yutma katsayısı bu frekanslarda 0.99 değerinin üstünde olan kamalar başarı ile üretilmiştir.

Deney çıktılarının detaylı analizleri yanısıra; süre gelen literatür araştırmaları ve Ar-Ge faaliyetleri ışığında üretilen prototiplerin optimizasyon **çalışmaları devam etmektedir**. Böylece yankısız akustik odalar için **üretim maliyetleri** düşük, yerli ve ekonomik kamaların üretiminin sağlanması hedeflenmektedir.

6. TEŞEKKÜR

- TEYDEB Destek Programları kapsamında yürütülmekte olan bu projemize sağladığı destek için TÜBİTAK'a, Proje izleme sürecinde yararlı önerileri ile bize destek olan Proje hakemi Prof. Dr. Çetin Yılmaz'a,
- Projemize uygulama alanı sağlayan ve test sisteminin ayrıntılı detay-

larını oluşturarak imalatını özenle geliştiren KBS Stand Sergileme Sistemleri (www.kbs.com.tr) yöneticisi Sayın Abdullah Aydın'a, Sayın Murat Demir ve ekibine teşekkürlerimizi sunarız.

7. KAYNAKLAR

- [1] ISO 3745, Acoustics – Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for anechoic rooms and hemi-anechoic rooms, 2003
- [2] Bonfiglioa P, Pompoli, F, Numerical methodologies for optimizing and predicting the low frequency behavior of anechoic chambers, The Journal of the Acoustical Society of America, Volume 134, Issue 1, 2013
- [3] ISO 10534-1, Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 1: Method using standing wave ratio, 1996
- [4] L.L. Beranek, H.P. Sleeper Jr, The design and construction of anechoic sound chambers, Journal of the Acoustical Society of America 18, 1946
- [5] Ingerslev e.a, New Rooms for Acoustical Measurements at Danish Technical University, Acustica vol. 19, 1967/1968
- [6] Koidan W, Hruska G.R., Pickett A.M., Wedge Design for National Bureau of Standards Anechoic Chamber, The Journal of the Acoustical Society of America, Volume 52, Issue 4A, 1972
- [1] Acoustic Testing Facilities Brochure, Eckel Noise Control Technologies, <<https://eckelusa.com/wp-content/uploads/2017/06/anechoic.pdf>>, son erişim: 09.08.2021
- [2] Lynde P.G., Buelow R.J., Development of an Alternative Anechoic Wedge, IAC bulletin, reprinted from Sound & Vibration October 1993, 1993
- [3] Tarnow, V., Measured anisotropic air flow resistivity and sound attenuation of glass wool, The Journal of the Acoustical Society of America, Volume 111, Issue 6, 2002
- [4] Sodennan P.T, Schmitz H. F, Allen S. C., Jaeger M. S., Sacco N. J., Mosher M., Hayes A.J., Design and Development of a Deep Acoustic Lining for the 40- by 80-Foot Wind Tunnel Test Section, NASA TP-2002-211850, 2002
- [5] Brüel P. V, Renaissance of SWT, Brüel Acoustics Technical Review 97-01, 1998

FANLARIN STANDARTLARA UYGUN AKUSTİK ÖLÇÜMÜ İÇİN BİR ÇINLAMA ODASI TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Mete Ögüç¹

Metzen Akustik, Sultangazi, İstanbul, Türkiye

e-posta: info@metzenakustik.com

Efe Ünal²

²Aironn Havalandırma San. A.Ş., Kocaeli, Türkiye

e-posta: info@aironn.com.tr

ÖZET

Fanların akustik ölçümünde kullanılan çinlama odaları, ANSI/AMCA 300-14 ve TS EN ISO 3741:2010 standartlarına göre doğru ölçüm yapılabilecek alt ve üst frekans sınırları, en büyük test nesnesi boyutları ve hedeflenen ölçüm hassasiyeti tasarım kriterleri dikkate alınarak tasarlanmalıdır. Farklı boyutlardaki çinlama odaları için bu kriterleri ve TS EN ISO 354:2003 standardında yer alan kriterleri karşılayan, Bonello kriterlerine göre de optimum akustik performansa sahip hacmi belirleyen bir yazılım geliştirdik. Bu bildiride hazırlanan bu tasarım ve optimizasyon yazılımını kısaca tarif edilmiş ve bu yazılımla elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: fan gürültüsü, çinlama odası, kaba kuvvet optimizasyon

DESIGN AND OPTIMIZATION OF A REVERBERATION CHAMBER FOR ACOUSTIC MEASUREMENT OF FANS CONFORMING TO STANDARDS

ABSTRACT

The reverberation chambers used in the acoustic measurement of fans should be designed considering the lower and upper frequency limits that can be measured accurately, the largest test object size, and the targeted measurement accuracy according to the design criteria in ANSI / AMCA 300-14 and TS EN ISO 3741: 2010 standards. We have developed a software that meets these criteria and the criteria in TS EN ISO 354: 2003 standard for different sizes of reverberation rooms and determines the volume with optimum acoustic performance according to Bonello criteria. In this paper, this design and optimization software is briefly introduced, and the results obtained with this software are evaluated.

Keywords: fan noise, reverberation chamber, brute-force optimization

1. GİRİŞ

Ekipman gürültü seviyelerini azaltmak özellikle tesisat sektöründe yer alan üreticilerin ürün geliştirme çalışmalarında oldukça önem verdikleri bir konudur. Üreticiler, tüm dünyada kabul gören uluslararası standartlar ve yönetmelikler tarafından belirlenmiş olan konfor şartlarını sağlamak ve rakiplerine kıyasla daha yüksek performanslı ürünler üretmek için bu alanda araştırma ve geliştirme çalışmaları yaparlar.

Fanlar, boyutları ve kapasitelerine göre 140 dBA'ya kadar ses üretebilmektedir. Yapı içindeki konumlarına ve mekanların komşuluk ilişkilerine bağlı olarak fan gürültüsü değerlendirilmeli, uygun gürültü önlemleri alınmalıdır. Gürültü problemlerini çözenin en etkin yolu ise istenmeyen gürültüyü kaynağında çözmektir. Bu nedenle, başta özellikle fan kanat ve gövde tasarımlarına etkiyen parametreleri olmak üzere, fanların akustiğine etkiyen parametreler araştırılıp, tasarımlar buna göre geliştirilir. Fan susturucu tasarımları da yine bu bilgiler doğrultusunda geliştirilmektedir.

Bu çalışmada, halihazırda dünyada fan akustiği konusunda ortaya konulan standartlarda fanlar üreten Aironn Havalandırma San. A.Ş. firması bünyesinde yer alan Ar-Ge departmanı tarafından AMCA 300 ve ISO 3741 standartlarına uygun, fanların akustik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan çınlama odalarını tasarlayabilmek amacıyla geliştirilen boyut tasarım optimizasyonu yazılımı ile yapılan çalışmalar aktarılmaktadır.

2. FANLARIN AKUSTİK ÖLÇÜMÜ

AMCA 300-14, her tür ve boyuttaki fanların akustik ölçümleri için geçerli laboratuvar koşullarını belirleyen standarttır. Fan gibi sabit ses yayan gürültü kaynaklarına ait ses gücü düzeylerini belirlemek için bir çınlama odası kullanılmasını önerir.

Çınlama odası, duvarlarından geri yansıyan akustik enerjinin oda içerisinde homojen dağılması ile ses basınç düzeyinin odanın her noktasında eşit olmasını sağlayan bir ses alanı yaratır. Böyle bir odanın herhangi bir noktasına yerleştirilen bir ses seviye ölçer ile bir ürünün gürültü seviyesi belirlenebilmektedir.

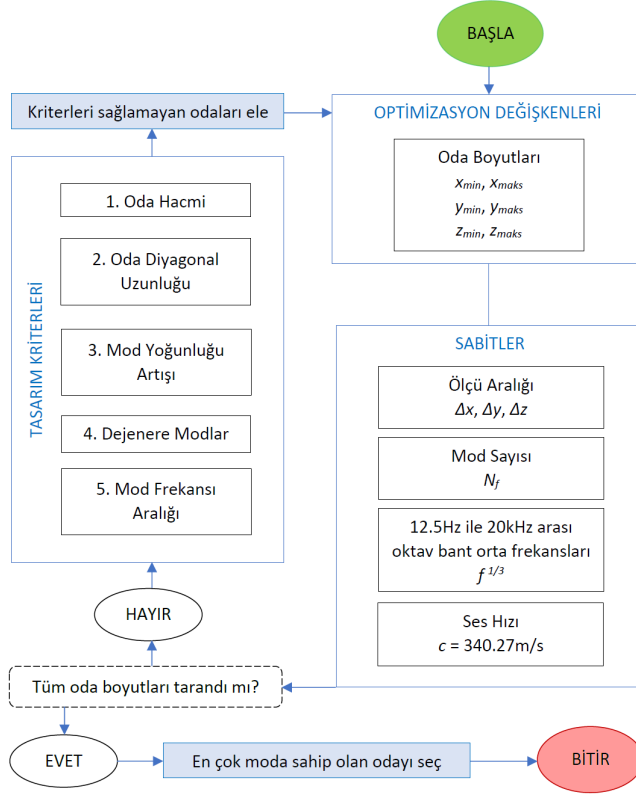
Ölçüm hassasiyetinin yüksek olması, çınlama odasının yaygın bir ses alanına sahip olmasına bağlıdır. Yaygın bir ses alanı oluşturabilmek için ise yeterli hacme, uygun oda şekline ve ilgilenilen frekans aralığında oda sınırları içerisinde akustik olarak yansıtıcı yüzeylere ihtiyaç duyulmaktadır [1,2]. Ses alanı yaygınlığı ise oda normal rezonans modları dağılımı hesaplanarak değerlendirilebilir.

Akustik bir uyarana maruz kalan dik açılı bir oda içerisindeki hava birbirlerine bağlı çok sayıda rezonatör gibi davranır. Hacmin doğal modlarına karşılık gelmeyen frekanslar birkaç rezonatörü aynı anda uyarırlar. İlk modların frekans aralıkları açıktır ve sayıları frekansın küpü olarak artar. Sesin doğru bir biçimde yansıtılabilmesi için her bir oktav bant aralığında görece olarak yüksek miktarda mod sayısına ulaşılması gerekmektedir. Bu gereklilik orta ve yüksek frekanslarda kolayca sağlanmaktadır fakat düşük frekanslarda modların arasındaki frekans aralıklarının açıklığı sebebiyle sağlanamamaktadır. Düşük frekanslarda hacmin az sayıda moda sahip olması odanın akustik cevabında bazı frekanslarda ses basıncı tepeleri oluşmasına ve bu birbirinden ayrıklık sebebiyle ayırt edilebilir tınılara sebep olmaktadır. Bu istenmeyen duruma sesin renklenmesi adı verilir [1]. Sesin düşük frekanslarda bu şekilde istenmeyen bir çeşitlilik kazanmasının önüne geçilebilmesi için mod aralıklarının spektral dağılımı dengelenmelidir. Bunun için oda mod sayısı, frekansları ve frekans aralıkları belirlenmeli, dağılımı da aşağıdaki başlıklarda özetlenen kriterlere göre optimize edilmelidir.

3. YAYGIN ALAN OPTİMİZASYONU

Çınlama odasının boyutlarını etkileyen faktörler ANSI/AMCA 300-14 ve TS EN ISO 3741:2010 standartlarına göre doğru ölçüm yapılabilecek alt ve üst frekans sınırları, en büyük test nesnesi boyutları ve ölçüm hassasiyeti olarak özetlenebilir.

Fan gürültü düzeyleri ANSI/AMCA 300-14'e göre 63 Hz ile 8000 Hz aralığında standardize edilmiş 8 adet oktav bant frekansta deklare edilir. Bu standartta deklare edilen diğer bazı koşulların sağlanması durumunda 1/3 oktav bant frekanslarında da fan gürültü düzeyi ölçümlerinin yapılması mümkündür [3]. Ayrıca test edilecek fanın oda merkez eksenlerine uzaklığı, fan test düzeneği, gürültü kaynağı ve mikrofon konumları gibi standart içinde tanımlanan kıstaslar dikkate alınmalıdır. Tüm bu kıstasların yanı sıra laboratuvarın inşa edileceği alanın sınırları, duvar, döşeme ve tavanda yapılacak yalıtımlı kesitler ve laboratuvar kapı, menfez ve tesisat bağlantıları da çınlama odası tasarımına ve optimizasyon algoritmamızda boyut kısıtlarımıza etki etmiştir.



Şekil 1. Optimizasyon algoritması için şematik gösterim

Hazırlanan optimizasyon koduyla yukarıda özetlenen boyut üst sınır şartlarını ve aşağıda açıklamaları verilen beş tasarım kriterini sağlayan çınlama odası boyutları hesaplandı. Şekil 1’de şematik tarif edilen kaba-kuvvet algoritma, optimizasyon stratejisi olarak tercih edilmiştir [4]. Bu kod GNU Octave 4.4.1 yazılımının Windows 64-bit versiyonu ile koşturuldu.

3.1. Kriter 1: Oda Hacmi

TS EN ISO 3741:2010 standardı test edilecek ürünün hacminin oda hacminin %2’sini geçmemesi gerektiğini belirtir [5]. Oda hacmini belirleyen bir diğer kıstas AMCA 300-14 standardında yer almaktadır. Buna göre oda içerisinde test edilecek fanın hacmi oda hacminin %1’ini geçmemelidir [3]. Bu durumda ise çınlama odasında ölçülmesi planlanan en büyük fanın hacmi dikkate alınmalıdır.

Hali hazırda fabrika içinde yer alan ve çınlama odasına entegre kullanılması planlanan ANSI/AMCA 210-16 fan test laboratuvarında 1800 mm çapa ve 1000 mm uzunluğa sahip fanların akış ölçümler yapılabilirdiği için çınlama odası hacmi de bu fanların ölçümlerini yapabilecek biçimde en az 254 m³ olmasına karar verilmiştir.

Kullanılan en alt frekans bandında en az 20 titreşim modu elde edilmesi gerektiği literatürde yer almaktadır [6]. Bu da oktav bantlarda ölçüm yapılması durumunda aşağıdaki eşitsizliğin sağlanması gerektiği anlamına gelmektedir:

$$V > 1,3\lambda^3. \quad (1)$$

1/3 oktav bant frekanslarında ölçüm yapılması durumunda ise aşağıda verilen eşitsizlik sağlanmalıdır:

$$V > 4,6\lambda^3. \quad (2)$$

Bu eşitsizliklerde sesin dalga boyu, λ , en düşük bant aralığının orta frekansı için hesaplanmaktadır [6]. Denklem (1)'e göre çınlama odası içerisinde oktav bant frekanslarında 63 Hz orta frekansında ölçüm yapabilmek için oda hacminin 204,8 m³, denklem (2)'ye göre ise çınlama odası içerisinde 1/3 oktav bant frekanslarında 50 Hz orta frekansında ölçüm yapabilmek için oda hacminin en az 1449,8 m³ olması gerektiği anlaşılmaktadır.

Tüm bu değerlendirmelerin ışığında oda hacminin minimum 254 m³ olması gerektiği anlaşılmaktadır.

3.2. Kriter 2: Oda Diyagonal Boyutunun Belirlenmesi

Oda içerisinde ses alanının yaygın olması için TS EN ISO 354 standardında oda diyagonalinin boyutu, I_{max} , ile hacim, V , ilişkisi aşağıdaki eşitsizlik ile verilmiştir:

$$I_{max} < 1,9V^{1/3}. \quad (3)$$

Değerlendirilen tüm oda boyutlarından hacim ve diyagonal uzunluğu hesaplanması ve Eşitsizlik (3)'te verilen kıstası da sağlaması gerekmektedir.

3.3. Kriter 3: Mod Yoğunluğu Artışı

Bonello'nun optimum oda boyutları için ortaya koyduğu kıstaslardan ilki mod dağılımı eğrisinin monotonik artmasıdır. Bunun için de her 1/3 oktav bant aralığına düşen mod sayısı hesaplandı. Yalnızca bant aralıklarında mod sayılarında monotonik artış olan oda boyutları bu kriterden uygunluk aldı.

Herhangi bir dik açılı oda içerisinde belirlenen bir frekansa kadar mod yoğunluğu, $\partial N_f / \partial f$, denklem (4) ile hesaplanabilmektedir.

$$\frac{\partial N_f}{\partial f} = \frac{4\pi V f^2}{c^3}. \quad (4)$$

Bu eşitsizlik mod sayısının, N_f hacimle doğru orantılı olarak, sesin hızı c ile ters orantılı, frekansın da, f , karesi ile arttığını göstermektedir. Haliyle daha büyük bir çınlama odasında küçük bir çınlama odasına kıyasla aynı frekans bandı için yaygın bir ses alanına erişmek mümkündür. Fakat bir diğer husus da frekansın ses alanına etkisidir. Genel olarak 300 Hz üstünde sesin renklenmesi fenomeni ortadan kaybolmaktadır [1].

$$N_f = \frac{4\pi}{3} V \left(\frac{f}{c}\right)^3 + \frac{\pi}{4} S \left(\frac{f}{c}\right)^2 + \frac{L}{8} S \left(\frac{f}{c}\right). \quad (5)$$

Denklem (5) ile belirlenen bir frekansa kadar oluşacak mod sayısı bu defa yüzey alanına da, S , bağlı olacak şekilde hesaplanabilmektedir [2]. Bonello'ya göre 1/3 oktav bant orta frekanslarında 200 Hz'e kadar hesaplama yapılması yeterli görülmektedir [1]. Çalışmamızda hazırladığımız optimizasyon kodunun hızı ve daha yüksek hassasiyetli bir çözüm elde etme imkânı elde etmiş olmamız sebebiyle biz mod sayısı hesaplanacak frekans sınırını 500 Hz olarak belirledik. Bu değer için mod sayısı öngörülen oda hacmi ve boyutları aralığı için 5000'i geçmediği hesaplanmıştır. Böylece her oda için ilk 5000 modun frekans değerlerinin hesaplanmasına karar verildi.

3.4. Kriter 4: Mod Tekrarı (Dejenere Modlar)

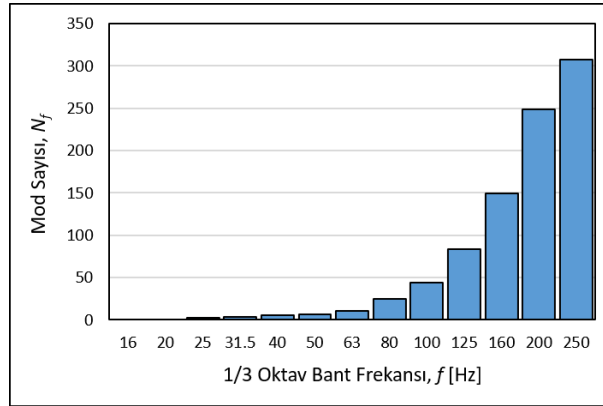
Oda içerisindeki rezonans yalnızca odanın modlarını uyaracaktır. Yani bazı frekanslarda rezonans olacakken diğer frekanslarda hiç rezonans olmayacaktır. Kaynağın sesi kesildiği anda oda modlarında depolanan enerji logaritmik olarak azalır. Bu sebeple mod tekrarlarının olması enerji yoğunluğunun özellikle bu frekanslarda birikmesi anlamına gelecektir. Bu istenmeyen durumun önüne geçebilmek için Bonello ikinci kıstas olarak mod tekrarlarının olmaması gerektiğini öne sürmüştür [1]. Bu sebeple optimizasyon yazılımımızda hesap yapılan her oda için özellikle düşük frekanslarda (ilk 100 modda) hiç mod tekrarı olmaması koşulu tanımlandı.

3.5. Kriter 5: Mod Frekansı Aralıkları

Oktav bant ve 1/3 oktav bant aralıklarında alt ve üst sınırların aralığının alt frekanslarda yüksek frekanslara göre daha dar olması sebebiyle mod sayısı frekans yükseldikçe artsa da alt ve orta frekanslarda sayıca fazla mod olması odanın bu frekans bantlarında daha baskın bir karaktere sahip olmasına sebep olmaktadır [1]. Bu sebeple özellikle optimizasyon yazılımımız ile analizini yapmış olduğumuz 500 Hz merkez frekanslı oktav bandına kadar mod frekans aralığının, $\Delta f = 2,2/T$, koşulunu sağlaması şartı ile uygun oda boyutları seçildi.

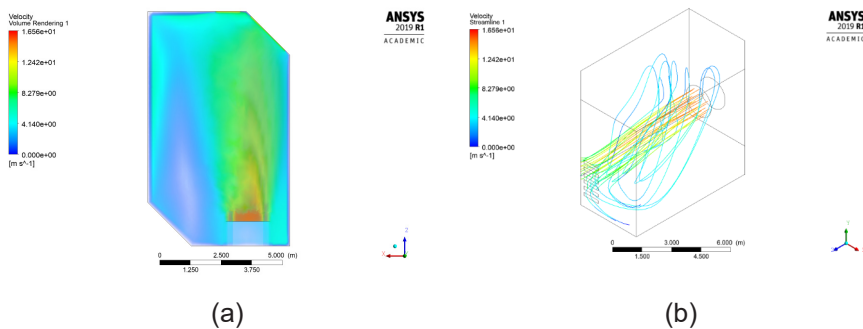
4. SONUÇ

Değerlendirilen 13830 oda içinden optimum iç hacim boyutlarına sahip olanı belirlendi. Çınlama odası nihai tasarımı hazırlanan üç boyutlu çizim ile tamamlandı. Oda akustik karakteri ANSYS yazılımında yapılan akustik modal analiz ile belirlendi.



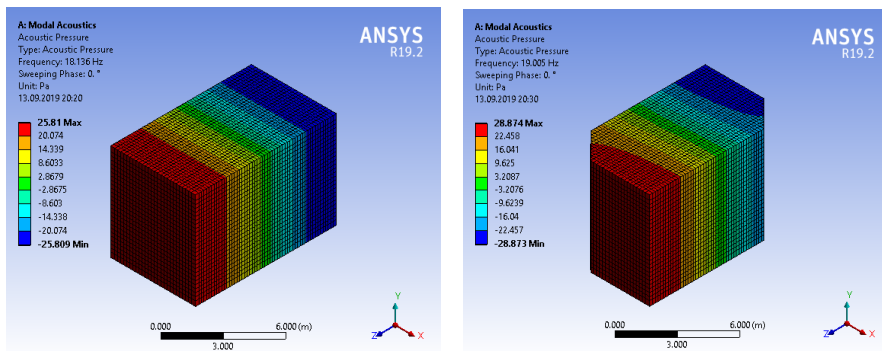
Şekil 1. Yazılım ile hesaplanan boyutlar için hacmin mod dağılımı

Oda modlarının geliştirdiğimiz yazılım tarafından doğru bir biçimde hesaplandığı ANSYS'ten elde edilen oda modlarına karşılık gelen doğal frekanslar ile karşılaştırılarak doğrulandı. Bonello'nun ilk kıstası gereği akustik mod dağılımı eğrisi hesaplanan optimum boyutlara sahip hacim için Şekil 1'de gösterildiği üzere monotonik artmaktadır.

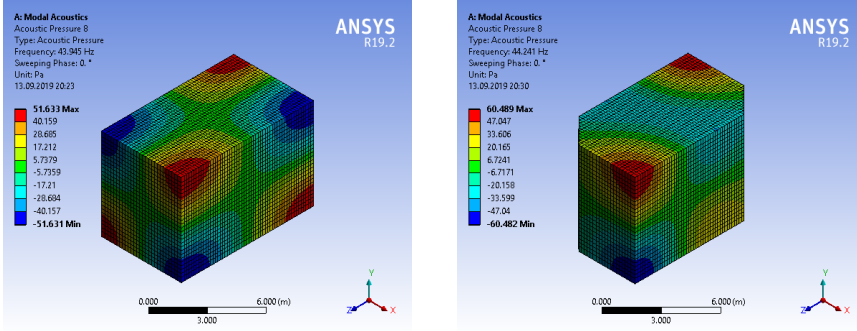


Şekil 2. Fan testleri için tasarlanan çınlama odası içerisinde hava akış analizi sonuçları
(a) üstten kontur gösterimi, (b) izometrik akış çizgisi gösterimi

Oda geometrisinde menfez, kapı yerleşimi gibi nedenlerle yapılan zorunlu değişikliklerin içerideki hava akışına etkileri ANSYS'te yapılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) analizleri ile değerlendirildi. Çınlama odası içerisindeki hava akış hızları dikkate alınarak hava atış menfezi yerleşimi ve boyutları tasarlandı. Akışın belirlenen mikrofon konumunda minimum türbülans ve hızlara sahip olduğu durum için oda geometrisine, menfez genişliğine ve konumuna karar verildi (Şekil 2). Akustik hacmin modal karakterinin oda sınırlayıcı boyutları değişmediği sürece muhafaza edildiği ise ANSYS'te yapılan sonlu elemanlar analizi ile gösterilmiştir (Şekil 3).



(a) Eksenel bir mod için oda geometrisinde değişimin etkisi



(b) Eğik bir mod için oda geometrisinde değişimin etkisi

Şekil 3. Oda şeklinde köşe noktalarında yapılan değişikliğin basınç dağılımında katkısı

Fanların gürültü ölçümü için optimum akustiğe sahip bir çınlama odası bu bildiriye tarif edilen yöntem ile tasarlandı. Bu laboratuvarıda fanların akustik ölçümlerinin uluslararası standartlarda tarif edildiği şekilde güvenilir, tekrarlanabilir ve tekrar üretilebilir biçimde yapılacağı öngörülmektedir.

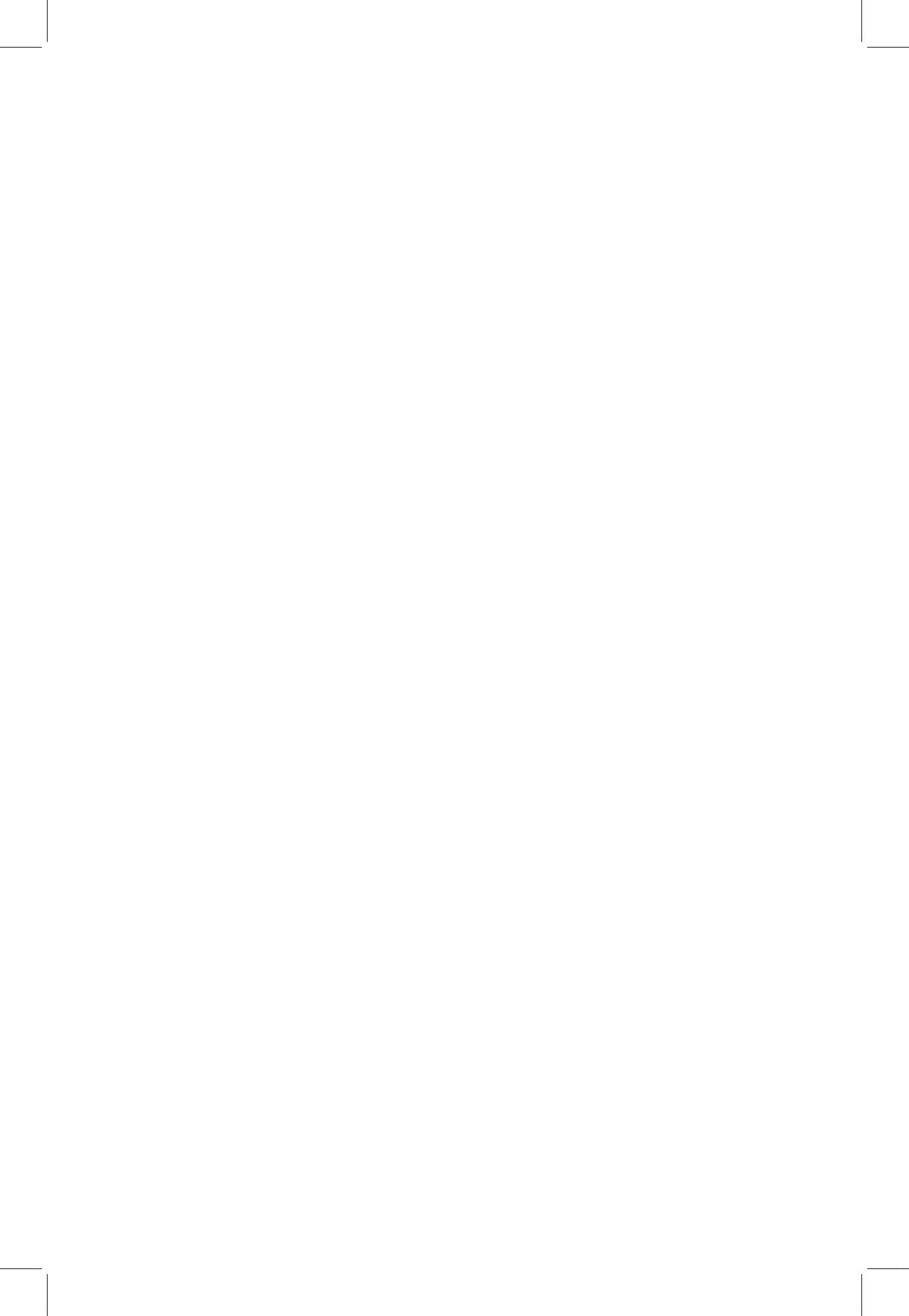
Literatürde benzer bir optimizasyon çalışmasına rastlanmamıştır. Yazılan kodun açık kaynaklı Octave GNU ile oluşturulmuş olması ise bu algoritmanın ihtiyaç duyulması halinde MATLAB, SCILAB gibi farklı sayısal hesaplama platformlarına da kolayca uyarlanabilmesine imkân tanımaktadır.

4. TEŞEKKÜR

Bu çalışma Aironn Havalandırma San. A.Ş. öz kaynakları ile finanse edilen bir Ar-Ge projesi olarak tamamlanmıştır. Bu çalışmaya olan katkıları ve destekleri sebebiyle kendilerine teşekkürlerimizi sunarız.

5. KAYNAKLAR

- [1] Bonello, O.J., A New Criterion for the Distribution of Normal Room Modes, J. Audio Eng. Soc., Vol. 29, No. 9, 1981.
- [2] Kuttruff, H., Room Acoustics 5th Ed., Spon Press, USA, 2009.
- [3] Sen, S., Kumar, A., Optimization I: Brute Force and Greedy Strategy. In **Design** and Analysis of Algorithms: A Contemporary Perspective, Cambridge University Press, pp.54-91, 2019.
- [4] ANSI/AMCA Standard 300-14, Reverberant Room Methods for Sound Testing of Fans, 2014.
- [5] TS EN ISO 3741:2010, Acoustics – Determination of Sound Power Levels and Sound Energy Levels of Noise Sources using Sound Pressure – Precision Methods for Reverberation Test Rooms, 2010.
- [6] Bies, D.A., Hansen, C.H., Engineering Noise Control: Theory and Practice 3rd Ed., Spon Press, UK, 2005.



AKUSTİK TEST ODALARINDA K_2 ÇEVRESEL DÜZELTME DEĞERİNİN BELİRLENMESİ

Cafer Kırbas

TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, Gebze, Kocaeli, Türkiye
e-posta: cafer.kirbas@tubitak.gov.tr

Eyüp Bilgiç

TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, Gebze, Kocaeli, Türkiye
eyup.bilgic@tubitak.gov.tr

Enver Sadıkoğlu

TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, Gebze, Kocaeli, Türkiye
enver.sadikoglu@tubitak.gov.tr

ÖZET

Ses gücü düzeyi, gürültü kaynağının ses çıkarma kapasitesini tanımlayan büyüklüktür. Türkiye ve Avrupa Birliği yönetmeliklerine göre üreticiler ürettikleri cihazların ses gücü düzeyi deklarasyonunu yapmakla zorunludur. Yönetmeliklerde atıf yapılan ISO 3744 ve 3746 standartları ses gücü düzeyi belirlenmesinde en yaygın olarak kullanılanlardır. Bu standartlara göre ses gücü belirlenmesine yönelik ölçümler ya açık alanlar veya özel akustik odalarda gerçekleştirilmektedir. Standartlar içerisinde test alanı ortamının, belirlenen ses gücü düzeyi üzerindeki etkisi çevresel düzeltme (K_2) tanımlanmakta olup, K_2 akustik oda içerisinde belirlenen ses gücü düzeyi değerlerine düzeltme olarak eklenmektedir. Bu nedenle K_2 değerinin yüksek doğrulukla belirlenmesi ses gücü düzeyi değeri deklarasyonu beyanı için oldukça önemlidir. Bu çalışmada K_2 çevresel düzeltme değerinin ISO 3744 standardında tarif edilen farklı yöntemlere göre ölçülmesi ve farklı özellikteki akustik odalar içerisinde ölçülen K_2 çevresel düzeltme sonuçları raporlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: K_2 Çevresel Düzeltme, Ses Gücü Düzeyi, Akustik Test Odası

DETERMINATION OF K_2 ENVIROMENTAL CORRECTION IN ACOUSTIC TEST ROOMS

ABSTRACT

Sound power level is a quantity characterizing the emission of a sound source. According to the directives in Turkey and European Union, the manufacturers shall declare the sound power level of their products. As it is described in the directives ISO 3744 and 3746 standarts are two of many others, which are used widely in the determination of sound power levels of devices. According to them, the sound power level determination shall be carried out in either Acoustic Test Rooms or open acoustic field environments. The effect of test environment on the determination of sound power level is defined as the environmental correction factor (K_2) which is used as a correction in the calculation of sound power level. This makes very important the measurement of K_2 factor precisely in the declaration of sound power level. This paper summarizes measurement results for K_2 by using different methods as described in ISO 3744 standard as well as analyzes variance of K_2 for different type acoustic test rooms.

Keywords: K_2 Environmental Correction, Sound Power Level, Acoustic Test Room.

1. GİRİŞ

Ses gücü, ses kaynağını karakterize eden bir büyüklüktür ve tamamıyla ses kaynağının özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle üreticiler ürünlerinin ses gücü düzeyi değerini deklare etmekle yükümlüdür. Üreticiler bu kapsamda ürünlerini kendi laboratuvarlarında veya başka laboratuvarlarda ses gücü düzeyi belirlenmesi deneyleri gerçekleştirerek, ürünlerinin ses gücü düzeyi değerlerini belirlerler. Gerçekleştirilen deneyler ile ilgili, ürünlerine yönelik çeşitli standartlar bulunmasının yanı sıra genelde ses gücü düzeyi belirlenmesi ölçümleri ISO 3745 [1] ve ISO 3744 [2] standardı referans verilerek gerçekleştirilmektedir. ISO 3745 standardı ses gücü belirlenmesine yönelik en yüksek doğrulukta ölçümlerin yapıldığı standarttır. Bu standart kapsamında odanın tam yansısız veya yarı yansısız özellikte olması istenmektedir. Diğer bir ifadeyle yöntemin icra edilmesi için ters kare yasaasının geçerli olduğu ortamın sağlanması gerekmektedir. Oda iç yüzeylerinde bulunan yutucular sayesinde oda yüzeylerinde ses yansımaları ihmal edilecek seviyededir. ISO 3744 standardı içerisinde tanımlanan test odaları ses gücü düzeyi belirlenmesi ölçümlerinin ISO 3745 standardına göre daha az doğrulukta gerçekleştirildiği ortamlardır. ISO 3744 standardına göre deney odası iç yüzeylerinin yüksek yutuculuğa sahip olması gerekmemesi nedeniyle daha az maliyetle deney ortamları sağlanabilmektedir. ISO 3744 standardına göre deney ortamının bazı parametrelerinin standart gereksinimlerini sağlaması gerekmektedir. Bu gereksinimlerden en önemli olanlarından biri çevresel düzeltme olarak adlandırılan K_2 düzeltme değeridir. K_2 düzeltmesi deney ortamındaki yansılardan kaynaklı çevresel etkilerden dolayı deney ortamı kalitesini veya serbest alan koşulundan sapmasını belirleyen bir büyüklüktür. Ayrıca K_2 düzeltmesi deney odası içerisindeki yüzeylerden olan ses yansımalarının etkisinin ses gücü düzeyi üzerindeki değerini ifade etmektedir. Standartlar K_2 düzeltmesi için sınırlamalar getirmiştir ve ses gücü düzeyi belirlemesinin gerçekleştirildiği deney ortamlarının belirlenen sınırlamalar içerisinde kalması zorunluluğu bulunmaktadır. K_2 düzeltmesi deney ortamında ses gücü düzeyi belirlenmesi deneyinin gerçekleştirildiği ölçüm yüzeyi ve ortamın yutuculuğuna bağlı olarak değişen bir parametredir.

Üreticilerin ürünlerinin ses gücü düzeyi deklarasyonundaki beyanları ile ilgili yönetmelikler herhangi bir sınırlama getirmemektedir. Üreticiler sadece ürünün ses gücü değerinin deklarasyonu ile yükümlüdür. Ölçüm bilimi açısından bakıldığında belirlenen ses gücü değerinin belirsizliği önemlidir. Standartların ifade ettiği K_2 düzeltmesindeki kabul edilebilir sınır 7 dB seviyesine kadar ulaşabilmektedir. Bu aynı zamanda K_2 düzeltmesinin ölçülen ses gücü düzeyi değerindeki belirsizliğe olan katkısını belirlemektedir. Bu anlamda K_2

düzeltilmesinin yüksek doğrulukta belirlenmesi ve ses gücü belirsizliğine olan katkısının minimum seviyede olması büyük önem arz etmektedir.

K_2 düzeltilmesinin ISO 3744 standardına göre ses gücü düzeyi belirlenmesi ölçümlerinin gerçekleştirildiği deney ortamlarında belirlenmesine yönelik yöntemler yine ISO 3744 standardı içerisinde verilmiştir.

Bu bildiriye K_2 düzeltilmesinin ölçüm yöntemlerinden ve bazı deney ortamlarında gerçekleştirilen K_2 düzeltilmesi ölçüm ortamına göre olan değişkenliğinden ve K_2 düzeltilme değerinin ölçüm belirsizliği üzerinde sonuçlar raporlanmış ve bu etkiler tartışılmıştır.

2. K_2 ÇEVRESEL DÜZELTME DEĞERİ

ISO 3744 standardında çevresel düzeltilme değerinin belirlenmesine yönelik yöntemler tarif edilmiştir. Bu yöntemler test ortamının yapısına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Yöntemler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Mutlak karşılaştırma yöntemi,
- Oda yutuculuğu üzerinden hesaplama yöntemi,
- İki farklı ölçümü yüzeyi üzerinde gerçekleştirilen ses basınç düzeyi ölçümleri üzerinden hesaplama yöntemi,
- Ortam yutuculuğunun teorik yaklaşımlar üzerinden belirlenmesi.

Yukarıda çevresel düzeltilme için kullanılan yöntemler test alanı ortamına bağlı olarak değişmektedir. Mutlak karşılaştırma yönteminde Referans Ses Kaynakları (RSS) [3] kullanılarak ses gücü düzeyi belirlenmesi ölçümleri, daha çok oda içerisinde ölçüm yapılan ses kaynağının, oda içerisinde çıkarılabildiği ve yerine referans ses kaynaklarının konulabildiği durumlarda kullanılmaktadır. Oda yutuculuğu üzerinden hesaplama yöntemi tam yansısız oda özelliği veya dış ortam gibi yüzeylerden yansımaların olmadığı ortamlar için geçerli değildir. Dolayısıyla yukarıda kullanılan yöntemler çok kesin kurallar olmamasına karşın test ortamı dikkate alınarak seçilmektedir.

2.1. Mutlak Karşılaştırma Yöntemi

Tam yansısız, oda koşullarında yüzeylerden yansıma olmaması için oda yüzeylerinde % 99 yutuculuğa sahip ses yutucu yüzey oluşturulmaktadır. Bu yüzeylerden olan yansımaları ihmal edilebilir seviyeye getirmektedir. Bu nedenle çevresel düzeltilme değeri tam yansısız akustik odalarda sıfır olarak kabul edilmektedir. Referans Ses Kaynaklarının (RSS) kalibrasyonu ISO 6926 [3] standardına göre ISO 3745 standardı gereksinimlerinin sağlandığı ($K_2=0$)

tam yansız oda içerisinde yapılmaktadır [4]. Ses gücü düzeyi sertifikalandırılmış referans ses kaynağının, çevresel düzeltme değerinin belirleneceği test ortamı içerisinde ISO 3744 standardının gereksinimleri sağlanacak şekilde ses gücü düzeyi belirlenmesi ölçümleri gerçekleştirilir. Referans ses kaynağının, kalibrasyon sertifikasındaki ve test ortamı içerisinde belirlenen ses gücü düzeylerinin karşılaştırılması sonucu çevresel düzeltmesi Denklem (1) kullanılarak mutlak olarak belirlenmektedir.

$$K_2 = L_w^* - L_{w(RSS)} \quad (1)$$

Bu denklemde,

L_w^* : Test ortamında ölçülen RSS'nin ses gücü düzeyi,

$L_{w(RSS)}$: Test ortam şartlarına göre düzeltmesi yapılmış, serbest ortam koşulları altında ölçülen RSS'nin ses gücü düzeyidir.

Mutlak karşılaştırma yöntemi içerisinde ses gücü düzeyi belirlenmesi ölçümlerinde referans ses kaynağı test odası içerisinde ölçümü yapılan ses kaynağı konumu ile aynı noktaya konumlandırılmaktadır. Test Odası içerisinde ölçümü yapılan ses kaynaklarının boyutuna göre referans ses kaynağının konum sayısı değişkenlik göstermektedir.

- Ses kaynağı boyutları l_1, l_2, l_3 $l_1, l_2, l_3 < 2$ m'den büyük olduğu durumlarda referans ses kaynağının tek ölçüm noktasında,
- Ses kaynağı boyutları l_1, l_2, l_3 $l_1, l_2, l_3 > 2$ m'den küçük olduğu durumlarda referans ses kaynağının dört farklı ölçüm noktasında,

konumlandırılarak ölçümler gerçekleştirilir. Dört ölçüm noktası kullanılarak yapılacak ölçümlerde, test odası içerisinde ölçümü yapılacak ses kaynağı için oluşturulan ölçüm yüzeyi iz düşümü ile oluşan dörtgen yüzeyi kenarlarının orta noktalarına referans ses kaynağı yerleştirilerek ölçümler yapılır. Referans ses kaynağı kullanılarak, oluşturulan ölçüm yüzeyi üzerindeki ölçülen ses basınç düzeyi değerlerinin ortalamaları alınarak ses gücü düzeyi hesaplanır. Belirlenen ses gücü düzeyi değeri Denklem (1) içerisinde kullanılarak K_2 düzeltme değeri hesaplanır.

2.2. Oda Yutuculuğu Kullanılarak K_2 Düzeltmesinin Belirlenmesi Yöntemi

Bu yöntemin uygulamasında test odasının geometrisi belirli bir yapıda olmalıdır. Odanın yüksekliği, odanın en ve boy uzunluklarının her birinin 3 katından daha az olmalıdır. Bu koşulların sağlanması durumunda oda içerisinde çınlanım süresi ölçümleri gerçekleştirilerek odanın yutuculuğu belirlenmek-

tedir. Denklem (2) kullanılarak K_2 hesaplanmaktadır.

$$K_2 = 10 \log \left(1 + 4 \frac{S}{A} \right) K_2 = 10 \log \left(1 + 4 \frac{S}{A} \right) = 10 \log \left(1 + 0,64 \frac{S.T}{V} \right) 10 \log \left(1 + 0,64 \frac{S.T}{V} \right) \quad (2)$$

S : Odanın toplam iç yüzey alanı, m^2

V : Odanın Hacmi, m^3

T : Oda içerisinde ölçülen çınlanım süresi, s

2.3. İki Farklı Ölçüm Yüzeyi Üzerinden K_2 Düzeltmesinin Belirlenmesi Yöntemi

Bu yöntemin kullanılabilmesi için oda, yüksekliğinin oda genişliği ve uzunluğunun üç katından küçük olması gerekliliği bulunmaktadır. Bu yöntemde ses gücü belirlenmesi ölçümleri oda içerisinde test edilen ses kaynağı sırasıyla iki farklı ölçümü yüzeyi S_0 ve S_1 kullanılarak gerçekleştirilir. Yöntemde S_0 ve S_1 yüzeyi üzerinde mikrofonların aynı konumlarda konumlandırılması gerekmektedir ayrıca S_1/S_0 oranının en az 2 ve tercihen 4 olması zorunluluğu bulunmaktadır. K_2 düzeltmesinin hesaplanması için Denklem (2)'de verilen S/A oranı ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\frac{S}{A} = \frac{\left(1 - M \frac{S_0}{S_1} \right)}{4(M - 1)} \quad (3)$$

Burada $M = 10^{\left(\frac{L_{p0} - L_{p1}}{10} \right)}$ ifadesi kullanılarak hesaplanmaktadır.

$L_{p0}L_{p0}$: S_0S_0 yüzeyi üzerinde ölçülen ortalama ses basınç düzeyi, dB ref. 20 μ Pa

$L_{p1}L_{p1}$: S_1S_1 yüzeyi üzerinde ölçülen ortalama ses basınç düzeyi, dB ref. 20 μ Pa

V : Odanın Hacmi, m^3

T : Oda içerisinde ölçülen çınlanım süresi, s

2.4. Ortam Yutuculuğunun Teorik Yaklaşımla Belirlenmesi

Bu yöntem kullanılarak odanın ses yutumu teorik yaklaşımla hesaplanır. Oda içerisinde olası ses yutucu malzemelerin ses yutma katsayısı değeri ISO 3744 standardında Tablo A.1'de verilmektedir. Tablo A.1'den oda içerisinde bulunan malzemelerin ses yutma katsayısı değerleri bulunarak Denklem (4) üzerinden odanın ses yutumu hesaplanır.

$$A = \alpha S_V \quad (4)$$

α : ISO 3744 Tablo A.1'de tanımlanan ses yutma katsayısı

S_V : Test odası toplam iç yüzey alanı, m²

Hesaplanan ses yutumu değeri (A) Denklem (2)'de yerine konularak K_2 düzeltme değeri hesaplanır.

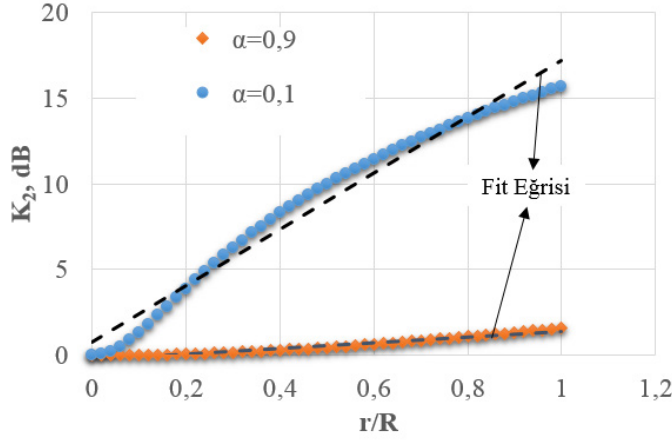
3. K_2 DÜZELTMESİ ÖLÇÜMLERİ

3.1. Teorik K_2 Düzeltmesi

K_2 düzeltmesinin ölçüm yüzeyine göre ve ortamın ses yutma katsayısına göre değişimi Denklem (5)'de ideal koşullar için verilmektedir [5].

$$K_2 = 10 \log \left(1 + \left(4 \left(\frac{r}{R} \right)^2 \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) \right) \right) \quad (5)$$

Şekil 1'de test ortamı yüzeylerinin ses yutma katsayısının 0,1 ve 0,9 olması durumunda K_2 düzeltmesini ölçüm yüzeyi oranına göre göre değişimi verilmektedir. r oluşturulan ölçüm yüzeyi yarıçapı, R ise odayı oluşturan ölçüm yüzeyi yarıçapıdır. Ses yutma katsayısı α , R yarıçapı ile belirlenen deney ortamını çevreleyen yüzeyin ses yutma katsayısıdır. Şekil 1'deki grafikten görüldüğü üzere $\alpha=0,9$ için ölçümlerin gerçekleştirildiği ölçüm yüzeyi ile K_2 düzeltmesinin ölçüm yüzeyine göre (oda yüzeyi alanı sabit tutulduğunda) yaklaşık olarak doğru orantılı arttığı görülmektedir. Şekil 1'deki grafikten K_2 düzeltmesi farklı özellikteki deney odalarında farklı ölçüm yüzeylerine göre değişiklik gösterdiği anlaşılmaktadır. Deney odası ortam yüzeyinin % 90 yutuculuğa sahip olması durumunda K_2 düzeltmesindeki değişimin küçük olduğu, ortamın yutuculuğunun düşmesi durumunda K_2 düzeltmesinin anlamlı derecede yükseldiği görülmektedir.



Şekil 1. K_2 düzeltmesinin teorik değişimi

3.2. K_2 Düzeltmesinin Farklı Deney Ortamlarında Ölçümü

K_2 düzeltme değerinin belirlenmesindeki mutlak karşılaştırma yöntemi diğer yöntemlere göre doğruluğu daha yüksek bir yöntemdir. Değeri bilinen referans ses kaynağının test odası içerisinde ses gücü düzeyinin belirlenmesiyle yöntem içerisinde ses gücü düzeyine etkiyen bütün etkiler hesaba katılmaktadır. Ölçüm yüzeyi, ölçüm noktası, oda iç yüzey yutumları ve mikrofon konumları gibi etkiler test odasındaki ses gücü düzeyi belirlenmesi hesabına dahil edilerek K_2 düzeltmesi belirlenmektedir. Diğer taraftan oda yutuculuğu üzerinden K_2 değerinin belirlenmesi yönteminde ses kaynağı konumu, mikrofon konumu ve ölçüm yüzeyi etkilerinin katkısı belirlenmemektedir. Bu nedenle mutlak karşılaştırma yöntemi K_2 belirlenmesinde en uygun ve standardın tercih nedeni olan yöntemdir.

Bu çalışmada K_2 düzeltme değeri, farklı boyut ve hacimlerde iç yüzeyleri yutucu malzeme ile kaplı test ortamlarında belirlenmiştir. Ölçümlerde standardın tavsiye ettiği mutlak karşılaştırma yöntemi kullanılarak K_2 düzeltme değeri belirlenmiştir. Test odasında gerçekleştirilen ölçümler öncesi serbest alan koşullarının sağlandığı yarı yansısız oda içerisinde ISO 6926 ve ISO 3745 standardına göre referans ses kaynağının kalibrasyonu gerçekleştirilerek ses gücü değeri frekansa göre belirlenmiştir. Referans ses kaynağı test odaları içerisinde ISO 3744 standardına göre ses gücü düzeyi belirlenerek, mutlak karşılaştırma yöntemi ile K_2 düzeltme değerleri hesaplanmıştır.

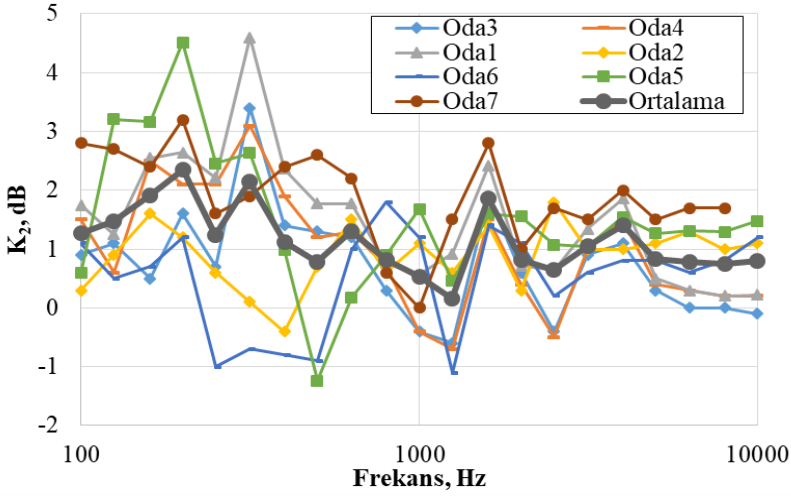
K_2 düzeltmesi belirlenmesine yönelik ölçümler Tablo 1'de verilen farklı odalarda gerçekleştirilmiştir. Odaların boyutları, hacimleri, ölçüm yüzeyi ve

alanı, ölçüm mesafesi odaya göre değişkenlik göstermesi nedeniyle K_2 düzeltme değerinin ölçülmesinde farklı ölçüm yüzeyleri kullanılmıştır. Ayrıca ISO 3744 standardının isteri doğrultusunda oda içerisinde test nesnesinin yerleşimi de dikkate alınarak ölçüm düzenekleri veya ölçüm yüzeyi ve bununla birlikte ölçüm noktaları belirlenmiştir. Tüm ölçümlerde bütün ölçüm yüzeyleri paralel kenarlı dikdörtgen yüzey olarak seçilmiştir.

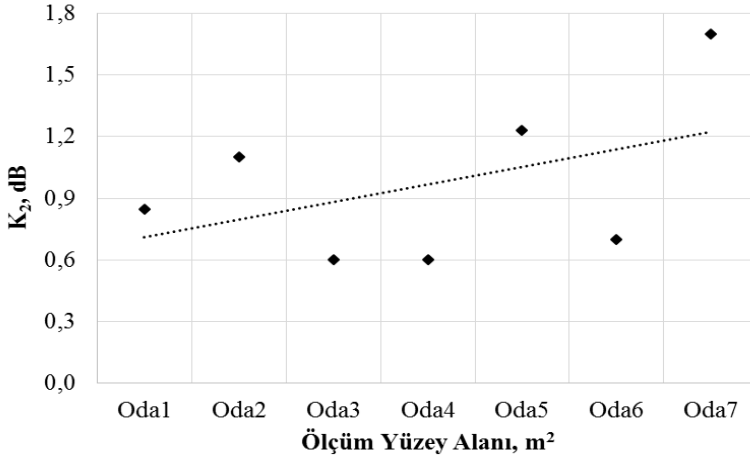
Tablo 1. Test Odaları Özellikleri

Test Odası	Oda Boyutları m	Oda Hacmi m ³	Ölçüm Yüzeyi Boyutları, m	Ölçüm Mesafesi m	Ölçüm Yüzey Alanı m ²	Yansıtıcı Yüzey Sayısı
Oda 1	2,2 x 3,1 x 2,2	15	1,3 x 1,3 x 0,9	0,5	6,4	1
Oda 2	2,7 x 3,2 x 2,5	22	1,3 x 1,3 x 0,9	0,7	6,4	1
Oda 3	4,0 x 3,0 x 2,5	30	1,3 x 1,3 x 0,9	0,5	6,4	1
Oda 4	4,0 x 3,1 x 2,7	35	2,0 x 2,0 x 1,3	0,9	14,4	1
Oda 5	4,9 x 2,7 x 3,7	49	1,7 x 2,9 x 3,1	1,0	24,5	2
Oda 6	6,0 x 5,0 x 3,0	89	3,0 x 3,0 x 2,0	1,0	33,0	1
Oda 7	7,8 x 4,8 x 5,0	185	2,6 x 4,0 x 2,5	1,0	43,4	1

Farklı odalarda gerçekleştirilen K_2 düzeltmesi belirlenmesi ölçüm sonuçları Şekil 2’de sunulmuştur. Şekil 2’den görüldüğü üzere K_2 değeri düşük frekans bölgesinde, yüksek frekans bölgesine göre daha fazla saçılım göstermektedir. 1 kHz frekans altında yaklaşık 2 dB bir değişim varken, 200 Hz - 800 Hz frekans bölgesinde değişim 4 dB seviyesine kadar çıkmaktadır. 200 Hz altında K_2 düzeltme değerindeki değişimlerin 1 dB seviyesine kadar düştüğü gözlenmektedir. 200 Hz – 800 Hz frekans aralığında K_2 düzeltme değerindeki saçılımının büyük olması oda boyutlarının rezonans dağılımından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ses gücü belirlenmesi ölçümlerinde seçilen ölçüm yüzey alanının K_2 düzeltmesi üzerindeki etkisi incelenmiş ve sonuçlar Şekil 3’te sunulmuştur. Şekil 3’teki çizgisel eğri ölçüm verilerinin eğimini vermektedir. Eğimden anlaşıldığı üzere K_2 düzeltme değeri ölçüm yüzeyi ile doğrusal bir davranış göstermektedir. Bu da Şekil 1’deki teorik eğri ile uyum içerisinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. K_2 düzeltme değerinin oda özelliklerine göre değişimi



Şekil 3. K_2 düzeltme değerinin test odası içerisinde kullanılan ölçüm yüzey alanına göre değişimi

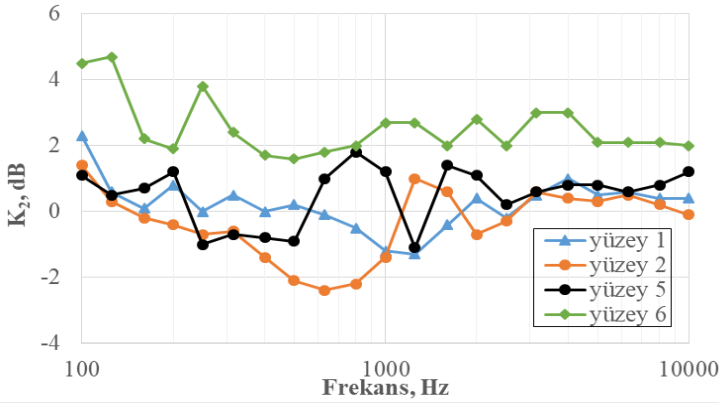
Şekil 2'te verilen değerler birbirinden farklı yutuculuk özelliklerine sahip farklı boyutlardaki test odaları için geçerlidir ve sistematik bir davranış yoktur ve K_2 düzeltme değerinin farklı özellikteki odalar için davranışını göstermektedir. K_2 düzeltme değerinin farklı ölçüm yüzeyleri için frekansa göre değişimi daha açık bir şekilde anlayabilmek için ölçümler aynı test odası (Oda 6) içerisinde farklı ölçüm yüzeyleri kullanılarak farklı zamanlarda gerçekleştirilmiştir ve bazı ölçüm yüzeyleri için ölçümler tekrarlanmıştır. Ölçüm yüzeyi, mikro-

fon sayısı ve ölçüm mesafesi bilgileri Tablo 2’de verilmektedir. Şekil 4’te Oda 6 içerisinde farklı ölçüm yüzeyleri kullanılarak tekrarlı ölçümlerden elde edilen sonuçlara göre K_2 düzeltme değerinin frekansa göre değişimi verilmektedir. Şekil 4’te görüldüğü üzere ölçüm yüzeyinde yansıtıcı yüzey sayısının artırılması K_2 düzeltme değerini artırdığı sonucuna varılmaktadır. Yansıtıcı yüzey sayısını artırılması yüzey yutuculuğunun düşürülmesi anlamına geldiği için bu beklenen bir durumdur. Şekil 1’deki K_2 düzeltme teorik eğrisinde de verildiği üzere oda yüzeylerindeki yutuculuğunun azalması K_2 düzeltme değerini artırmaktadır.

Tablo 2. Ölçümlerde kullanılan yüzey ve mikrofon bilgisi

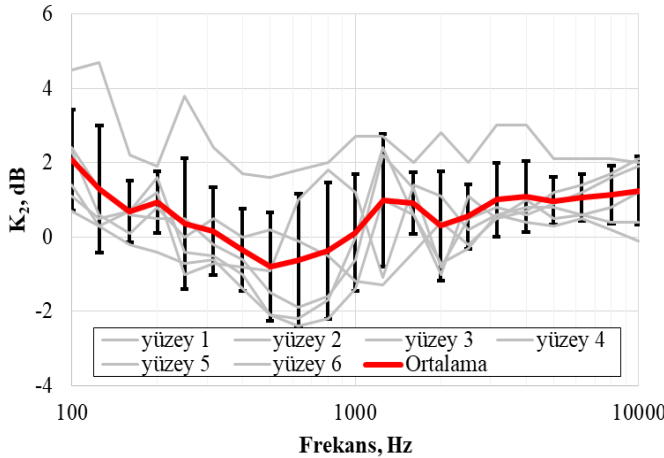
Yüzey	Boyutlar (Uzunluk x Genişlik x Yükseklik) m	Yüzey Tipi	Mikrofon Sayısı	Ölçüm Mesafesi m	Yansıtıcı Yüzey Sayısı	Yüzey Alanı m ²
Yüzey 1	yarı çap 1,5	Yarım Küre	10	1.5	1	14,1
Yüzey 2	2,3 x 2,3 x 1,4	Dikdörtgen	9	1,0	1	18,2
Yüzey 3	3,0 x 3,0 x 2,0	Dikdörtgen	9	1.3	1	33,0
Yüzey 4	2,3 x 2,3 x 1,4	Dikdörtgen	9	1,0	1	18,2
Yüzey 5	3,0 x 3,0 x 2,0	Dikdörtgen	9	1,0	1	33,0
Yüzey 6	2,8 x 1,6 x 2,2	Dikdörtgen	9	1,0	2	18,3

Test odası içerisindeki toplam yutucu yüzey alanı sabit iken ölçüm yüzey alanının artırılmasının K_2 düzeltme değeri üzerinde belirgin bir artışa neden olduğu Şekil 4’te kesin olarak gözükmemesine rağmen 630 Hz – 2000 Hz aralığında bir artış gözükmektedir. Şekil 2’te ölçüm yüzey alanının K_2 düzeltmesi ile doğru orantılı olarak artış yaptığını toplam K_2 düzeltme değeri de desteklemektedir. Ayrıca yarım küre yüzey alanının dikdörtgen yüzey alanına göre kullanımının K_2 düzeltme değeri üzerindeki etkisi de Şekil 4’te görülebilmektedir. Yarım küre yüzey alanı kullanımı merkezde bulunan ses kaynağının ürettiği sesin yayılımı açısından daha ideal bir durum oluşturmaktadır. Şekil 4’te bu durum görülebilmektedir. Yarım küre yüzey kullanımının K_2 düzeltmesinin frekansa göre değişimini dikdörtgen yüzey kullanımına göre daha az değişkenliği olduğu söylenebilir.



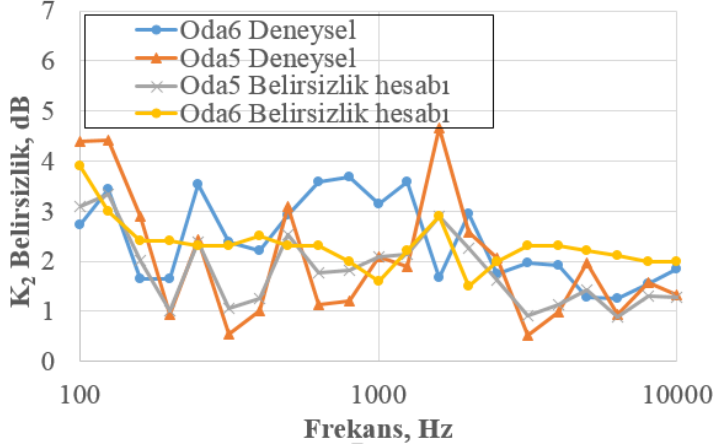
Şekil 4. Tablo 2'de verilen yüzey tiplerine göre K_2 'deki değişim

Aynı ortamda (Oda 6) farklı zamanlarda farklı yüzey alanları kullanılarak gerçekleştirilen ölçümler sonucunda elde edilen K_2 düzeltme değerlerinin saçılımı Şekil 5'te göstermektedir. Şekil 5'teki veriler K_2 düzeltmesinin belirsizliğine bir örnektir. Ölçümler farklı zamanlarda, farklı kişiler tarafından farklı ekipmanlar ve farklı ölçüm yüzeyleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test odası içerisindeki K_2 düzeltme değerinin belirlenmesinde gerçekleştirilen K_2 düzeltme değerinin belirsizliği Şekil 5'teki verilerin saçılımdan elde edilebilmektedir. Şekil 5'te verilen belirsizlik değerleri hata çubukları ile gösterilmektedir.



Şekil 5. Aynı test ortamında farklı zamanlarda, farklı yüzeyler kullanılarak gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen K_2 düzeltmesindeki belirsizlik değerleri

Oda 5 içerisinde de farklı ölçüm yüzeyleri kullanılarak K_2 düzeltme değeri belirleme ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen ölçüm sonuçlarının standart sapması alınarak belirsizlik değeri deneysel olarak belirlenmiştir.



Şekil 6. K_2 düzeltmesinin ölçüm yüzeyine göre belirsizlik değerleri

Oda 5 ve Oda 6 içerisinde gerçekleştirilen K_2 düzeltme değerinin belirlenmesi ölçümleri sonucunda ölçümlerin standart sapması alınarak elde edilen ölçüm belirsizlikleri Şekil 6'da verilmektedir. K_2 düzeltme değeri için ayrıca GUM [6] dokümanına göre belirsizlik bütçesi oluşturularak ve belirsizlik hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da Oda 5 ve Oda 6 içerisinde gerçekleştirilen ölçümler sonucunda hesaplanmış ve deneysel olarak standart sapma üzerinden belirlenen belirsizlik değerleri karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Şekil 6'da görüldüğü üzere K_2 'nin düşük frekanslardaki belirsizlik değerinin daha yüksek olduğu görülmektedir.

4. SONUÇ

K_2 düzeltmesinin belirlenmesi ölçümleri üzerinde farklı test ortamlarının etkileri bu çalışma içerisinde yapılan ölçümlerle araştırılmıştır. K_2 düzeltme değerinin ölçüm yüzey alanı, test ortamının yutuculuğu üzerinden etkilendiği yapılan deney sonuçlarında gözlenmiştir. Elde edilen deney sonuçlarının K_2 düzeltme değeri teorik eğrisi ile aynı davranışları sergilediği sonucuna varılmıştır. K_2 düzeltme değerinin belirlenmesi ölçümlerinde ses kaynağının, ölçüm mikrofonlarının ve ölçüm yüzeyinin yerleşiminin K_2 düzeltme değeri üzerindeki etkisi ve belirsizlik değeri, farklı ölçüm yüzeyleri, farklı test ortamlarında yapılan tekrarlı ölçümlerle deneysel olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, K_2 düzeltme değeri için ses gücü düzeyi farkı model fonksi-

yonu üzerinden hesaplanan belirsizlik değerleri ile uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Farklı test ortamlarında elde edilen sonuçlarda K_2 düzeltmesinin frekansa göre değişiminde en yüksek 5 dB seviyelerine çıktığı ve bazı ölçümler için değerlerin negatif olduğu gözlenmiştir. K_2 değerlerinin negatif olması beklenen bir durum değildir. K_2 düzeltmesinin teorik sonuçlarla tam uyumlu çıkması için test ortamlarının ideal ortamlara yakın tasarlanması gerekmektedir. Test odalarının dikdörtgen yapıda olması oda içerisinde istenmeyen rezonanslar oluşturabilmekte ve bu rezonanslar oda içerisinde gerçekleştirilen ses gücü düzeyi belirlenmesindeki ölçüm yüzeyi üzerinde ses basınç düzeyi ölçümlerinin gerçekleştirildiği mikrofon konumlarında negatif etkilere neden olduğu ve bununda K_2 çevresel düzeltmesi beklenmedik negatif değerlerin elde edilmesine yol açmaktadır. Test odalarının tasarlanırken oda rezonanslarının özellikle ölçümlerin gerçekleştirildiği alan içerisinde minimum olacak şekilde tasarlanması gerekmektedir.

5. KAYNAKLAR

- [1] ISO 3745:2012+A1:2017, Acoustics. Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure. Precision methods for anechoic rooms and hemi-anechoic rooms, International Organization for Standardization (ISO), Geneva
- [2] ISO 3744:2010, Acoustics. Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure. Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane, ISO, Geneva
- [3] ISO 6926:2016+A1:2020, Acoustics. Requirements for the performance and calibration of reference sound sources used for the determination of sound power levels, ISO, Geneva
- [4] C. Kırbaş, E. Bilgiç, E. Sadıkoğlu, Referans Ses Kaynaklarının Karakterizasyonu, 12. Ulusal Akustik Kongresi ve Sergisi, 14-15 Eylül 2017
- [5] R.C. Payne, D.J. Simmons, An investigation into the measurement of the environmental correction factor used in the determination of the sound power level and emission sound pressure level of machines CIRA (EXT), April 1996
- [6] JCGM 100:2008, Evaluation of measurements data - Guide to the expression of uncertainty in measurements, BIPM, Paris

ODYOLOJİK ÖLÇÜMLERDE METROLOJİK İZLENEBİLİRLİK TEMELLERİNİN KUVVETLENDİRİLMESİ

Enver Sadıkoğlu

TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, P.K.54 41470 Gebze, Kocaeli, Türkiye
e-posta: enver.sadikoglu@tubitak.gov.tr

Eyüp Bilgiç

TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, P.K.54 41470 Gebze, Kocaeli, Türkiye
eyup.bilgic@tubitak.gov.tr

Cafer Kırbas

TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, P.K.54 41470 Gebze, Kocaeli, Türkiye
cafer.kirbas@tubitak.gov.tr

ÖZET

Sağlık taramalarında önemli yer alan işitme değerlendirmesi kapsamında yapılan ölçümler için son yıllarda yeni yöntemler geliştirilmiş ve bunlara bağlı olarak yeni nesil cihazlar yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Gerçekleştirilen ölçüm sonuçlarını güvence altına alınması için kullanılan ölçüm araçlarının kalibrasyon yöntemleri ve kalibrasyon amaçlı kullanılan referans cihazların geliştirme çalışmaları aynı hızda yapılamamıştır. Buna göre halen teşhis amaçlı kullanılan birçok odyolojik ölçümlerin metrolojik izlenebilirliği açısından eksikler bulunmaktadır. Oluşan boşlukların doldurulması hususları stratejik hedef olarak akustik metrolojisi alanındaki strateji belgelerinde kayıt altına alınmış ve bu doğrultuda önde gelen ulusal metroloji enstitüleri ve araştırma kurumları tarafından çeşitli çalışmalar yürütölmektedir. Bu bildiriye TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde odyolojik ölçümlerde izlenebilirlik temellerini kuvvetlendirmek üzere yürütölmüş ve planlanan çalışmalar hakkında bilgi verilecektir.

Anahtar Kelimeler: İşitme değerlendirmesi, odyolojik ölçümler, metrolojik izlenebilirlik, kulak simölatörü, yapay kulak

STRENGTHENING THE METROLOGICAL TRACEABILITY BASIS FOR AUDIOLOGICAL MEASUREMENTS

ABSTRACT

Significant improvement in the methods and tools used for hearing assessment, which constitutes an important part of the health screening programmes, has been achieved over the last decades. However, studies on the development of methods and reference standards for calibration purposes to ensure the results of an audiological measurements made within the scope of hearing assessment could not be carried out at the same rate. Thus, there are still significant deficiencies in metrological traceability of many audiological measurements performed for diagnostic purposes. The issues of filling the gaps are stated as strategic targets in the strategy documents in the field of acoustic metrology, and leading national metrology institutes and research institutions are currently involved in various studies in this direction. This paper presents information about the studies carried out as well as planned at TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü to strengthen the basis for metrological traceability in audiological measurements.

Keywords: *Hearing assessment, audiological measurements, metrological traceability, ear simulator, artificial ear*

1. GİRİŞ

İnsanoğlu yaşam döngüsü boyunca işitme değerlendirmesi ve taramalarından geçmektedir. İşitme değerlendirmeleri ve buna bağlı olarak işitme seviyesi ile ilgili kararların verilmesi, değişik yöntemler ve bu yöntemleri icra eden cihazlar kullanılarak gerçekleştirilen ölçümlerin sonuçlarına dayanmaktadır. Hava ve kemik yolu ile ses iletiminin kontrol edilmesi en yaygın olarak kullanılan ölçüm grubu olmasına rağmen, günümüzde oto akustik emisyon ölçümleri (OAE), ABR tepkisinin belirlenmesi gibi çok değişik ölçümler de işitme değerlendirmesi kapsamında icra edilen ölçümlerdendir [1,2]. Ölçümlerin içeriği ve niteliğinden bağımsız olarak ölçüm sonuçlarının doğruluğunun ve güvenilirliğinin temin edilmesi için ölçüm sonuçlarının Uluslararası Birimler Sistemi'nde (SI) tanımlanmış büyüklüklerin standartlarına izlenebilir olması kaçınılmaz ve zorunlu bir koşuldur. Bu koşulun yerine getirilmesi için ölçümlerde kullanılan cihazların düzenli aralıklarla kalibrasyonlarının yapılması gerekmektedir.

İşitme değerlendirmesine yönelik ölçümlerde kullanılan cihazlar, genellikle odyolojik cihazlar olarak adlandırılmakta olup ve söz konusu cihazların kalibrasyonları akustik alanındaki temel büyüklük olan ses basınç birimi standardına izlenebilir olarak yapılmalıdır. Bunun için odyolojik cihazlarının kalibrasyonlarında ulusal ölçüm standartlarına izlenebilirlikleri sağlanmış çalışma standartlarının kullanılması gerekir. Odyolojik ölçümlerin sonuçlarının SI birimler sistemine izlenebilirliği, kulak simülatörleri, yapay mastoid, değişik tiplerde standart kulaklıklar gibi standartlaştırılmış yöntemlerle kalibrasyonları sağlanabilir [3]. Ancak günümüzde yukarıda sıralanmış olan çalışma standartları için tüm istenilen frekans ve ses seviyesi aralığı ve de her türlü akustik uyaran sinyaller için (sürekli saf ton, kesikli uyaran, darbe sinyali) standartlaştırılmış kalibrasyon yöntemleri mevcut değildir. Ayrıca odyolojik cihazların kalibrasyonlarının gerçekleştirilmesi için çalışma standardı olarak kullanılan cihazlar da yetersizdir. Bu nedenle odyolojik ölçümlerin sonuçları ciddi bir şekilde sorgulamaya tabi tutulmakta ve gerçekleştirilmiş ölçüm sonuçları birkaç dB mertebesinde belirsizliğe sahiptir. Odyolojik ölçümlerde metrolojik izlenebilirlik ile ilgili sorunları çözmek üzere, ağırlıklı olarak dünyadaki önde gelen metroloji enstitüleri araştırma kurumları ile işbirliği çerçevesinde araştırma projeleri yürütmektedir [4]. Bu çalışmalara TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde (UME) katılım sağlamış olup, yapılmış olan çalışmalar sonucunda odyolojik ölçümlerin kalibrasyonları ile ilgili altyapısını son yıllarda ciddi bir şekilde kuvvetlendirmiş ve kalibrasyon yeteneklerini geliştirmiştir.

2. ODYOLOJİK ÖLÇÜMLERDE METROLOJİK İZLENEBİLİRLİK

Odyolojik ölçümlerde en yaygın olarak kullanılan cihazlar odyometrelerdir. Bireyin hava ve kemik yoluyla ses iletimi yeteneğinin belirlenmesi için kullanılan odyometrelerin kalibrasyonları için insan kulağının performansını taklit eden araçlar kullanılmaktadır. Bu araçlar kulak simülatörleri olarak adlandırılmaktadır.

Kulak simülatörleri, insan kulağına akustik olarak bağlanmak üzere tasarlanmış kulaklık, telefon ahizesi ve benzeri cihazların akustik performansının objektif olarak değerlendirilmesi için kullanılan ölçüm cihazlarıdır [5,6]. Günümüzde geniş bir uygulama yelpazesini ve ölçülecek farklı dönüştürücü türlerini kapsayacak şekilde standartlaştırılmış ve ticari olarak üretilen birçok kulak simülatörü mevcuttur. Bu kategoride yaygın olarak kullanılan ve tarihsel olarak iyi bilinen cihazlardan biri, IEC 60318-1 standardında tarif edilmiş olan ve yapay kulak [7] olarak adlandırılan nesnelere. Yapay kulaklar, geniş bir frekans aralığında odyometrik kulaklıkların ve telefon ahizelerinin karakterizasyonu ve doğrulama ölçümleri için kullanılır. Kalibrasyon laboratuvarları tarafından yaygın olarak kullanılan yapay kulağın en iyi bilinen örnekleri Brüel & Kjaer (B&K) tip 4152, 4153 [8] (Şekil 1) ve G.R.A.S. 43AA modelleridir [9].



Şekil 1. Yapay kulakların örnekleri: Brüel & Kjaer tip 4152 ve 4153 [8]

Genel olarak kulak simülatörleri, ortalama bir yetişkin kulağının akustik özelliklerini taklit edecek şekilde tasarlanmıştır. Bu husus aslında odyometrik ekipmanlara izlenebilirlik sağlayan kulak simülatörleri için önemli bir sorun teşkil etmektedir. Yakın zamana kadar, kalibrasyon amacıyla piyasada bulunan tüm kulak simülatörleri, yetişkin kulağının anatomisine uygun olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Buna göre, bu cihazın tek başına odyometrik cihazların kalibrasyonu için kullanılması, her yaştaki insana yapılan işitme

değerlendirme ölçümleri için uygun olmadığı açıktır. Sorun özellikle yeni doğanlar ve çocuklar için önemli olmaktadır. Odyolojik ölçümlerin izlenebilirliği açısından bu sorunun giderilmesi kapsamında Avrupa Birliği'nin mali desteği ile "Evrensel Kulak Simülatorü ve İşitilemeyen Sesin Algılanması" (EARS) ve "Çağdaş İşitme Değerlendirmesi ve Toplum Sağlığının Yeni Nesil Gürültü Kaynaklarından Korunması İçin Metroloji" (EARS II) başlıklı yürütülmüş projelere [4] TÜBİTAK UME'de katılım sağlamıştır. Projelerin sonucunda yeni nesil kulak simülatorlerinin tasarımı ve üretimi sağlanmış olup, simülatorlerin kalibrasyonları için yöntemler araştırılmıştır [10-12].

Kulak simülatorlerinin geometrik yapı ve konfigürasyonu IEC standartlarında ayrıntılı olarak tarif edilmiştir. Ancak bu durum yetişkin kulağını simüle eden cihazlar için geçerlidir. Son yıllarda yürütülmüş olan araştırmalar sonucunda üretilmiş olan yeni doğan ve çocuk kulak simülatorleri gibi cihazlar henüz standartlaştırılmış hale gelmemiştir. Hangi yaş grubunun kulak anatomisine uygun olarak tasarlanmış olmasına bağlı olarak simülatorler, 2 veya 3 silindirik veya konik biçimdeki parçalardan oluşan ölçüm araçlarıdır. Basit bir şekilde anılan silindirik ve konik biçimdeki parçalar özünde birer Helmholtz rezonatörleri olup, birkaç parçanın birleşimi ile ses iletimi açısından insan kulağının performansını sergileyen bir araç ortaya çıkmaktadır. Kulak simülatorünün insan kulağının performansının hangi ölçüde sergilediği simülatorlerin akustik transfer empedansı değeri üzerinden belirlenmektedir. Kulak simülatorlerinin bazı örnekleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Kapalı kulak simülatorleri örnekleri [13-15]

(a) G.R.A.S. RA0045 model (b) PCB AEC304 model (c) Brüel & Kjaer tip 4157

Genel olarak kulak simülatorleri iki grupta sınıflandırılabilir: açık ve kapalı tip simülatorler. Yapay kulakların da ait olduğu açık tip kulak simülatorleri grubunda, simülator iç hacminde oluşan ses basıncını ölçmek amacıyla kullanıcının tercihine göre istediği mikrofonun monte edilmesi mümkündür. Bu tip simülatorlerin kalibrasyon işleminde kullanılan mikrofonun kalibrasyonunun ayrı bir işlem olarak yapılarak daha sonra kulak simülatorünün ka-

librasyonu sırasında mikrofonun kalibrasyon sonuçları (basınç hassasiyeti ve frekans tepkisi) dikkate alınır. Kapalı tip kulak simülatörlerde (occluded ear simulator) kullanılan mikrofon simülatörlere sabitlenmiş olduğu için mikrofonun kalibrasyonu simülatörden ayrı olarak yapılamamaktadır. Buna göre referans ses kaynakları (örneğin pistonfon) kullanılarak kapalı kulak simülatörlerin mutlak basınç tip hassasiyeti belirlenir, akustik transfer empedansının frekans tepkisi de simülatör içinde farklı frekanslarda sabit ses basıncı oluşturularak mikrofon çıkışındaki gerilimin ölçülmesi ile elde edilir. Son yıllarda kapalı tip kulak simülatörlerinin çok daha yaygın kullanılması günümüzün bir gerçeğidir.

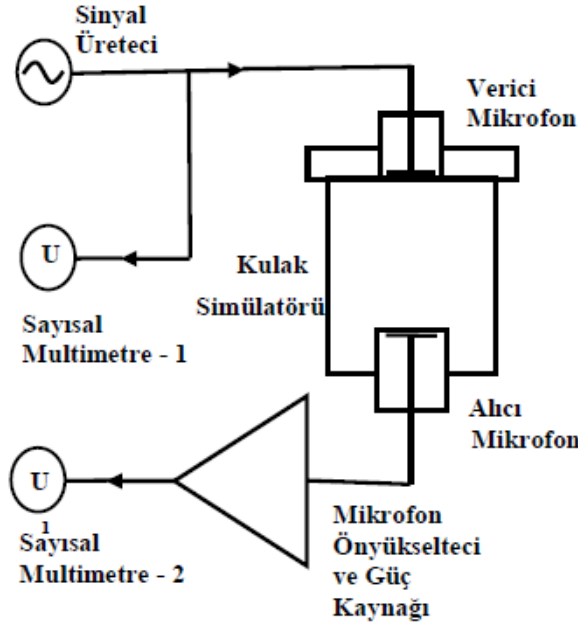
Sonuç olarak, kalibrasyonu yapılmış kulak simülatörleri, odyometrik ölçümlerin sonuçlarının metrolojik izlenebilirliğini sağlamaktadır. Buna göre; kullanılan kulak simülatörlerinin tipinin açık veya kapalı olmasına bakılmaksızın kalibrasyon altyapısının ülke içinde kurulmuş olması vazgeçilmez bir gerekliliktir.

3. TÜBİTAK UME'DE KULAK SİMÜLATÖRLERİ KALİBRASYONLARI

Ülkemizde işitme değerlendirmesinde kullanılan yaygın uygulamalar ve bu uygulamalardaki ölçüm yöntemleri ve ölçüm araçları ile ilgili durum incelemesi sonucunda, TÜBİTAK UME tarafından odyolojik ölçümlerin sonuçlarını güvence altına almak amacıyla odyometre kalibrasyonlarının gerçekleştirilmesi için gerekli altyapı 25 yıl önce kurulmuş olup, müşterilerden gelen taleplere göre kalibrasyon hizmetleri sunulmaktadır. Kalibrasyonlar IEC 60645-1 standardına [16] göre yapılmaktadır. Buna ek olarak Türkiye'de odyometre kalibrasyonu hizmetleri sunan kurumlar tarafından referans olarak kullanılan kulak simülatörleri ailesinden yapay kulak cihazlarının ve de yapay mastoid gibi cihazlarının kalibrasyonu için de gerekli altyapı uzun yıllar önce TÜBİTAK UME'de kurulmuş ve halen kullanılmaktadır. Özellikle odyometre cihazlarının hava iletimi performansının değerlendirmesi amacıyla çalışma standartları olarak kullanılan kulak simülatörlerinin kalibrasyonlarının 2015 yılına kadar kısıtlı kapsamda yapıldığı ve uluslararası arenadaki son yılların gelişmeleri dikkate alınarak TÜBİTAK UME'de yeni altyapılar kurulmuş ve odyolojik cihazların kalibrasyonlarının izlenebilirlik zincirinin kuvvetlendirilmesi yönünde ileri seviyeye ulaşılmıştır.

EAR ve EARS II projeleri sonucunda TÜBİTAK UME, kapalı kulak simülatörleri dahil her türlü kulak simülatörlerinin 100 Hz – 20 kHz frekans aralığında kalibrasyon yeteneği geliştirmiştir. Geliştirilmiş olan yetenek Brüel & Kjaer 3160-A-022 LAN (2 giriş kanalı, 2 çıkış kanalı ve 50 kHz'lik jeneratör

modülü) Pulse analizörü tabanlı Brüel & Kjaer tip 9699 kalibrasyon sisteminin kullanımına dayalıdır. AB destekli projelerdeki faaliyetler sonucunda oluşturulmuş sistem ve sistemin kullanımıyla elde edilmiş sonuçlar daha önce başka kaynaklarda yayınlanmış olduğu [10-12] için bu bildiride bunlardan bahsedilmeyecektir. Ancak B&K tip 9699 sistemi ile yapılan kalibrasyonda yeterince düşük belirsizlik değerleri elde edilmesine rağmen kalibrasyonun nispeten yüksek maliyetli olduğu vurgulanmalıdır. Buna göre son bir yıl içinde gerçekleştirilen faaliyetler sonucunda TÜBİTAK UME'de özellikle kapalı tip kulak simülatörlerinin kalibrasyonları için IEC 60318-4 standardına [6] uygun olarak daha pratik kalibrasyon yeteneği geliştirilmiştir. Kalibrasyon için kullanılan ölçüm sistemi şematik olarak Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Kulak simülatörünün akustik transfer empedansı ölçüm sisteminin şematik gösterimi

Kulak simülatörünün girişine bağlanmış mikrofona sinyal jeneratörü üzerinden belirli frekansta gerilim uygulandığında verici mikrofona diyaframının aynı frekansta hareket etmesi sonucunda kulak simülatörü hacminin içinde ses alanı oluşmaktadır. Ses basıncı etkisine maruz kalan kulak simülatörüne monte edilmiş mikrofona çıkışında ses basıncı ile orantılı elektriksel gerilim oluşur. Kalibrasyon kapsamında tüm ölçümler verici mikrofona uygulanan ve alıcı mikrofona çıkışındaki gerilim ölçümleri ile sınırlıdır. Kulak simülatö-

rünün akustik transfer empedansı simülatör içindeki mikrofonun diyaframına etki den ses basıncının simülatörünün referans düzlemindeki hacim hızına oranı şeklinde tanımlanır [6]. Hacim hızı ise birim zamanda oluşan hacim değişimi olduğu dikkate alındığında Şekil 3'te tarif edilmiş düzenlemede kulak simülatörünün akustik transfer empedansı formül eşitlik (1) ile belirlenir:

$$Z_t(f) = \frac{p(f)}{\Delta V 2\pi f} \quad (1)$$

Burada $p(f)$ doğrusal f frekansında alıcı mikrofonun diyaframına etkiyen ses basıncı, ΔV verici mikrofonun diyaframının hareketi sonucunda oluşan hacim değişimidir. Verici mikrofona uygulanan gerilimin sabit olması koşuluyla eşitlik (1)'de yapılan sadeleştirmeler sonucunda akustik transfer empedansı IEC 60318-6 standardına uygun olarak eşitlik (2) ile hesaplanabilir.

$$Z_t(f) = 35,9 \frac{500}{f} \frac{p(f)}{p(500)} \quad (2)$$

ampirik formül ile hesaplanır. Formül (2)'de $p(500)$ 500 Hz frekansındaki ses basıncıdır. IEC 60318-6 standardına göre kapalı kulak simülatörleri için nominal etkin hacmin 1260 mm^3 olarak 500 Hz frekansında belirlenmiş olması ve bu değerde akustik transfer empedansın $35,9 \text{ MPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$ olması nedeniyle, uygulamalarda 500 Hz frekansı referans frekans olarak kullanılmaktadır. Kulak simülatörünün dB cinsinden akustik transfer empedans seviyesi hesaplanacak olursa, aşağıdaki formül kullanılır:

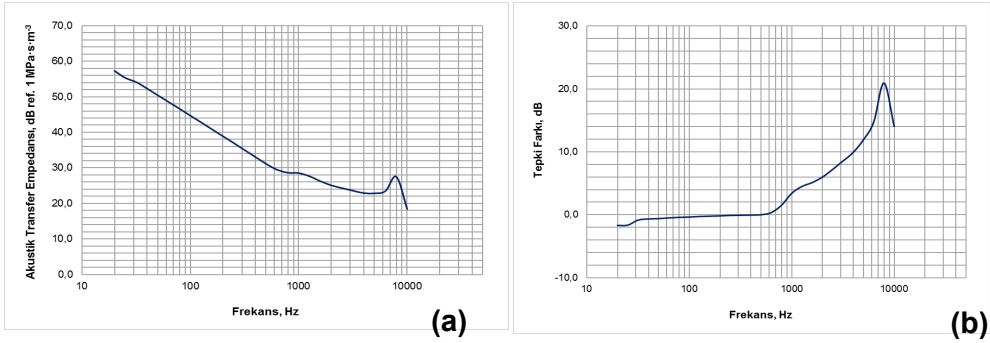
$$L_{Z_t}(f) = 10 \lg Z_t(f)^2 = 20 \lg(35,9 \cdot 500) - 20 \lg f + L_p(f) - L_p(500) \quad (3)$$

Bu formülde, $L_p(f)$ f frekansında ölçülen ses basınç seviyesi, $L_p(500)$ ise 500 Hz frekansında ölçülen ses basınç seviyesidir.

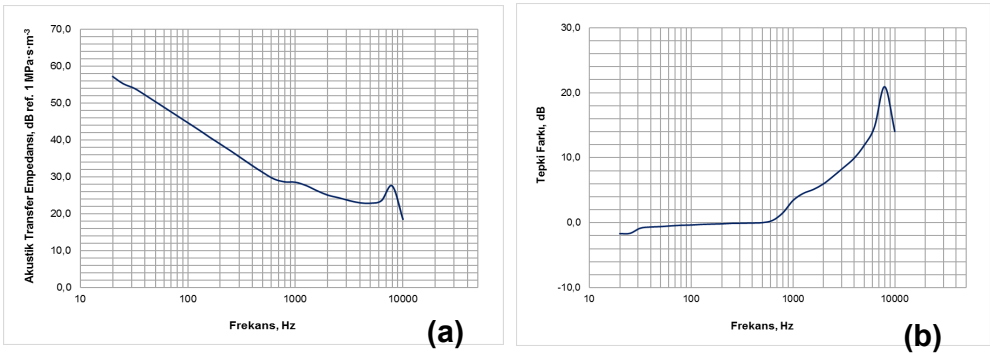
IEC 60318-4 standardında tarif edilmiş kalibrasyon yöntemini uygulamak amacıyla TÜBİTAK UME'de kalibrasyon sistemi kurulmuştur. Verici mikrofona Stanford Research marka DS360 model Sinyal Jeneratöründen $10,0 \text{ V}$ (RMS) değerinde elektriksel gerilim uygulanmıştır. Mikrofonun yüksek empedansı dikkate alınarak mikrofona sinyal yüksek empedans uyumlaştırma adaptörü (Brüel & Kjaer AQ-0015) üzerinden uygulanmıştır. Alıcı mikrofonun çıkışında oluşan sinyal mikrofon ön yükseltici (Brüel & Kjaer tip 2669) ve mikrofon güç kaynağı (Brüel & Kjaer tip 2804) üzerinden Sayısal multimetre ile ölçülmüştür. Verici mikrofona uygulanan ve alıcı mikrofonun çıkışında

oluşan AC gerilim değerlerinin ölçümleri için Hewlett Packard marka 3458A 8,5 dijital Sayısal multimetreler kullanılmıştır. Alıcı mikrofonun maruz kaldığı ses basıncı kulak simülörünün pistonfon kullanılarak belirlenmiş mutlak hassasiyeti değeri dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Yukarıda tarif edilmiş yöntem ile Brüel & Kjaer tip 4157 ve G.R.A.S. RA0045 model iki farklı kapalı kulak simülörünün kalibrasyonları gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilmiş kalibrasyonların sonuçları Şekil 4 ve Şekil 5'te sunulmuştur. Şekil 4 (a) ve Şekil 5 (a)'da kulak simülörlerinin dB cinsinden (ref. 1 MPa·s·m⁻³) akustik transfer empedansı seviyesinin frekansa göre değişimi gösterilmiş olup, Şekil 4 (b) ve Şekil 5 (b)'de ise verici mikrofona sabit gerilim uygulanmış iken simülör iç hacminde oluşan normalize ses basıncı tepkisi grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerdeki normalize tepki herhangi bir frekanstaki ses basıncı seviyesinden 500 Hz frekansındaki ses basıncı seviyesinin çıkarılmasıyla elde edilmiştir.



Şekil 4. Brüel & Kjaer tip 4157 kulak simülörü kalibrasyon sonuçları
a) akustik transfer empedansı b) normalize ses basınç tepkisi



Şekil 5. G.R.A.S. RA0045 model kulak simülörü kalibrasyon sonuçları
a) akustik transfer empedansı b) normalize ses basınç tepkisi

Kapalı kulak simülatörlerinin kalibrasyonlarındaki “Ölçüm Belirsizliğinin Hesaplanması için Rehber” (GUM) [17] dokümanına uygun olarak ayrıntılı belirsizlik analizi yapıldığında % 95 güvenilirlik düzeyinde genişletilmiş belirsizliğin frekansa bağlı olarak 0,22 dB ile 0,55 dB arasında değiştiği tespit edilmiştir. Belirsizlik bütçesinde en baskın bileşenin kulak simülatörünün kullanılan mikrofonu ile birlikte mutlak hassasiyet değerindeki belirsizlik olduğu görülmüştür.

TÜBİTAK UME’de gerçekleştirilmiş olan ölçümlerin doğruluğu kalibrasyon sonucunda elde edilen verilerin kulak simülatörlerinin üreticileri tarafından düzenlenmiş olan kalibrasyon kartı belgelerindeki verilerle karşılaştırılarak teyit edilmiştir. Ayrıca elde edilen veriler, IEC 60318-4 standardında akustik transfer empedansı değerleri için verilmiş nominal değerler ile de uyumlu ve standartta belirtilmiş toleransların içinde olduğu görülmüştür.

İdeal koşullarda kapalı kulak simülatörlerinin kalibrasyon sonuçlarının güvence altına alınması için bir laboratuvarlararası karşılaştırmaya katılım sağlanması gerekmektedir. Ancak kulak simülatörü kalibrasyonları konusunda laboratuvarlararası karşılaştırmaların TÜBİTAK UME’nin dahil olduğu Bölgesel Metroloji Organizasyonlarda veya Avrupa Akreditasyon Kurumu nezdinde henüz düzenlenmediği ve hatta gündeme bile gelmediği vurgulanmalıdır. TÜBİTAK UME’nin dahil olduğu AB destekli araştırma projeleri kapsamında karşılaştırmalar düzenlenmiş, ancak bu karşılaştırmalar yeni tasarlanmış kulak simülatörleri

için geliştirilmiş prototipler olduğu ve katılımcılarının ölçümlerini aynı prototipler kullanarak yapmadıklarından bu karşılaştırmalar tek başına yeni kalibrasyon yeteneğinin teyidi için yeterli değildir. Bu doğrultuda; TÜBİTAK UME tarafından kapalı kulak simülatörleri kalibrasyonları konusunda, üyesi olduğu herhangi bir Bölgesel Metroloji Organizasyon nezdinde laboratuvarlar arası karşılaştırmaların düzenlenmesi önerilecektir.

4. SONUÇ

Ülkemizde gerçekleştirilen odyolojik ölçümlerin sonuçlarını güvence altına alınması ve ölçümlerdeki metrolojik izlenebilirliğinin sağlanması için TÜBİTAK UME’de gerçekleştirilmiş olan çalışmalar sonucunda kapalı kulak simülatörü kalibrasyon sistemi kurulmuş ve yeni kalibrasyon yeteneği kazanılmıştır. Kazanılmış yetenekle Enstitü tarafından odyometre cihazlarının kalibrasyonlarında kullanılan ve piyasada halen bulunan her türlü kulak simülatörlerinin saf ton modunda kalibrasyon ihtiyaçları karşılanabilir durumdadır.

Ancak kulak simülatorlerinin odyometre dışındaki cihazların kalibrasyonları için de kullanıldığı ve bunun için kulak simülatorlerinin saf ton dışındaki darbe ve kesikli sinyallerle yapıldığı göz önüne alındığında TÜBİTAK UME'de kulak simülatorleri kalibrasyon yöntemlerinin geliştirilmesi konusunda çalışmalara devam edileceği ve OAE gibi cihazların metrolojik izlenebilirlik sorunlarının giderilmesi, orta vadede planlanan ve hayata geçirilecek önemli çalışma konuları arasında olacaktır.

5. KAYNAKLAR

- [1] Katz, J.: Handbook of Clinical Audiology, Lippincott-Williams-and-Wilkins, 2014
- [2] Audiometry Procedures Manual, National Health and Nutrition Examination Surveys (NHANES), U.S. Department of Health & Human Services, January 2009
- [3] Houghton, P.: Acoustics for Audiologists, Academic Press, 2002
- [4] EARS projelerinin web-sayfası, <https://www.ptb.de/emrp/ears-project.html>
- [5] IEC 60318-1, Electroacoustics - Simulators of human head and ear - Part 1: Ear simulator for the measurement of supra-aural and circumaural earphones, International Electrotechnical Commission, Geneva, 2009
- [6] IEC 60318-4, Electroacoustics - Simulators of human head and ear - Part 4: Occluded-ear simulator for the measurement of earphones coupled to the ear by means of ear inserts, International Electrotechnical Commission, Geneva, 2010
- [7] Brüel, P.V., Frederiksen, E., Rasmussen, G.: Artificial ears for the calibration of earphones of the external type. Brüel & Kjaer Technical Review No 4 (1961) and No. 1 (1962)
- [8] Artificial Ears — Types 4152 and 4153, Product Data, BP 0265 – 17, Brüel & Kjaer, Denmark
- [9] GRAS 43AA Ear Simulator Kit according to IEC 60318-1 and -2, Product Specifications, G.R.A.S. Sound & Vibration, Denmark
- [10] Barham, R., Olsen, E.S., Rodrigues, D., Barrera-Figueroa, S., Sadıkoğlu, E., Karaböce, B.: The calibration of a prototype occluded ear simulator designed for neonatal hearing assessment applications. J. Acoust. Soc. Am., 140 (2), 806 – 812, 2016
- [11] Karaböce, B., Sadıkoğlu, E., Bilgiç, E.: Characterization and clinical trials of the prototype ear simulator designed for neonates hearing assessment. Acoust. Australia, 45 (2), 403 – 410, 2017
- [12] Sadıkoğlu, E., Bilgiç, E., Characterization measurements of new family of ear simulators at TÜBİTAK UME, IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA 2019), Kadir Has University, İstanbul, 26-28 June 2019, Article number 8802176
- [13] Acoustic Couplers and Era Simulators, Larson Davis PCB Piezotronics Division, <https://www.pcb.com/products?m=AEC304>
- [14] GRAS RA0045 Externally Polarized Ear Simulator According to IEC 60318-4 (60711), Product Specifications, G.R.A.S. Sound & Vibration, Denmark
- [15] Ear Simulator — Type 4157, Product Data, BP 0262 – 17, Brüel & Kjaer, Denmark

- [16] IEC 60645-1, Electroacoustics – Audiometric equipment - Part 1: Equipment for pure-tone and speech audiometry, International Electrotechnical Commission, Geneva, 2017
- [17] JCGM 100:2008 (GUM), Evaluation of measurement data – guide to the expression of uncertainty in measurement, BIPM, France

SİSMOMETRELERİN TEMEL PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ İÇİN ÖLÇÜM SİSTEMLERİ

Eyüp Bilgiç

TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, P.K.54 41470 Gebze, Kocaeli, Türkiye
e-posta: eyup.bilgic@tubitak.gov.tr

Enver Sadıkoğlu

TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, P.K.54 41470 Gebze, Kocaeli, Türkiye
enver.sadikoglu@tubitak.gov.tr

Cafer Kırbas

TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, P.K.54 41470 Gebze, Kocaeli, Türkiye
cafer.kirbas@tubitak.gov.tr

ÖZET

Deprem izleme ve algılama bilincinin artmasıyla birlikte sismometre adı verilen cihazlarla elde edilen ölçümlerin izlenebilirliği daha da önem kazanmıştır. Titreşim sensörlerinin kalibrasyonu konusunda uluslararası standartlar mevcut olmakla birlikte, ölçüm aralığını kapsayacak kadar yeterli değildir. Düşük frekans bölgesinde kalibrasyonlar için araştırma ve geliştirmeler devam etmektedir. Bu bildiride, sismometrelerin temel parametrelerinin belirlenmesi için TÜBİTAK UME’de kurulan ölçüm düzenekleri hakkında bilgi verilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sismometre, metroloji, kalibrasyon, izlenebilirlik.

ESTABLISHMENT OF MEASUREMENT SETUPS FOR BASIC PARAMETERS OF SEISMOMETERS

ABSTRACT

Traceability of the measurement results obtained using the devices called as seismometer are become more important due to the increased awareness of monitoring and detection of earthquakes. Although international standards exist on calibration of vibration sensors, they are not sufficient to cover the measuring range. Intensive research activities on calibrations in low frequency range are ongoing. This paper presents information on the measurement setups established for the determination of the basic parameters of seismometers at TUBİTAK UME.

Keywords: *Seismometer, metrology, calibration, traceability*

1. GİRİŞ

Sismometreler, depremler, patlamalar gibi sismik aktivitelerin oluşturduğu titreşimleri izlemek için kullanılan cihazlardır. Bu tip aktiviteler yeryüzünde geniş alanları etkilediğinden, izlemek için kullanılan sistemler, araştırılan alanlara yayılır ve kullanımları süresi boyunca çalışmaları sağlanır. Metroloji açısından sismometreler için önemli bir durum, yapılan ölçüm sonuçlarının SI Birimler Sistemine izlenebilirliğidir. Bu gereksinim uluslararası standartlar kullanılarak kısmen karşılanmaktadır [1-3]. Ancak bu standartlar düşük frekans bölgesini kapsamamaktadır. Bu durum bir motivasyon nedeni oldu ve sonrasında “Düşük frekanslı ses ve titreşim” başlıklı bir proje, AB desteği ile yürütülen Avrupa İnovasyon ve Metroloji Araştırma Programı'nın (EMPIR) 2019 çağrısında araştırma projesi olarak seçildi (SRT-v11) [4]. Bu projenin esas hedeflerinden birisi, düşük frekanslarda ($f < 0,1$ Hz) sualtı akustiği ve titreşim ölçümleri için birincil kalibrasyon metodu ve kalibrasyon sistemi geliştirmektir.

TÜBİTAK UME titreşim alanındaki kalibrasyon alt yapısını genişletmiştir. Çizgisel ivme için frekansa bölgesinin alt frekansı 0,4 Hz'e ve üst frekansı 20 kHz'e genişletilmiştir. TÜBİTAK UME'de 0,4 Hz'te çalışan bir adet düşey, bir adet de yatay titreştirici mevcuttur. Titreştiriciler sismometrelerin kalibrasyonlarının yapılmasında, aynı zamanda tasarım aşamasında olan sismometrelerin temel parametrelerinin belirlenmesinde kullanılırlar. Sismometrelerin teorisi ve temel parametreleri araştırılmış ve yayınlanmıştır [5,6]. Sismometrelerde kullanılan sensörlere ait araştırma sonuçları literatürde mevcuttur [7]. Sismometrelerin kalibrasyonlarına yönelik çalışmalar ve sonuçları, bölgesel metroloji organizasyonları seviyesinde düzenlenen aktivitelerde sunulmuştur [8].

2. ÇALIŞMANIN KAPSAMI

Sismometrelerin temel parametrelerinden bazıları, doğal frekans, sönüm sabiti (ayrıca sönümlenme oranı), hassasiyet, ölçüm aralığı, doğrusallık ve frekans cevabıdır. Bu parametreler üreticiler tarafından tasarım aşamalarında belirlenmektedir. Dolayısı ile üreticiler yukarıda verilen bu parametrelerin ölçümlerini talep edebilmektedir. Elektriksel ve/veya mekanik kalibrasyonlar ile bu parametreler belirlenebilmektedir. Titreşim alanında düşük frekans bölgesindeki bu talepleri karşılamaya yönelik TÜBİTAK UME kalibrasyon sistemleri kurmaya karar vermiştir. Bu sistemlerle aşağıdaki parametrelerin belirlenmesi hedeflenmiştir:

- a) doğal frekans,
- b) sönüm katsayısı,
- c) frekans cevabı,
- d) hassasiyet.

2.1. Sismometrelerin Çalışma Teorisi

Tek serbestlik dereceli sistemlerin hareketi Eşitlik (1) ile verilmektedir [9].

$$\ddot{x}(t) + 2\tau\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = 0 \quad (1)$$

Burada:

$$\tau = \frac{c}{2m\omega_n} \text{ is}$$

$\tau = \frac{c}{2m\omega_n}$ viskoz sönüm faktörü, c viskoz sönüm katsayısı, ω_n sismometrenin doğal frekansdır. Tek serbestlik dereceli sistemin kritik altı ($\tau < 1$) genel çözümü Eşitlik (2) ile verilir.

$$x(t) = Ae^{-\tau\omega_n t} \cos(\omega_d t - \varphi) \quad (2)$$

$\omega_d = (1 - \tau^2)^{1/2} \omega_n$ serbest sönümlü titreşimin frekansı ve φ faz açısıdır.

Mekanik kalibrasyonlarda sismometreler titreşime maruz bırakılır. Bu durum için hareket denklemi Eşitlik (3) ile verilebilir.

$$\ddot{x}(t) + 2\tau\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = A\omega_n^2 e^{-i\omega t} \quad (3)$$

$$\ddot{x}(t) + 2\tau\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = A\omega_n^2 e^{-i\omega t}$$

Bu duruma ait genel çözüm Eşitlik (4) ile verilir.

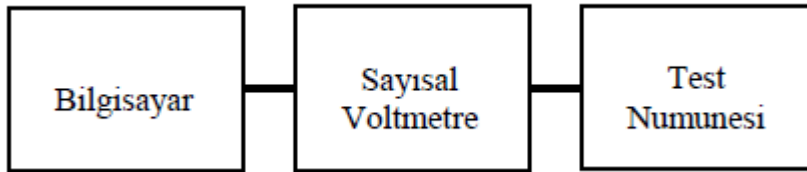
$$x(t) = A|G(i\omega)|e^{-i(\omega t - \varphi)} \quad (4)$$

Burada $G(i\omega)$ ikinci derece sistemin frekans cevabı olup Eşitlik (5) ile verilmektedir.

$$G(i\omega) = \frac{\omega_n^2}{(i\omega)^2 + 2\tau\omega_n(i\omega) + \omega_n^2} \quad (5)$$

2.2. Doğal Frekans ve Sönüm Katsayının Belirlenmesi

Sismik cihazın kritik altı sönümü için doğal frekansının belirlenmesinde kullanılmak üzere kısa bir bilgisayar programı yazılmıştır. Bu program, örnekleme süresi, örnekleme oranı ve sismometrenin kütesinin nominal salınım frekansını içermektedir. Sismometrelerde kalibrasyon ve veri bobini olmak üzere iki adet bobin bulunmaktadır. Kalibrasyon bobini Agilent marka 3458A tip sayısal multimetreye (DMM) bağlanmıştır. Program basitçe, kalibrasyon bobininin çıkış gerilimini DMM'in DC gerilim modunda örneklemektedir. Sismometreden veri toplamada kullanılan ölçüm sisteminin blok şeması Şekil 1'de verilmiştir. Sismometrenin kütlesi, üzerine konulan ilave bir kütleyi hızlıca kaldırarak veya kısa süreli DC sinyali uygulayarak uyarıldığında salınım yapar ve bu salınıma karşılık kalibrasyon bobininde bir sinyal üretilir. Cihazın doğal frekansını belirlemek için örneklenen bu sinyal sinüs yaklaşımı metodu [1] uygulanır.



Şekil 1. Veri toplama sisteminin blok şeması

Örneklenen tek frekanslı sinüs sinyali için sinüs yaklaşımı yönteminde kullanılacak genel ifade Eşitlik (6) ile verilmektedir.

$$V(t_i) = A\cos(\omega t_i) - B\sin(\omega t_i) + C \quad (6)$$

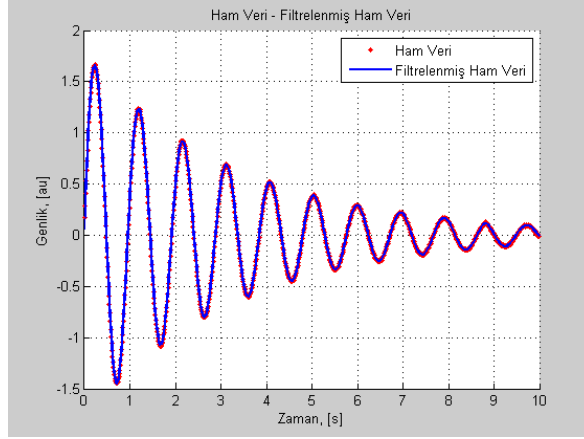
Burada t_i zaman verisidir. Doğal frekansı belirlemek için Denklem (7) kullanılabilir.

$$f_o = N/T f_o = N/T \quad (7)$$

Burada;

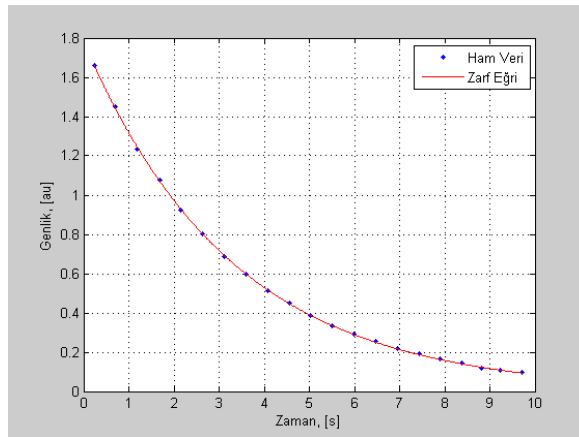
- f_o : doğal frekans, Hz
- N : tam salınımların sayısı,
- T : tam salınımlar için toplam zaman, s.

Bu çalışmada yatay ve düşey sarkaç prensibine göre çalışan sismik cihazın salınımları örneklenmiştir. Cihazın nominal doğal frekansı 1 Hz olup, örnekleme frekansı olarak 100 Hz kullanılmıştır. Cihazın yatay sensörünün salınım hareketi karşılığında kalibrasyon bobininden örneklenen ham sinyal ve gürültüden arındırılmış (filtrelenmiş) sinyal Şekil 2’de verilmiştir.



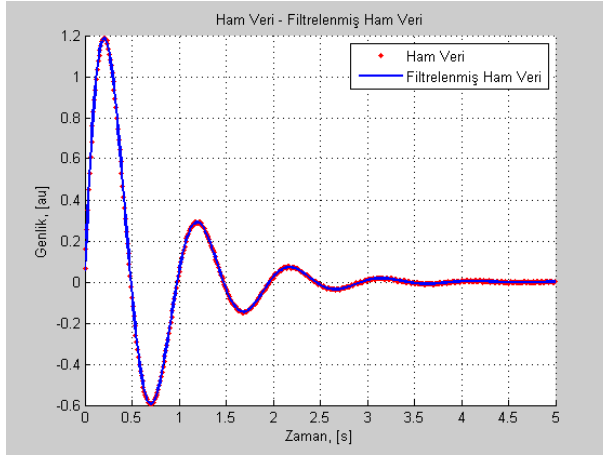
Şekil 2. Kalibrasyon bobininden örneklenen ham ve filtrelenmiş sinyal

Ham veri üzerindeki gürültüyü ortadan kaldırmak için örneklenen veri, sayısal olarak oluşturulan alçak geçirgen (low-pass) filtreden geçirilmiştir. Filtrelenmiş sinyalin tepe noktalarından geçen ve sönümü gösteren zarf eğrisi Şekil 3’te verilmiştir. Sönüm faktörü, Eşitlik (2) kullanılarak belirlenebilir.

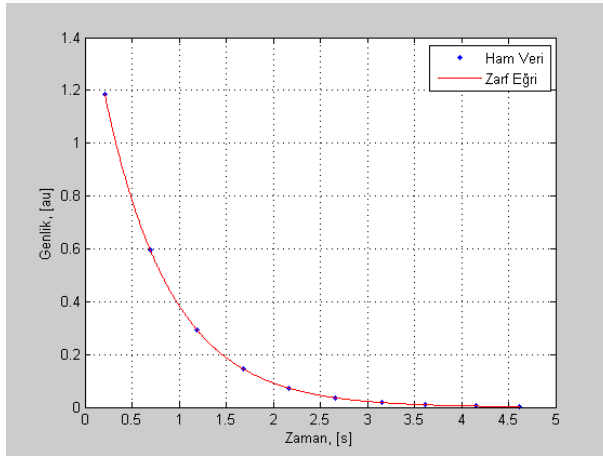


Şekil 3. Örneklenen sinyalin tepe noktalarından geçen zarf eğrisi

Farklı sönümlenme durumlarını benzeştirmek (simüle etmek) için, veri bobini farklı direnç değerleri kullanılarak kısa devre edilmiştir. 4 kW direnç kullanılarak elde edilen veriler kalibrasyon bobini çıkış gerilimi ve sönümü gösteren zarf eğrisi sırası ile Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 4. Kalibrasyon bobininden örneklenen ham ve filtrenmiş sinyal, R=4 kW



Şekil 5. Örneklenen sinyalin tepe noktalarından geçen zarf eğrisi, R=4 kW

2.3. Frekans Cevabı ve Hassasiyetin Belirlenmesi

Sismometrelerin frekans cevabı, hem elektriksel [6], [10], hem de mekanik metotlar kullanılarak belirlenebilmektedir. Sismometrenin hız tepkisi için transfer fonksiyonu [10] Eşitlik (8) ile verilir.

$$G = S \frac{s^2}{s^2 + 2\tau\omega_n s + \omega_n^2} \quad G = S \frac{s^2}{s^2 + 2\tau\omega_n s + \omega_n^2} \quad (8)$$

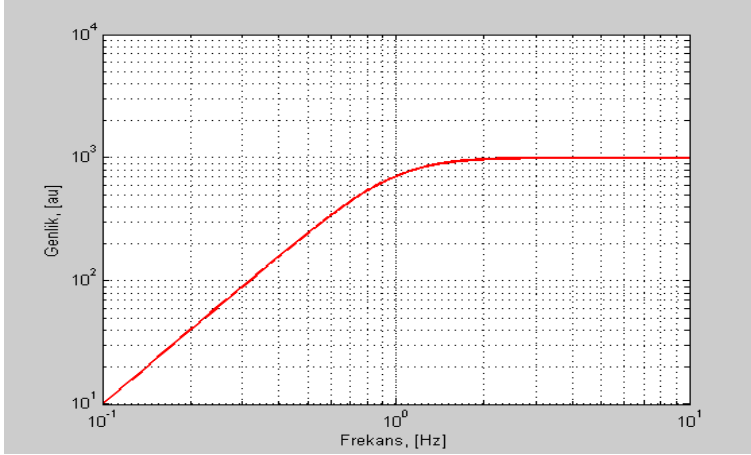
Burada;

S : hız hassasiyeti, V/(m/s)

s : iw ($w = 2\pi f$)

f : frekans, Hz

Doğal frekans 1 Hz, hız hassasiyeti $S = 1000$ V/(m/s) ve viskoz sönüm faktörü $t = 0,707$ değerleri kullanılarak elde edilen hız genliği cevabı Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Hız genliği tepki eğrisi

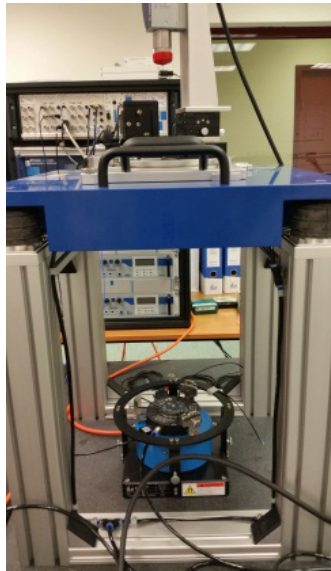
Veri bobini (sismometrenin konulduğu zeminin hareketine uygun elektrik sinyali üretir) ve kalibrasyon bobinin aynı mıknatıs üzerinde olmaları nedeni ile sismometrenin kütesinin, kalibrasyon bobinine uygulanan elektrik sinyalinin frekansında salınım yapması beklenir. Mekanik kalibrasyonlar için sismometrenin hız hassasiyeti, gerilim çıkışının belirli frekansta uygulanan hıza oranı olarak tanımlanır. Aynı sismometrenin elektriksel ve mekanik kalibrasyon sonuçlarının karşılaştırmasının yapılmış ve sonuçları yayınlanmıştır [10].

Sismometrelerin içerisinde birbirine dik eksenlerde konumlandırılmış üç adet hız sensörü bulunmaktadır. Çoklu eksenle çalışan titreştiriciler kullanılması durumunda, kullanıcının sismometreleri her bir eksen için ayrı monte etmesine gerek kalmamaktadır [11]. Sismometrelerin mekanik kalibrasyonları ile SI birimler sistemine doğrudan izlenebilirlik sağlanmış olmak-

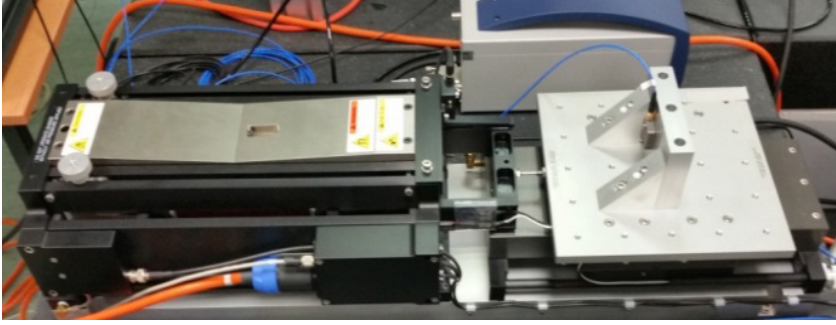
tadır. Kurulan mekanik kalibrasyon sistemlerinin eş değerliliklerinin gösterilmesi için ulusal veya uluslararası seviyede karşılaştırmalar organize edilmektedir [12].

3. KURULMUŞ KALİBRASYON SİSTEMLERİ

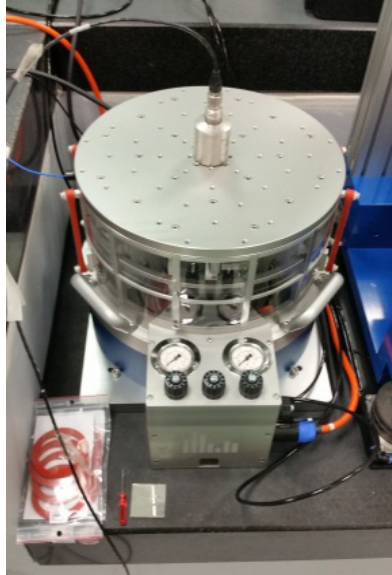
TÜBİTAK UME titreşim alanındaki 1990'lı yıllarında kurulmuş olan alt yapı geliştirilerek, çizgisel ivme için kalibrasyon alt yapısını genişletmiştir. Çizgisel ivme için frekansa bölgesinin alt frekansı 0,4 Hz'e ve üst frekansı 20 kHz'e genişletilmiştir. Bu frekans aralığı üç adet hava yataklı titreştirici kullanılarak sağlanmaktadır. Bu titreştiriciler, APS Dynamics marka APS-129 tip, Spektra marka SE-13 tip ve SE-09 tip titreştiricilerdir. APS-129 yatay konumlandırılmış olup 0,4 Hz-160 Hz aralığında çalışmaktadır. SE-13 düşey konumlandırılmış olup, 0,2 Hz - 400 Hz aralığında çalışmaktadır. Bu iki titreştirici sismik kütle üzerine monte edilmiş olup, sismometrelerin kalibrasyonları ve aynı zamanda temel parametrelerinin belirlenmesinde kullanılması amaçlanmıştır. Kurulu sistemlerin resimleri Şekil 7 - 9'da verilmiştir.



Şekil 7. Çizgisel ivme birincil kalibrasyon sistemi, çalışma frekans aralığı 5 Hz – 20 kHz

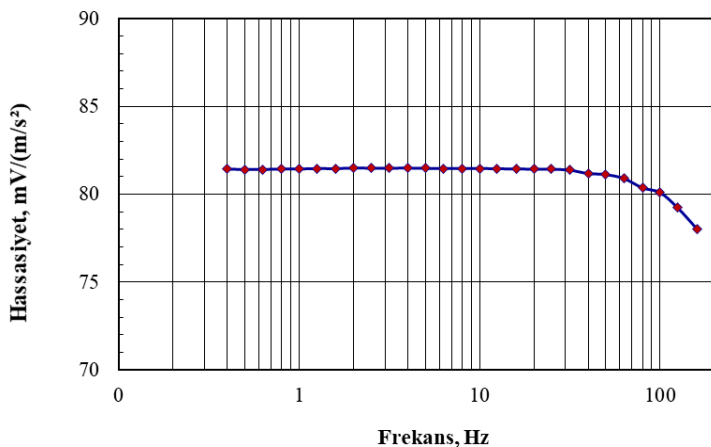


Şekil 8. Çizgisel ivme birincil kalibrasyon sistemi, çalışma frekans aralığı 0,4 Hz – 160 Hz

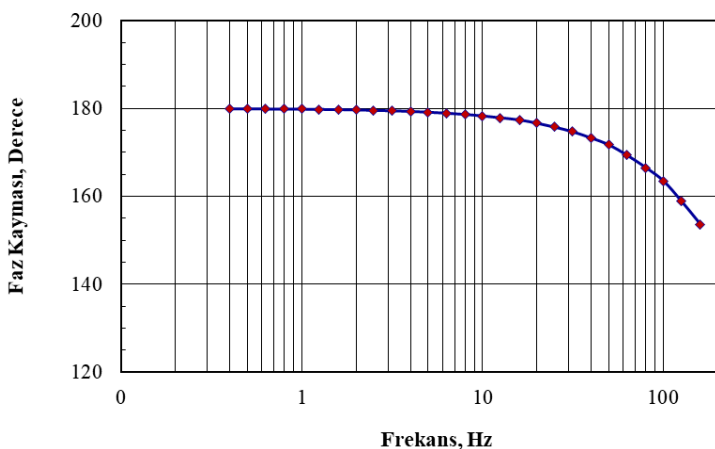


Şekil 9. Çizgisel ivme birincil kalibrasyon sistemi, çalışma frekans aralığı 0,4 Hz – 400 Hz

Sismometrelerin yansira titreşim sensörleri, yukarıda verilen titreştiriciler kullanılarak birincil seviyede kalibre [1] edilebilirler. Silicon Design (SDI) marka 2240-005 tip kapasitif ivme ölçer, APS-129 tip ve SE-13 tip titreştiricilerin hareketli kafaları üzerine monte edilmiş ve birinci seviyede kalibre edilmişlerdir. Kalibrasyondan elde edilen sonuçlar Şekil 10-11’de sunulmuştur.

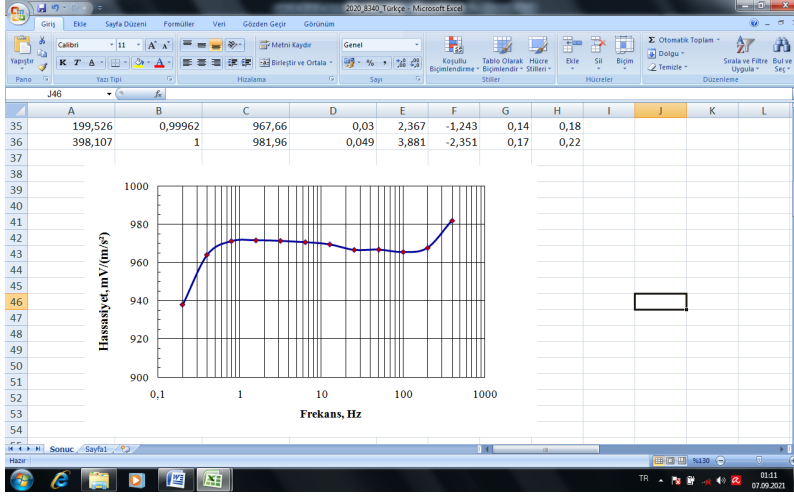


Şekil 10. SDI-2240-005 İvme ölçerin kompleks hassasiyetinin büyüklüğünün frekans eğrisi

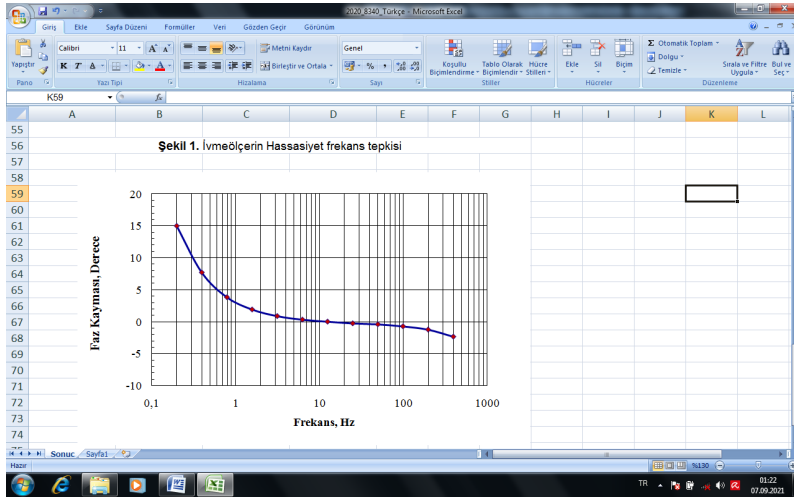


Şekil 11. SDI-2240-005 İvme ölçerin kompleks hassasiyetinin faz kaymasının frekans eğrisi

Brüel & Kjaer marka 8340 tip sismik ivme ölçer SE-13 tip titreştirici kullanılarak kalibre edilmiştir. İvme ölçerin üreticisi tarafından belirlenen kullanım frekans aralığı 0,1 Hz - 1500 Hz'tir, nominal hassasiyeti 1,020 V/(m/s²), maksimum kullanım ivmelenme tepe değeri 0,5 g (1 g = 9,80665 m/s²) ve kütlesi 775 g olarak verilmektedir. Kalibrasyonda elde edilen sonuçlar Şekil 12 ve Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 12: B&K tip 8340 İvme ölçerin kompleks hassasiyetinin büyüklüğünün frekans eğrisi



Şekil 13: B&K tip 8340 İvme ölçerin kompleks hassasiyetinin faz kaymasının frekans eğrisi

4. SONUÇ

Sismetrelerin temel parametreleri olan doğal frekans, sönümlenme sabiti (ayrıca sönümlenme oranı), hassasiyet, ölçüm aralığı, doğruluk ve frekans tepkilerini belirlemek için ölçüm sistemleri kurulmuştur. Parametreler, elektiriksel uyarma veya mekanik uyarma ile belirlenebilmektedir. Kurulan ölçüm sistemleri için laboratuvarlar arası karşılaştırmalara katılım sağlanmış ve yenilerine katılımlar planlanmıştır.

5. KAYNAKLAR

- [1] ISO 16063-11, Methods for the calibration of vibration and shock transducers - Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry, Geneva, 1999.
- [2] ISO 16063-21, Methods for the calibration of vibration and shock transducers - Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer, Geneva, 2003.
- [3] ISO 16063-42, Methods for the calibration of vibration and shock transducers - Part 42: Calibration of seismometers with high accuracy using acceleration of gravity, Geneva, 2014.
- [4] SRT-v11, Metrology for low-frequency sound and vibration, EMPIR Call 2019 – Energy, Environment, Normative and Research Potential
- [5] J. Havskov, G. Alguacil, “Instrumentation in Earthquake Seismology”, Springer, 2016
- [6] Wielandt, E. (2009 online): Seismic Sensors and their Calibration. - In: Bormann, P. (Ed.), New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP), Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 1-46.
- [7] C. Collette, L. Fueyo-Roza, M. Horodincea, “Prototype of a small low noise absolute displacement sensor”, IEEE Sensors Journal, vol. 14, Issue: 1 , Jan. 2014.
- [8] Laboratory and on-site Calibration on Seismometer: Practical approaches, CEA working group on Seismograph testing and evaluation 2014.08, APMP-TCAUV-DEC workshop 2014.
- [9] L. Meirovitch, Principles and Techniques of Vibrations. Prentice Hall, Ch. 3, pp. 103-139, 1997.
- [10] F. Larssonier, G. Nief, P. Dupont, P. Millier, “Seismometer Calibration: Comparison Between A Relative Electrical Method and a Vibration Exciter Based Absolute Method”, IMEKO 22nd TC3, TC5 and TC22 International Conferences, Cape Town, Republics of South Africa, 2014.
- [11] Leonard Klaus and Micheal Kobusch, Seismometer Calibration Using a Multi-Component Acceleration Exciter, 2018 *J. Phys.: Conf. Ser.* **1065** 222014
- [12] Claire Bartoli et al, Preliminary comparison on seismometer frequency response following ISO 16063-11 calibration by primary means, 2018 *J. Phys.: Conf. Ser.* **1065** 222018

TİTREŞİM ve DEPREM TESTLERİNDE KULLANILAN STANDARTLAR VE İÇERİKLERİNİN KIYASLANMASI

Eyüp Bilgiç

TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, P.K.54 41470 Gebze, Kocaeli, Türkiye

e-posta: eyup.bilgic@tubitak.gov.tr

ÖZET

Deprem, meydana geldiği bölgelerde büyüklük değerine bağlı olarak yapılarda, cihazlarda farklı düzeylerde hasarlara neden olmaktadır. Olası muhtemel hasarlardan kaçınmanın yollarından birisi; yapıları ve kullanılacak ürünleri, buldukları deprem bölgelerinin şartlarına dayanıklı kılacak şekilde tasarlamak ve üretmek ve mümkün ise testten geçmektedir. Ürünlerin deprem koşullarına ve ayrıca çalışma koşullarındaki titreşimlere dayanıklı olup olmamasının uygunluklarını test etmekte kullanılan birçok ulusal/uluslararası standart mevcuttur. Standartlar, içeriklerinde uygulanacak test yöntemleri, süreler, sınıflandırmalar hakkında bilgi vermektedir. Test alt yapılarının ürün çeşitlerine göre standartlarda tanımlanan şartlara uygun olmaları ve testlerde kullanılan ölçüm ekipmanlarının SI birimler sistemine izlenebilirliklerinin sağlanması diğer önemli bir konudur. Bu bildiride deprem testlerine yönelik olarak kullanılan standartlar ve test içerikleri, kapsamaları hakkında bilgi sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Deprem testleri, titreşim testleri, standart, izlenebilirlik.

STANDARDS USED IN EARTHQUAKE TESTS AND COMPARISON OF THEIR CONTENTS

ABSTRACT

An earthquake causes different levels of damage to structures and devices depending on the magnitude of the regions where it occurs. One of the ways to avoid possible damage is; to design and manufacture the structures and the products to be used in a way that will make them resistant to the conditions of the earthquake zones where they are in and if possible, apply the verification tests on them. There are many national/international standards used to test the suitability of products for earthquake and vibration conditions. Those standards provide information about the test methods, durations and classifications. Another important issue is that the test infrastructures shall comply with the conditions defined in the standards according to the product types and the measurement equipment used in the tests can be traceable to the SI unit system. In this paper, information about the standards, test methods and scopes for earthquake tests is presented.

Keywords: Earthquake tests, vibration tests, standard, traceability

1. GİRİŞ

Deprem, meydana geldiği bölgelerde büyüklük değerine bağlı olarak yapılarda, cihazlarda farklı düzeylerde hasarlara neden olmaktadır. Bu hasarları önlemenin yollarından birisi de ürünlerin buldukları konumlardaki olası muhtemel depremlere karşı dayanıklılıklarının kullanım öncesinde gösterilebilmesidir. Bu amaçla birçok ulusal/uluslararası standart geliştirilmiştir. Standartlar, içeriklerinde uygulanacak test yöntemleri, test süreleri ve ürünlerin sınıflandırmaları hakkında bilgi vermektedir.

Standartlar hakkında bilgi edinmek üzere standart hazırlama kuruluşları olan Türk Standartları Enstitüsü (TSE) ve The International Organization for Standardization (ISO) web sayfaları üzerinden tarama yapılmıştır. TSE, Standart Arama sayfasından Türk Standardı (TS) olarak TSE tarafından yayımlanmış milli standartlar ve CEN/CENELEC, ISO gibi diğer uluslararası standart kuruluşlar tarafından hazırlanarak yayımlanmış ve TSE tarafından uyumlaştırılmış standartların olduğu görülmüştür. Tarama işlemi Standart Arama sayfasında, başlığında titreşim, şok, deprem ve sismik kelimeleri geçen standartlar araştırılmıştır. İptal edilen standartlar dikkate alınmamıştır. (<https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/StandardAra.aspx>). Standart başlıklarında, tarama yapılan kelimelerin bazen iç içe kullanıldıkları görüldüğünden, başlığında arama yapılan her bir kelimenin sadece bir kez yer aldığı standarttan çok fazla olduğundan ayrıma gidilmemiştir. Ancak, başlığında, deprem ve sismik kelimeleri yer alan toplam 29 adet standart olduğu gözlenmiştir. ISO web sayfasında ise deprem kelimesinin İngilizce karşılığı olan earthquake kelimesi içeren tarama yapıldığında 25 adet standart mevcut olduğu görülmüştür.

Başlığında deprem/sismik kelimeleri geçen TSE tarafından yayınlanmış, uyumlaştırılmış standartların uygulama alanları aşağıdakilerle sınırlı olmakla beraber kısaca şu şekilde özetlenebilir:

- ✓ Anti sismik cihazlar
- ✓ Sismik durumlara tabi asansörler
- ✓ Yapılar:

Veri merkezi tesisleri ve altyapıları, Çelik depolama tesisleri, Köprüler, Binalar, Kuleler, direkler, bacalar, Boru hatları, Nükleer güç santralleri, Denize kurulu yapılar, vb.

- ✓ Röleler/vanalar:

Elektrik röleleri, Otomatik gaz kesme cihazları, vb.

Türkiye’de deprem alanındaki uygulamalar ile ilgili olarak Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği yayınlanmıştır [1]. Yönetmeliğin amaç ve kapsamı şöyle verilmektedir:

“MADDE 1 – (1) Bu Yönetmeliğin amacı; yenden yapılacak, değiştirilecek, büyütülecek resmi ve özel tüm binaların ve bina türü yapıların tamamının veya bölümlerin deprem etkisi altında tasarımı ve yapımı ile mevcut binaların deprem etkisi altındaki performanslarının değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi için gerekli kuralları ve minimum koşulları belirlemektir.”

Yönetmeliğin Genel İlkeler bölümünde, deprem etkisi altında yeni binaların tasarımında ve mevcut binaların değerlendirilmesinde esas alınacak deprem yer hareketi düzeylerinin yönetmelikte Bölüm 2’de verildiği; bu deprem yer hareketi düzeylerine karşılık gelen deprem etkilerinin, 22/01/2018 tarih ve 2018/11275 sayılı Bakanlar Kurulu kararı ile yürürlüğe konulan Türkiye Deprem Tehlike Haritaları (<https://tdth.afad.gov.tr/>) ile tanımlandığı ifade edilmektedir[1].

Depremi yanı sıra cihaz/ürünlerin kullanılacakları ortamda da çeşitli titreşimlere maruz kalırlar. Cihaz/ürünlerin çevre koşullarına uygunlukları Çevre Şartlarına Dayanıklılık Deneyleri [2-5] olarak adlandırılabilen deneyler kullanılarak gösterilebilir. Askeri amaçlı uygulamalar için çevresel şartlara uygunluk olarak MIL-STD-810G standardı [6] kullanılmaktadır. Bu standart, titreşim, şok, ivmelenme testlerinin yanı sıra toplamda 29 adet çevre şartlarına uyumluluk testlerini içermektedir. Testler, ürün/cihazların depolama, taşıma ve çalışma anındaki şartlara uyumluluğunu göstermek için kullanılırlar. Yer kabuğu hareketi nedeni ile oluşan deprem hareketine karşı cihaz/ürünlerin uygunlukları, yayınlanmış standartlara ve/veya uluslararası kabul görmüş kılavuzlara göre değerlendirilir [7-12]. Referanslar bölümünde verilen çevre şartlarına ve deprem/sismik hareketlere dayanıklılık deneylerine yönelik standartlar, bu kapsam için standartların tamamı olmayıp sadece bu çalışma için örnekleme niteliğindedir.

2. TİTREŞİM, DEPREM-SİSMİK HAREKETE YÖNELİK TESTLER

Titreşim veya deprem testlerine yönelik uygulamalarda test parametrelerinin seçilmesi, bu parametrelerin değişimlerdeki toleranslar, testlerin uygulanması ve değerlendirmeleri ilgili standartlarda detaylı olarak verilmektedir. Bu parametrelerden önemli oldukları düşünülenler, test tipi, frekans aralığı, ivme genliği, yer değiştirme genliği, test süresi, çevrim sayısı, tarama hızı ve sönümleme oranıdır.

Test Tipi: Test edilecek ürüne uygulanacak mekanik titreşim hareketinin tipidir. İlgili standartta tanımlanmaktadır. Test tipleri arasında en çok kullanılanlar, *Sürekli Sinüs*, *Sinüs Taraması*, *Sinüs Vurusu* ve *Zaman Geçmiş* tipinde olan sinyallerdir. Test tipine uygun olarak titreşim kontrolcülerinde üretilen elektriksel sinyaller, titreştiriciler kullanılarak test edilecek ürüne uygulanırlar.

Frekans Aralığı: Testlerin uygulanacağı alt ve üst frekans arasında kalan bölümdür. Titreşim testlerinde üst frekans 5000 Hz'e kadar çıkabilirken depremlere yönelik testlerde üst frekans 50 Hz bölgesine kadar olmaktadır. Alt frekans değeri genel olarak 0,1 Hz'ten başlamakla beraber, ilgili standartlar bu limitlerin seçilmesinde kullanılabilir yönergeleri vermektedir.

Geçiş Frekansı: Titreşim testlerinde, numuneye uygulanan sabit yer değiştirme değerinin uygulandığı frekanstan sabit ivmeye geçilen frekans olarak tanımlanabilir. Geçiş frekansında verilen yer değiştirme değeri, geçiş frekansında verilen ivme kullanılarak hesaplanan yer değiştirme değeri birbirlerine eşit olmalıdır.

İvme genliği: Test numunesine uygulanan ivme düzeyidir. İvme genliğinin birimi m/s^2 olup bazı standartlarda yer çekimi ivmesi g_n cinsinden de verildiği görülmektedir. Bu durumlar için $g_n = 10 m/s^2$ alındığı görülmektedir. Geçiş frekansı ile üst frekans arasındaki bölümde ivme genliği sabit alınmaktadır.

Yer değiştirme genliği: Test numunesine uygulanan yer değiştirme genliğidir ve birimi m 'dir. Genellikle alt frekans ve geçiş frekansı arasındaki bölümde yer değiştirme genliği sabit alınmaktadır.

Test süresi: Test numunesine seçilen test tipinin uygulanacağı süredir ve birimi, zaman birimi olan s 'dir. Ancak titreşim testlerinde genel olarak dakika biriminde de verildiği görülmektedir. Toplam test süresi için; deneylerin tek ekseninde, ikili ekseninde veya üçlü ekseninde yapılması durumu dikkate alınmalıdır. Toplam test süresini etkileyen diğer bir parametre de çevrim sayısıdır.

Çevrim sayısı: Test numunesine seçilen test tipinin kaç kez tekrarlanarak uygulanacağını belirten sayıdır.

Tarama hızı: Titreşim testlerinde alt frekanstan üst frekansa ne kadar sürede ulaşılacağını belirleyen bir parametredir. Tarama hızı genel olarak oktav/dakika biriminde verilir. Birimden de görüleceği üzere, frekans zamanla üstel olarak değişmektedir. Tarama, alt frekanstan üst frekansa artış sonrasında da alt frekansa azalış ($f_1 \rightarrow f_2 \rightarrow f_1$) şeklinde sürekli olarak uygulanır.

Sönümlenme oranı: Viskozlu sönümlenmeye sahip bir sistemde, gerçek sönümlenmenin kritik sönümlenmeye oranı [3]. Genel olarak testlerde, sönümlenme oranının %2, %5 ve %10 gibi değerler alındığı görülmektedir.

Her bir ekseninde uygulanan titreşim deneyleri için TS EN 60068-2-6 [2] standardında, tarama çevrimlerinin sayısı, dayanım süreleri ve tarama frekans aralığındaki oktav sayısı arasındaki ilişki aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$N = \frac{(f_2 - f_1) \cdot 60 \cdot 2}{\log_e 2 \cdot SR} N = \frac{(f_2 - f_1) \cdot 60 \cdot 2}{\log_e 2 \cdot SR} \quad (1)$$

$$X = \frac{\log_e \left(\frac{f_2}{f_1} \right) \cdot 2}{\log_e 2} X = \frac{\log_e \left(\frac{f_2}{f_1} \right) \cdot 2}{\log_e 2} \quad (2)$$

$$T = \frac{X}{SR} = \frac{\log_e \left(\frac{f_2}{f_1} \right) \cdot 2}{\log_e 2 \cdot SR} T = \frac{X}{SR} = \frac{\log_e \left(\frac{f_2}{f_1} \right) \cdot 2}{\log_e 2 \cdot SR} \quad (3)$$

- N : $(f_1 \rightarrow f_2 \rightarrow f_1)$ tarama çevriminde zorlama çevrimlerinin sayısı,
 f_1 : tarama alt frekansı Hz,
 f_2 : tarama üst frekansı Hz,
 SR : tarama hızı (sweep rate) oktav/dakika,
 X : bir tarama çevrimindeki oktavların sayısı,
 T : tarama süresi, dakika.

Tarama süresi, genel olarak titreşim testlerinde kullanılan bir terimdir, değeri dakika biriminde verilmektedir. Deprem testlerinde tarama süresine karşılık olarak test süresi terimi kullanılmakta olup sürenin, deprem süreleri göz önüne alındığında saniye biriminde verildiği görülmektedir (bkz. TS EN IEC60068-3-3). Deprem/sismik etki altında bulunan yapı, ürün, malzemelere yönelik testler, ilgili standartlarda tanımlanmıştır. Uygulanan testleri, standartların, kapsamı dahilinde olan yapı, ürün, malzemelere göre kıyaslayabilmek için aşağıdaki standartlar örnek olarak seçilmiştir.

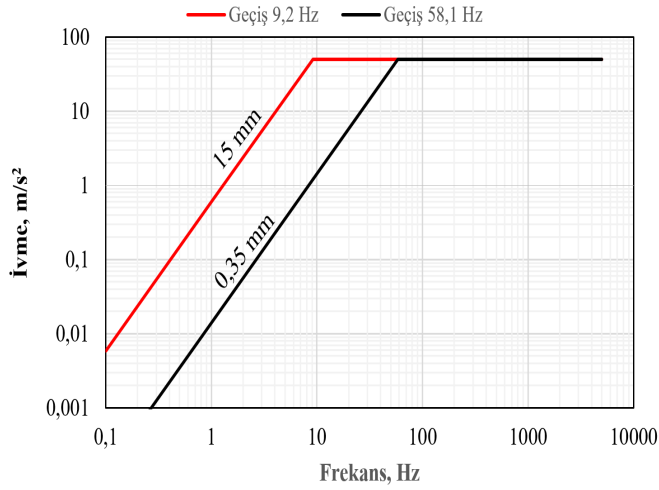
2.1. Çevre Şartlarına ve Depreme Dayanıklılık Deneyleri

Çevre şartlarına dayanıklılık deneylerine örnekleme olması açısından aşağıda birkaç standardın içeriği özetlemiştir.

2.1.1. TS EN 60068-2-6 Standardı [2]

Bu standart deney F_c olarak adlandırılan sinüs biçimli titreşim deneylerine yönelik standarttır. Standardın amacı, deney numunelerinin performanslarındaki zayıflıklarının- bozulmalarının belirlenmesi ve kabul edilebilmeleri hakkında karar vermektir. Standart bazı durumlar için mekanik sağlamlaştıklarının gösterilmesi için de kullanılmaktadır. Test numuneleri, gemilerde, hava araçlarında (uçak, helikopter), kara taşıtlarında ve uzay uygulamalarında kullanılan bileşenler, donanım ve diğer elemanlar olabilir. Test numunesi, belirlenen sürede, farklı frekanslarda veya belirlenen bir frekans aralığında sinüs biçimli titreşime tabi tutulur. Testler; frekans taraması ve sabit frekansta dayanım testi olarak yapılmaktadır.

Standardın kullanılabileceği genel olarak frekans aralığı 0,1 Hz – 5000 Hz'tir. Alt frekans f_1 (0,1 Hz -100 Hz), üst frekans f_2 (10 Hz - 5000 Hz) aralığındaki değerlerden oluşmaktadır. Alt ve üst frekanslardan oluşan farklı kombinasyonlar standartta verilmiştir. Uygulanacak titreşim genliği frekans bölgesi içerisinde geçiş frekansına göre değişmektedir. Titreşim genlikleri, alt frekans bölgesinden geçiş frekansına kadar sabit yer değiştirme, geçiş frekansından üst frekansa kadar sabit ivme şeklinde olmaktadır. Bu testlerde (8–10) Hz ve (58–62) Hz olmak üzere iki ayrı frekans geçiş frekansları vardır. (8–10) Hz geçiş bölgesi için bu bölgenin üzerindeki sabit ivme genlikleri $1 \text{ m/s}^2 - 50 \text{ m/s}^2$ aralığında olurken bunlara karşılık gelen geçiş bölgesi altındaki sabit yer değiştirme değerleri 0,35 mm – 15 mm arasındadır. Benzer olarak (58–62) Hz geçiş bölgesi için bu bölgenin üzerindeki sabit ivme genlikleri $5 \text{ m/s}^2 - 500 \text{ m/s}^2$ aralığında olurken bunlara karşılık gelen geçiş bölgesi altındaki sabit yer değiştirme değerleri 0,035 mm – 3,5 mm arasındadır. Titreşim testi, her bir ekseninde frekans taraması şeklinde ve sürekli olarak yapılmalıdır. Tarama hızı, 1 dakika/oktav olmalıdır. Titreşim genlikleri ve test süresi (tarama çevrimleri sayısı), testi yapılan ürüne yönelik standarttan alınmalıdır. Testlere yönelik bilgi niteliğindeki Deney Kılavuzu standardın eklerinde verilmiştir. Her iki frekans geçiş bölgesinde bulunan 50 m/s^2 lik ivme için frekansa bağlı titreşim genliği Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Sinüs biçimli titreşim testi için titreşim genliği-frekans grafiği

Örnek bir uygulama alanı, büyük güç santralleri ve genel endüstriyel kullanım için amaçlanan donanım verilebilir. Test parametreleri (10 – 55) Hz aralığında 0,35 mm sabit yer değıştirme genliği için her bir eksendeki tarama çevrimi sayısı 20 verilmektedir. Tarama hızı 1 oktav/dakika olması dikkate alındığında bir eksen için test süresi 1 saat 38,4 dakika olarak hesaplanır. Standartta test süresinde \pm %10 toleransı dikkate alınarak test süresi 1 saat 45 dakika verilmektedir. Üç eksen için toplam test süresi ise 5 saat 15 dakika olarak elde edilmiştir. Diğer uygulama alanlarına yönelik örnekler standartta verilmiştir.

2.1.2. TS EN 60068-2-57 Standardı [3]

Bu standart deney F_f olarak adlandırılan zaman geçmişi (time history) ve sinüs vuru (sine beat) biçimli titreşim deneylerine yönelik standarttır. Bir test numunesinin geçici bir titreşime dayanma yeteneğini zaman geçmişi ve sinüs vuru yöntemiyle belirlemek için standart bir deneyi kapsamaktadır. Geçici titreşim; deprem, patlamalar, araç içerisindeki kullanım ve taşınma sırasındaki zorlama nedeni ile oluşabilir. Deneyler, numune ile ilgili standartta belirtilen eksenlerde yapılmalıdır.

Sinüs vuru deneyinde test numunesi, önceden belirlenmiş sayıda sinüs vuru-larına sahip olan sabit frekanslarda uyarılır. Sabit deney frekansları test numunesine özel frekanslar olabilir. Bu sabit deney frekansları, deney frekansları olarak veya sinüs biçimli titreşim deneyi (IEC 60068-2-6) vasıtasıyla tanım-

lanan kritik frekanslar ya da her ikisi olarak önceden belirlenmektedir. Sinüs vuruları arasında bekleme süreleri verilir. TS EN 60068-2-57 standardında sinüs vurusunun genel ifadesi aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$a(t) = a_0 \cdot \sin(2\pi ft) \cdot \sin\left(\frac{2\pi ft}{\rho}\right) \quad a(t) = a_0 \cdot \sin(2\pi ft) \cdot \sin\left(\frac{2\pi ft}{\rho}\right) \quad (4)$$

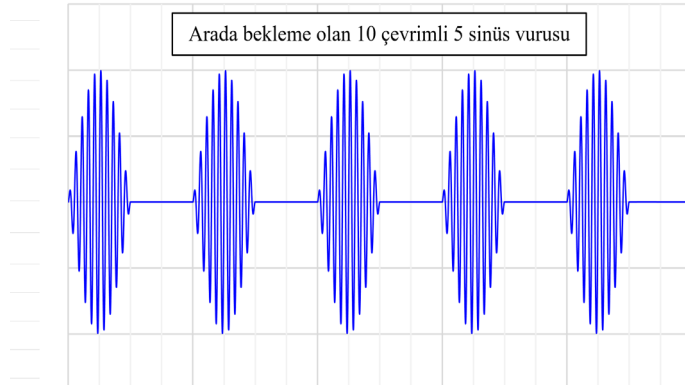
$a(t)$: ivme, m/s^2

a_0 : uygulanan ivme seviyesi, m/s^2

f : deney frekansı, Hz

t : anlık zaman, s

r : deney frekansı ile genel durumda modüle eden frekans arasındaki oran 10 çevrimli 5 sinüs verisine ait grafik Şekil 2'de verilmiştir. Grafikte bekleme süresi rastgele seçilmiştir ancak buna yönelik kısıtlama standartta verilmiştir.

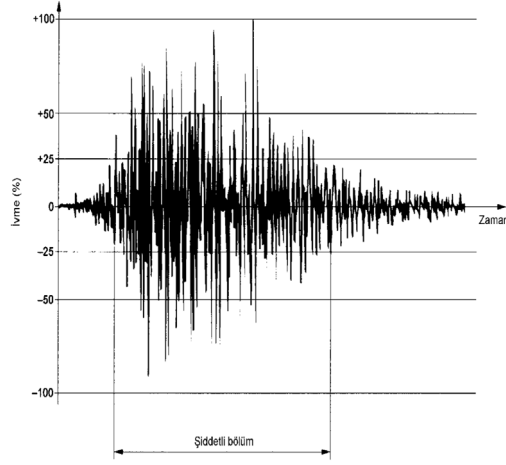


Şekil 2. 10 çevrimlik 5 sinüs vuruğu grafiği, vuru aralarında bekleme süreleri eklenmiştir

Zaman geçmişi, meydana gelen bir olayın; ivme, hız veya yer değiştirmesinin zamana göre kaydıdır. Bir olaya ait zaman geçmişi:

- Doğal bir olay (doğal zaman geçmişi)
- Gelişigüzel bir örnekleme veya sentezlenmiş bir işaret (yapay zaman geçmişi)

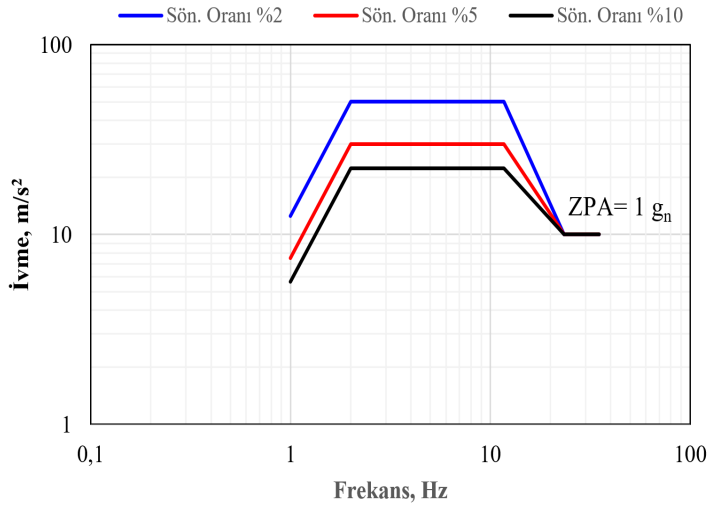
ile elde edilebilir veya oluşturulabilir [3]. Zaman geçmişi tipik bir örnek Şekil 3'te verilmiştir. Zaman geçmişinde şiddetli bölüm önemli bir bölümdür. Zaman geçmişi testlerinde, uygulanan test sinyalinin şiddetli bölümü, ivmenin ilk %25'lik bölümü ile son %25'lik bölümü arasındaki kısımdır.



Şekil 3. Tipik zaman geçmişi grafiği [3]

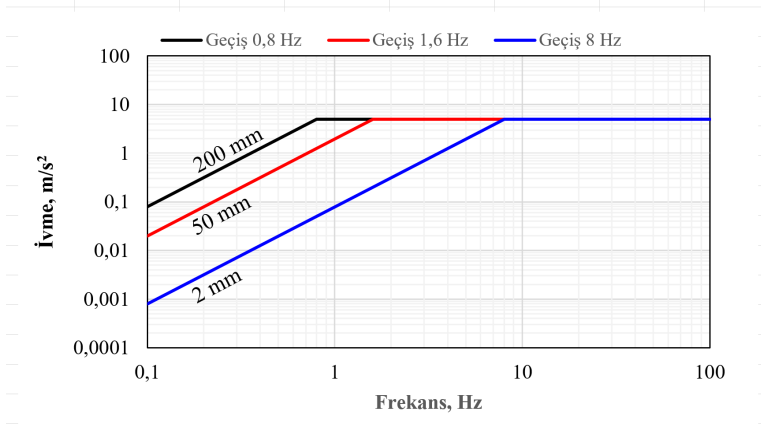
Standardın kullanılabileceği genel olarak frekans aralığı 0,1 Hz - 2000 Hz'tir. Alt frekans f_1 (0,1 Hz -100 Hz), üst frekans f_2 (10 Hz - 2000 Hz) aralığındaki değerlerden oluşmaktadır. Alt ve üst frekanslardan oluşan farklı kombinasyonlar standartta verilmiştir.

Zaman geçmişlerinin sayısı, tanımlı bir değer belirtilmemişse 1, 2, 5, 10, 20 ve 50 serisinden, süresi ise saniye cinsinden 1, 2, 5, 10, 20 ve 50 serilerinden birisi seçilir.



Şekil 4. Sönümlenme oranı %2, %5 ve %10 için (1 – 35) Hz aralığındaki istenilen deney spektrumu, ZPA sıfır periyot ivmesi $1 g_n$ olarak alınmıştır [3]

Sinüs vuru deneylerinde, 0,8 Hz, 1,6 Hz ve 8 Hz olmak üzere üç adet geçiş frekansı tanımlanmıştır. Deney ivme değerleri 0,8 Hz için geçiş frekansının altında yer değiştirme (tepe) değerleri (40 mm – 200 mm) geçiş frekansının üstünde ivmeler ($1 \text{ m/s}^2 - 5 \text{ m/s}^2$); 1,6 Hz için geçiş frekansının altında yer değiştirme (tepe) değerleri (10 mm – 200 mm), geçiş frekansının üstünde ivmeler ($1 \text{ m/s}^2 - 20 \text{ m/s}^2$); 8 Hz için geçiş frekansının altında yer değiştirme (tepe) değerleri (0,4 mm – 20 mm), geçiş frekansının üstünde ivmeler ($1 \text{ m/s}^2 - 50 \text{ m/s}^2$) olarak verilmektedir. Sinüs vuru deneylerinde her bir geçiş frekanslarında 5 m/s^2 lik ivme düzeyi için elde edilen grafikler Şekil 5'te verilmiştir.

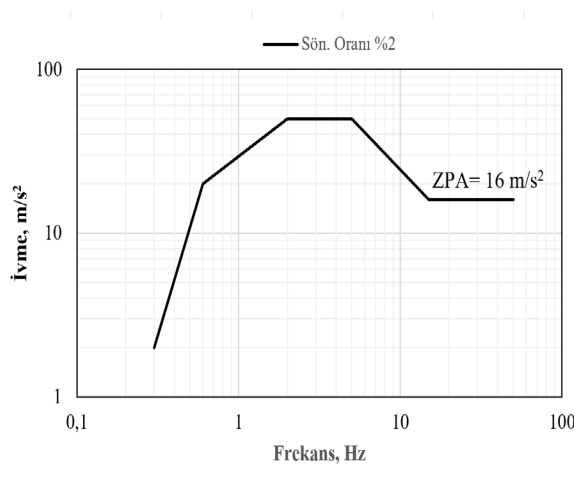


Şekil 5. Sinüs vuru titreşim testlerinde titreşim genliği-frekans grafiği

2.1.3. TS EN 61587-2 Standardı [7]

Bu standart, sadece elektronik cihazlar için kullanılan kabinler ve rafların mekanik yapılarının IEC 60917 ve IEC 60297 standartları için deneyleri kapsamındaki sismik testleri için kullanılmaktadır. Raf ve kabinlerin içine konulması düşünülen elektronik cihaz veya sistemleri kapsamaz. Aynı zamanda içerisinde veya dışarısında sismik yalıtıcı içeren kabin veya raflara bu standart uygulanmaz. Testler kabin ve raflar yüklü koşullarda test edilmelidir. Testler kabin içerisine, standardın içerisinde tanımlanan yükler, yine standart içerisinde tanımlanan konumlara yerleştirilerek üç eksen de gerçekleştirilir. Testler tek eksenli veya üç eksen eş zamanlı şartlarında gerçekleştirilir. Testlerin gerçekleştirildiği frekans aralığı 0,5 Hz – 50 Hz'tir. Titreştiricinin alt limitinde yer değiştirme kısıtlaması olması durumunda testler 1 Hz'ten sonra da yapılabilmektedir.

Test tepki spektrumu (TRS), İstenilen tepki spektrumuna (RRS)'a eşit veya toleranslar dahilinde fazlası olabilir. Bu durumlar için %2 veya %3 değerindeki sönümlenme oranı kullanılır. Tek eksenli testlerde istenilen tepki spektrumu Şekil 6'da verilmiştir. Burada verilen test tepki spektrumu kullanılarak zaman geçmiş sinyali yapay olarak oluşturulur. Zaman geçmiş sinyalinin şiddetli kısmı 18 s veya daha fazla olması beklenir. Üç eksenli testlerde istenilen test spektrumu yatay ve düşey eksenlerde farklıdır. Sönüm oranı olarak %3 alınır. Sıfır periyot ivmesi yatay eksen için 12 m/s^2 , düşey eksen için 6 m/s^2 alınmalıdır. Zaman geçmiş sinyalinin şiddetli kısmı 30 s veya daha fazla olması beklenir.



Şekil 6. Sönümlenme oranı %2 için (0,5 – 50) Hz aralığındaki istenilen test spektrumu; ZPA, sıfır periyot ivmesi 16 m/s^2 alınmıştır. [8]

2.1.4. TS EN IEC 60068-3-3 Standardı [8]

TS standardı için ele alınan IEC 60068 standardının bu bölümü öncelikle, elektroteknik cihazlara uygulanır ancak uygulanması, diğer cihaz ve alt elemanlara da genişletilebilir. Gerçek boyutlardaki numunelerin titreşim uyarıcı ile uygulan sismik testleri ile ilgilidir. Amaç, numunenin deprem sırasında ve sonrasında maruz kalınan mekanik gerilme ve yer değiştirmeler için fonksiyonlarını sağladığının gösterilmesidir.

Standart, sismik deneyler için uygulanabilecek testler için genel bilgileri içermektedir. Tablo 1'de bu standart kapsamındaki sismik deneyler için kullanılacak test tipleri verilmektedir. Bu standart kapsamında Tablo 2'de zemin ivme düzeyleri a_g , test numunelerinin bulunduğu sismik aktivite bölgeleri

dikkate alınarak verilmiştir. Zemin ivme düzeyleri, test numunesine uygulanacak test ivmesinin hesaplanmasında kullanılan parametrelerden biridir ve denklem (5)'e göre test ivmesini doğrudan etkilemektedir.

Tablo 1. Test tipinin seçilmesi

Test Dalgası	Test Tipi	
	Tek Eksende Test	Çoklu Eksende Test
Sinüs Taraması	Tavsiye edilir	Normalde tavsiye edilmez
Sinüs Vurusu	Tavsiye edilir	Normalde tavsiye edilmez
Zaman Geçmiş	Uygun	Tavsiye edilir
Sürekli Sinüs	Uygun	Normalde tavsiye edilmez

Tablo 2. Zemin İvme Düzeyleri

Sismik Aktivite Bölgesi				
Bölge 0	Bölge 1	Bölge 2	Bölge 3	Bölge 4
Zemin ivmesi, a_g (m/s ²)				
0	1	2	3	5

Test frekans aralığı 1 Hz -35 Hz olarak belirtilmiştir. Test sinyalinin formu ise Şekil 4'deki gibidir. Test ivmesi, Denklem (5) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$a_t = a_g \cdot K \cdot D \cdot \alpha \cdot G \quad (5)$$

a_t : test ivmesi, m/s²

a_g : zemin ivmesi (sıfır periyod ivmesi), m/s²

K : yapıların zemin ivmesini artırma faktörü, (1 - 1,5 - 2 - 3 değerlerini alır)

D : yön faktörü, (yatay yönlerde 1; tanımlı yükseklikte dikey için 0,5; tanımsız yükseklikte 1)

a : dalga faktörü, (deney dalgası ve sönümleme oranına bağlı olarak 0,2 - 1 arasında değer alır)

G : geometrik faktör, (eksenler arası etkileşim yok ise 1, var ise 1,5 değerini alır)

2.1.5. TS EN 60255-21-3 Standardı [9]

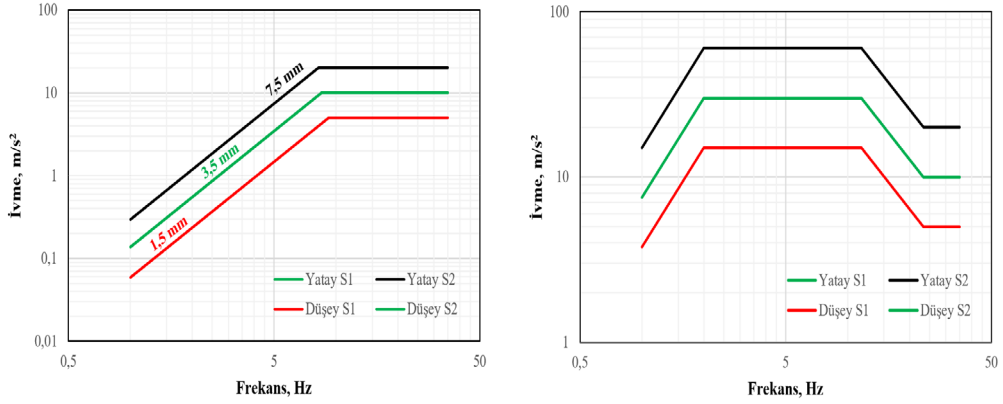
Bu standart, çıkış kontaklı veya çıkış kontaklı elektromekanik ve statik ölçme röleleri ile koruyucu donanımlara uygulanan sismik deneyleri içerir:

Metot A - Tek eksende sinüs dalgalı sismik deneyler

- Frekans aralığı: (1 Hz – 35 Hz)
- İvme,
 - (Sınıf 1 için yatay eksen 10 m/s², düşey eksen 5 m/s²)
 - (Sınıf 2 için yatay eksen 20 m/s², düşey eksen 10 m/s²)
- Geçiş frekansındaki yer değiştirme genliği
 - (Sınıf 1 için yatay eksen 3,5 mm, düşey eksen 1,5 mm)
 - (Sınıf 2 için yatay eksen 7,5 mm, düşey eksen 3,5 mm)
- Tarama hızı 1 oktav / dakika ve tarama hızı çevrim sayısı 1

Metot B - Çift eksende çok frekanslı gelişigüzel sismik deney

- Frekans aralığı: (1 Hz – 35 Hz)
- Standart tepki spektrumu: Şekil 8'deki formda
- Sıfır Periyod ivmesi
 - (Sınıf 1 için yatay eksen 10 m/s², düşey eksen 5 m/s²)
 - (Sınıf 2 için yatay eksen 20 m/s², düşey eksen 10 m/s²)
- Zaman geçmişlerin süresi 20 s, sayısı 8'dir. Ara bekleme süresi 60 s. Zaman geçmişinin şiddetli kısmı %10'luk tolerans içinde olmak şartıyla toplam sürenin yarısı kadar olmalıdır.
- Sönüm oranı %5



Şekil 7. Metot A (solda) ve Metot B (sağda) için ivme-frekans grafikleri

3. SONUÇ

Ürün/cihazların çevresel şartlara ve depreme dayanma, uygunlukların gösterilmesinde kullanılan standartlar incelenmiştir. Testlerde kullanılan yöntemler hakkında bilgi verilmiştir. Aynı tip test yöntemlerinde örneğin sinüs titreşim testlerinde, test spektrumlarının format olarak birbirleri ile aynı olmalarına karşın, buradaki ana fark farklı geçiş frekanslarının olmasıdır. Bu durum geçiş frekansının üstündeki bölgede sabit ivme değerlerinin, geçiş frekansının altındaki bölgede sabit yer değiştirme değerlerinin farklılaşmasına sebep olmaktadır. Genelde tarama hızlarının 1 oktav/dakika olduğu görülmektedir. Çok frekanslı veya zaman geçmişi dalga şekli kullanılan testlerdeki istenilen test spektrumlarının birbirlerinden farklı oldukları görülmüştür. Farklılıklar, test frekans aralığından (f_1 , f_2) kaynaklanmaktadır. Titreşim seviyesinin alt frekanstan (f_1) itibaren geçiş frekansına kadar artış davranışı genelde 12 dB/oktav değerindedir. Buna karşın testlerde, Şekil 4 ve Şekil 6'dan da görüleceği üzere, geçiş frekansından sonraki bölümlerde uygulanan ivme değerinin sıfır periyod ivme değerinin (ZPA) başladığı frekansa olan azalış davranışı, testlerdeki ZPA değerleri ve testlerin yapıldığı üst frekans (f_2) değerleri farklılık göstermektedir. Testlerde uygulanan ivme düzeyleri, Şekil 4'ten de görüleceği üzere seçilen sönümlenme oranına bağlıdır. Sönümlenme oranı için ise çoğu standartta %2 ve %3 değerlerinin kullanıldığı görülmektedir.

Depreme yönelik testlerin genel olarak 50 Hz'ten küçük frekans bölgesinde yapıldığı, buna karşın çevresel şartlara dayanıklılık testlerinin ise 5000 Hz'e kadar olan bölgede yapıldığı anlaşılmaktadır. Bu kapsamda test alt yapıları oluşturulurken yer değiştirme ve ivme limitleri, frekans ve test numunesinin

kütlesi ile ilişkilendirilmeli ve özellikler titreştirici seçimlerinde kullanılması gerektiği göz ardı edilmelidir.

4. KAYNAKLAR

- [1] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Resmî Gazete, 18 Mart 2018 Pazar, Sayı: 30364 (Mükerrer).
- [2] TS EN 60068-2-6: Nisan 2013 - Çevre Şartlarına Dayanıklılık Deneyleri - Bölüm 2-6: Deneyler - Deney F₁: Titreşim (Sinüs Biçimli).
- [3] TS EN 60068-2-57: Şubat 2014 - Çevre şartlarına dayanıklılık deneyleri - Bölüm 2-57: Deneyler - Deney F₁: Titreşim - Zaman geçmişi ve sinüs vuru yöntemi.
- [4] TS EN 60255-21-1/Ocak 2002 Elektrik Röleleri - Bölüm 21: Ölçme Röleleri ve Koruyucu Donanımlar Üzerine Titreşim, Mekanik Darbe, Çarpma ve Sismik Deneyler - Kısım 1: Titreşim Deneyleri (Sinüs Biçimli).
- [5] ASTM Designation: D4169 – 16 Standard Practice for Performance Testing of Shipping Containers and Systems.
- [6] MIL-STD-810H, 2019, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, Department of Defense, USA.
- [7] TS EN 61587-2 Mart 2012 Elektronik donanım için mekanik yapılar- IEC 60917 ve IEC 60297 standartları için deneyler- Bölüm 2: Kabinler ve raflar için sismik deneyler.
- [8] TS EN IEC 60068-3-3 Aralık 2019 Çevre şartlarına dayanıklılık deneyleri – Bölüm 3-3: Destek dokümantasyonu ve kılavuz – Donanım için sismik deney yöntemleri.
- [9] TS EN 60255-21-3/Kasım 2000 Elektrik Röleleri - Bölüm 21: Ölçme Röleleri ve Koruyucu Donanımlar Üzerine Titreşim, Mekanik Darbe, Çarpma ve Sismik Deneyler - Kısım 3: Sismik Deneyler.
- [10] IEEE Std 693™-2018 IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations
- [11] ICC Evaluation Service Acceptance Criteria for Seismic Certification by Shake-Table Testing of Nonstructural Components, Ac156 October, 2010.
- [12] IEEE/IEC 60980-344-202 IEEE Standard for Seismic Qualification of Equipment for Nuclear Power Generating Stations.

SÜLEYMANİYE CAMİ'NİN KUBBESİNDE YER ALAN SEBULARIN AKUSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Gülrihan ATAY¹

Bilkent Üniversitesi, Çankaya, Ankara, Türkiye
e-posta: gulrihan.atay@bilkent.edu.tr

Zühre SÜ GÜL²

Bilkent Üniversitesi, Çankaya, Ankara, Türkiye
e-posta: zuhre@bilkent.edu.tr

ÖZET

Sebuların üst yapı elemanları olarak kullanımı özellikle orta çağ yapılarında sıklıkla karşılaşılan bir uygulamadır. Bu elemanların akustik kontrol amaçlı mekâna yerleştirilen yapı elemanları olduğu önerisi güçlü olmakla birlikte elemanların yapı içerisindeki ana işlevleri belirsizliğini korumaktadır. Mimar Koca Sinan'ın eserlerinde çokça gözlemlenen bu uygulamanın yapıların akustiğine sağladığı katkının deneysel çalışmalarla incelenmesi, bu elemanların yapıda bilinçli olarak boşluklu rezonatör olarak kullanılıp kullanılmadığının bilimsel tespiti için önem arz etmektedir. Bu çalışmanın amacı, Süleymaniye Cami'nde yer alan sebuların hacim içerisindeki ses enerjisinin kontrolüne katkısını tartışabilmektir. Çalışma öncelikle bir arşiv araştırması ile başlar. Buna göre, Süleymaniye Cami'nin kubbesinde tespit edilen sebuların özgün ölçülerinde tekrar üretimini ve bu üretim üzerinden gerçekleştirilen empedans tüpü ölçümlerini kapsar. Sonuç bölümünde elde edilen öncü veriler üzerinden sebuların ses yutma performansları ve camii akustiğine etkileri değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Helmholtz rezonatörü, sebu, ses yutma katsayısı, empedans tüpü ölçümleri, cami akustiği

INVESTIGATION OF THE ACOUSTICAL PROPERTIES OF THE CLAY POTTERY EMPLOYED IN THE DOME OF SÜLEYMANİYE MOSQUE

ABSTRACT

Employment of clay pots presumably as cavity resonators is a common practice especially in the medieval age structures throughout Europe and Near East. They are also present in medieval Ottoman Architecture including Süleymaniye Mosque designed by Sinan the Architect Laureate. Although these elements placed in the dome of Süleymaniye are known to be employed for improving the acoustical quality of the space, a scientific account regarding their sound-absorption performance is needed so as to understand whether they are actually employed as cavity resonators. Thus, the objective of the study is to initiate a discussion on their precise contribution to the acoustics of the mosque. The study covers an archival research phase and then proceeds with the impedance tube measurements conducted with the reproduced sample of an actual-sized clay pot employed in the structure. In the conclusion part, sound-absorption performance of clay pots and their possible contribution to the mosque acoustics are discussed in respect to the preliminary data derived from the impedance tube measurements.

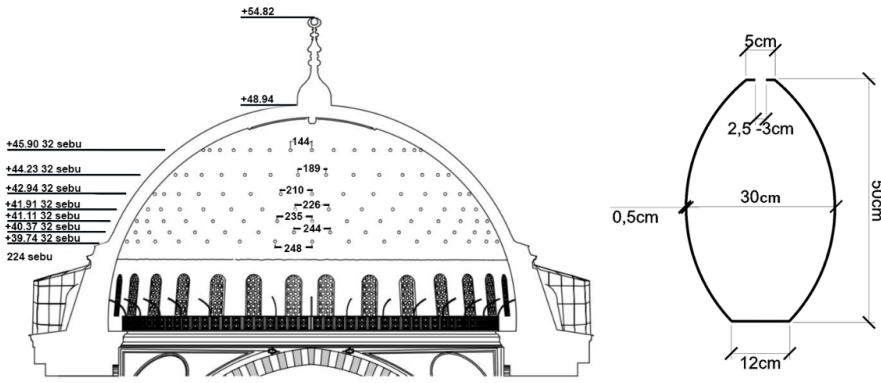
Keywords: *Helmholtz resonator, clay pots, sound absorption coefficient measurements, impedance tube measurements, mosque acoustics*

1. GİRİŞ

Kil çömlerlerin ortaçağ ve erken-yeniçağ başta olmak üzere yapı elemanları olarak kullanıldığı bilinmektedir. Mimaride farklı amaçlara hizmet eden bu kullanım, Avrupa ve Yakın Doğunun yanı sıra Anadolu topraklarında da gözlemlenmiştir. *Sebu* olarak da adlandırılan bu topraktan yapıma çömlerler; yapının havalandırılması, yapı yükünün hafifletilmesi ve taşıyıcı eleman olarak kullanılmalarının [1] yanı sıra yapıda akustik kontrolün sağlanması bağlamında süregelen tartışmaların odağı olmuşlardır. [2] Bu tartışmalar, formlarındaki benzerlik itibarıyla *sebuların* yapılarda boşluklu/kovuk rezonatör, bir diğer adıyla Helmholtz rezonatörü, olarak işlev gördüğü fikri üzerine yoğunlaşmaktadır. Dünyada da *sebuların* yapıların hacim akustiğini iyileştirdiği öngörülen kullanımları çeşitli çalışmalar dâhilinde incelenmiştir. Bu çalışmalardan bazıları; Fransa'da gerçekleştirilen ve çevre ülkelerden yaklaşık 50 kiliseyi kapsayan incelemeler [3], Sırbistan'da [4, 5], Rusya'da [6], İsviçre'de [7, 8], Yunanistan'da [9] ve Avrupa kıtasındaki benzer örnekleri kapsayan diğer çalışmalar [10] olarak sıralanabilir.

Sebuların yapıda akustik amaçlı kullanımlarında Anadolu ve Rumeli'de akla gelen ilk isimlerden birisi Mimar Koca Sinan'dır. Sinan'ın kalfalık eseri olarak adlandırdığı 1557 tarihli Süleymaniye Cami, son restorasyon çalışmalarında cami kubbesinde tespit edilen 224 adet *sebunun* ardından, [11] tarihi yapılarda bulunan kil elemanların yapıların akustiğe katkısına dair incelemelerdeki ilgi odağı konumunu sağlamlaştırmıştır. Süleymaniye Cami, 75000m³ akustik etkileşimli iç hacme sahip anıtsal boyutlarda bir Klasik Dönem Osmanlı yapısıdır. Kare kütleli merkezi plana sahip yapının 26,2 metre çapında ve 49,50 metre yüksekliğindeki devasa kubbesi 4 adet fil ayağının üzerinde yükselir. [12] Ana kubbe, Kuzey-Güney aksında yerleştirilen ve eteklerinde ikişer eksedra ile desteklenen yarım kubbeler ile beslenir. Kare taban alanlı ana kitlenin Doğu ve Batısında beş küçük kubbe ile örtülmüş yan sahınlar yer alır. Ömer Lütfi Barkan tarafından 1974 tarihinde günümüz Türkçesine çevrilip derlemesinin yapıldığı Süleymaniye Cami ve imaretinin inşaatına ait muhasebe defterlerinin 88.'sinde, "cami içinde sadânın aksini kuvvetlendirmek için" kubbeye yerleştirilmek üzere satın alınmış 255 adet *sebunun* varlığından söz edilir. [13] Buna ek olarak 2007-2011 tarihleri arasında gerçekleştirilen restorasyon uygulamaları sırasında 224 adet *sebunun* kubbe yapısının tuğla örgülerinin içinde ışınsal olarak yerleştirildiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmalarda ana kubbe kasağının üstünden başlayarak +39,74 metre kotundan +45,90 metre kotuna dek yükselen 7 halkada eşit aralıklarla yerleştirilmiş 32'şer çömlük bulunmuştur. [11] Çömlerlerin ağızlarının caminin iç mekânına açılması, *sebu* kullanımının yapının birçok çağdaşında olduğu üzere üst yapının hafifletilme

kaygisından çok akustik kontrol amaçlı olabileceği fikrini güçlendirmektedir. Bahsi geçen *sebular* 50 cm yüksekliğinde ve en geniş olduğu noktada 30cm çapa sahip kulpsuz çömleklerdir. Restorasyon şantiye şefi mimar Nilgün Olgun, *sebuların* 2,5 ila 3 cm arasında değişen çaplardaki deliklerle iç mekâna bağlandıklarını belirtmiştir. [14] Restorasyon çalışmalarında kubbe yapısında ve bazı *sebular*da çatlaklar tespit edilmiştir. Çömleklerin orijinal hallerindeki olası akustik işlevlerinin korunması amacıyla *sebu* içlerine yerleştirilen naylon torbalar yardımıyla çatlaklara hidrolik kireç enjeksiyonu uygulanmış ve çatlaklar onarılmıştır. [11] Çömleklerin kubbedeki yerleşimleri ve boyutları Şekil 1'de sunulmaktadır.



Şekil 1 Süleymaniye Cami kubbesinde sebuların yerleşimleri ve sebu ölçüleri [13]

Sebuların kubbedeki yerleşimlerinin akustik kontrol amaçlı olabileceği ihtimalini destekleyen bir diğer unsur, iç-bükey kubbe formunun hacim içerisinde akustik konfor koşullarını bozan bir geometri olduğunun bilinmesidir. İç bükey yüzey, ses odaklanması gibi akustik marazlara sebebiyet vererek bazı noktalarda ses patlamaları yaratırken başka konumlarda ölü noktalar oluşturur. [15] Mekân içerisinde homojen ses dağılımının engellenmesi, hacim içerisinde sesin anlaşılabilirliğinin düşmesi ile sonuçlanır. Kubbe geometrisi içerisine gömülen yeterli miktarda *sebu*, iç bükey yüzeyde asimetrik hareketlenmeler yaratarak saçınımı artırır ve ses dalgalarının mekânda homojen dağılımını destekler. Mekânın akustiği ile ilgili gözlemlenen bir diğer problem, cami içerisinde yapılan geçmiş ölçümlerde düşük frekanslarda tespit edilen yüksek çınlama süreleridir. [15-18] *Sebuların* varlığı bahsi geçen çınlama sürelerinin düşürülmesinde etkili olmuş olabilir.

Süleymaniye Camii kubbesinde kullanılan *sebuların* yapının akustiğine katkısını anlamak için öncelikle elemanların etkin olduğu frekans aralığının

tespiti gereklidir. Çalışma üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama benzer uygulamaların gözlemlendiği tarihi yapılara dair arşiv bilgilerinin taranması, ikinci aşama analitik, deneysel ve nümerik metotlarla *sebuların* aktif olduğu frekans aralığındaki ses yutma katsayılarının ölçülmesidir. Üçüncü aşama ise elde edilen ses yutma katsayılarının hacim akustiği parametrelerine etkisini gözlemleyebilmek adına gerçekleştirilen ışın izleme benzetimleridir. Birinci aşamanın sonuçları bir başka çalışmada özetlenmiştir. [19] Bu bildiri, çalışmanın ikinci aşamasında yer alan deneysel metot olan empedans tüpü ölçümlerini kapsamaktadır.

2. EMPEDANS TÜPÜ ÖLÇÜMLERİ

Helmholtz rezonatörlerinin etkili olduğu frekans aralığı yaygın olarak analitik hesaplamalar aracılığıyla bulunmaktadır. Bu bağlamda Süleymaniye Cami yapısında gözlemlenen *sebular* gibi boyunsuz rezonatörlerin rezonans frekanslarını bulmak için en sık kullanılan analitik denklem olan Helmholtz Formülü aşağıda belirtilmiştir. [20]

$$f_n = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi a^2}{V(l_0 + 1.7a)}} \quad (1)$$

Ancak bilinmektedir ki tarihi yapılarda kullanılan *sebuların* özellikle boyun kısımlarındaki organik ve düzensiz formlar, çömlüklerin efektif boyun uzunluklarının hesabını zorlaştırmakta, ve *sebuların* rezonans frekanslarının analitik hesabını karmaşıklaştırmaktadır. Bu nedenle tarihi yapılarda kullanılan ve “Helmholtz rezonatörü” olarak işlev gördüğü varsayılan yapı elemanlarının etkili olduğu frekans aralıklarını hesaplamak için kullanılan Helmholtz Formülü’ ne dair tartışmalar sürmektedir. Formüle göre yapılan hesaplamalarda Süleymaniye Cami kubbesinde bulunan *sebuların* rezonans frekansları yaklaşık 52 Hz olarak bulunmuştur. Bu durumda daha yüksek hassasiyete sahip sonuçlar elde edebilmek için Helmholtz Formülü’nün yanı sıra deneysel ve nümerik yöntemlerin de uygulanması gerekli görülmektedir.

Pandemi koşulları sebebiyle numunenin rastlantısal ses alanındaki (random incidence) ses yutma katsayılarının elde edileceği çınlama odası ölçümleri yapılamamıştır. Bunun yerine normal ses alanındaki (normal incidence) ses yutma katsayılarının elde edildiği empedans tüpü ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Empedans tüpünde gerçekleşen düzlemsel dalga ölçümlerinin, kubbenin iç bükey formu neticesinde *sebuların* ses dalgalarını çoğunlukla dik açılı olarak

karşılıkları göz önünde bulundurulduğunda, deney düzeneğinin camideki koşullara yakın olduğu yorumu yapılabilir.

Ölçümlerde S.C.S Kundt Tüpü ile ISO 10534-2: 1998 standardına göre gerçekleştirilen transfer fonksiyon metodu uygulanmıştır. Ses yutma katsayısı (α) ölçümlerinde 2 adet eşlenik mikrofon kullanılmıştır. *Sebunun* 50 Hz -1000 Hz aralığındaki ses yutumu için 100 mm iç çapa sahip büyük tüp kullanılırken, 1000 Hz-5000 Hz aralığındaki ses yutma performansının ölçümü için 28mm iç çapa sahip küçük tüp kullanılmıştır. Ölçümlerden önce mikrofon ve tüpler kalibre edilmiştir.



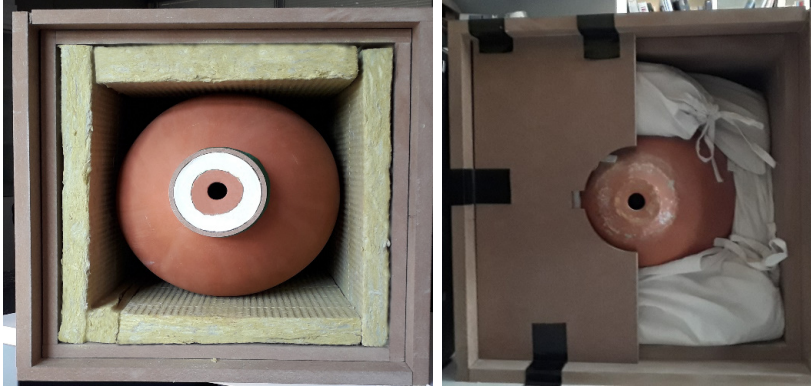
Şekil 2 Empedans tüpü deney düzeneği

Empedans tüpü ölçümleri için öncelikle Süleymaniye Camii kubbesinde bulunan *sebuların* birebir ölçülerinde bir numune Avanos'ta torna üzerinde üretilmiştir. Üretilen numune görseli Şekil 3'te gösterilmektedir. Empedans tüpü ölçümlerinde kullanılan numuneler, standart ölçümlerde tüpün ön bölümüne mühürlenerek tüp içi ve dışı arasındaki hava geçişini engelleyen numune tutucusu vasıtasıyla cihaz içerisine yerleştirilmektedir. Mevcut durumda *sebu* boyutlarının empedans tüpü iç çapından büyük olması sebebiyle numune tutucu arka ünite kullanılamamış, bunun yerine numunenin empedans tüpünün ağzına bağlandığı konuma yerleştirilmek üzere özel bir bağlantı elemanı tasarlanmıştır. Bu bağlantı elemanı *sebunun* ağız formuna boşluksuz oturan alçı kısım ve alçının tüpün içerisine boşluksuz yerleşmesini sağlayan MDF halkalardan oluşmaktadır.



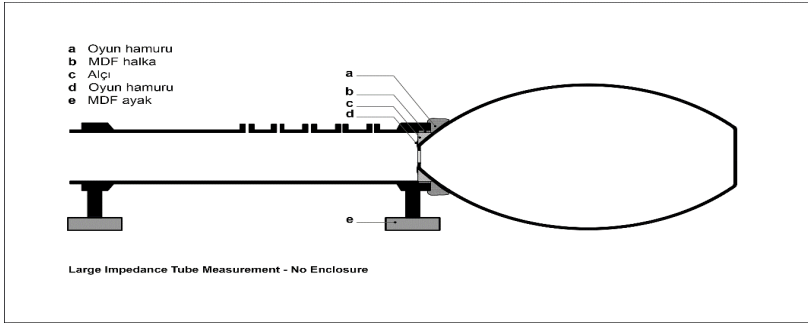
Şekil 3 Empedans tüpünde kullanılmak üzere üretilen numune (sol), bağlantı elemanı için alçı kalıp çıkarılması (orta) ve MDF halkalarla tamamlanan bağlantı elemanı (sağ)

Alçı formun üretimi için öncelikle orijinal ölçülerdeki numunenin ağız bölgesinin alçı kalıbı çıkarılmış, ardından bu kalıp üzerinden yine alçı kullanılarak esas bağlantı elemanı üretilmiştir. Bağlantı elemanının *sebuyla* ve tüple bağlantısını sağlamlaştırmak için oyun hamuru ile gerekli bölgelerde destek uygulanmıştır. *Sebuların* kubbe içerisinde tuğlalar arasına gömülmüş yerleşimlerinin yüksek doğrulukla ölçümlere aktarılabilmesi için *sebunun* arkasındaki doluluğun dereceli olarak değiştiği üç konfigürasyon hazırlanmıştır. Konfigürasyonların ilkinde *sebu* arkasında bir destek olmaksızın çömlek tüpe bağlanmıştır. Diğer konfigürasyonlarda ise *sebu*, iç ölçüleri 40cm x 40cm x 51 cm olan ve kalınlığı 3,6 cm olan MDF bir kutunun içine yerleştirilmiştir. Kutunun içi sırasıyla yaklaşık 5cm kalınlığında mineral yünü ve kum dolu torbalarla doldurularak *sebunun* titreşiminin düşürülmesi amaçlanmıştır (Şekil 4). Böylece rezonatörün kubbede tuğlaların arasına gömüldüğü pozisyona benzer koşulların deney ortamında oluşturulması hedeflenmiş ve gelen ses dalgalarının eklenen yalıtım sayesinde tüpün içine geri yansımalarının önüne geçilmesi amaçlanmıştır. 2 farklı tüpün 3 farklı konfigürasyonla kullanılması sonucu 6 farklı test düzeneği oluşturulmuştur. Sonuçlar, “Ölçüm Sonuçları ve Tartışma” bölümünde karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

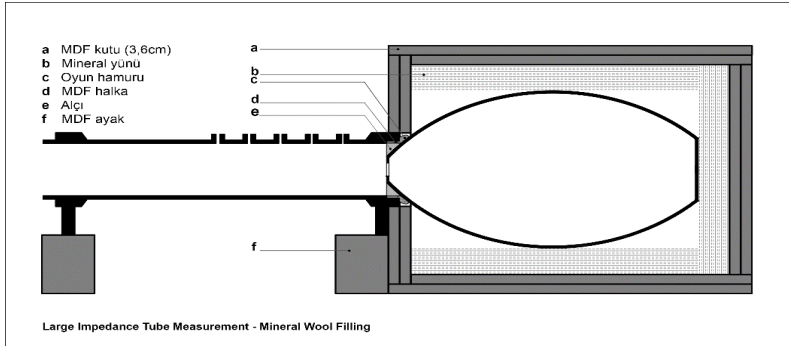


Şekil 4 MDF kutu içi dolgu malzemeleri: mineral yünü (sol); kum torbaları (sağ)

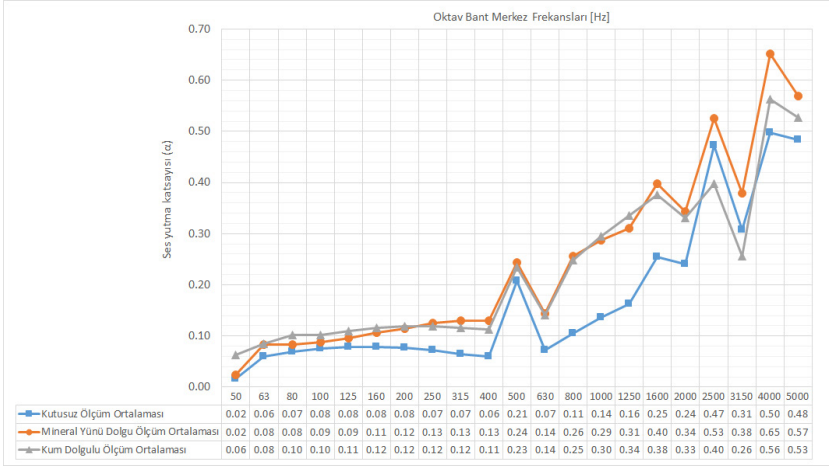
Ölçümlerin güvenilirliğini test etmek için her ölçüm yaklaşık olarak 10'ar defa tekrarlanmıştır. Şekil 5, 6 ve 7'de belirtilen kesitler kutulu konfigürasyonların büyük ve küçük tüplerle bağlantı detayını sunmaktadır. Büyük tüp veya küçük tüpte iç dolgunun değişmesi bağlantı detayını etkilememektedir.



Şekil 5 Büyük tüp, kutusuz düzenek



Şekil 6 Büyük tüp, mineral yünü dolgu



Şekil 8 1/3 oktav bantlarda üç farklı konfigürasyonun ortalama sonuçlarının karşılaştırılması

Üç farklı konfigürasyonda da 500 Hz civarında bir tepe gözlemlenmektedir. 2013 yılında camide yapılan çınlama süresi ölçümlerinde 500 Hz oktav bandında elde edilen 6.7 saniyelik değer in önceki yıllara ait ölçümlere göre 2 s daha kısa olduğu tespit edilmiştir. [15] Bu tespit, 2007 - 2011 yılları arasındaki restorasyon sürecinde kubbedeki *sebuların* onarıldığı göz önünde bulundurulduğunda dikkat çekici bir değişimdir. Tüm konfigürasyonlarda özellikle 500 Hz ve üzeri orta ve yüksek frekans oktav bantlarda elde edilen ses yutma katsayıları dikkate değer seviyelerdedir. Öte yandan özellikle 800 Hz'den itibaren gözlemlenen yüksek ses yutma katsayısı değerlerinin, toprak malzemenin porlu yüzey yapısından kaynaklı olduğu yorumu yapılabilir. Süleymaniye Camii kubbesi orijinal tasarımında özellikle orta ve yüksek frekanslarda etkili ses yutumuna sahip horasan sıva ile sıvanmıştır [21] Bu durumda yapının orijinal kubbe yüzeyinin ses yutma katsayısının, horasan sıvasının belirtilen frekans aralığındaki ses yutumuna katkılarıyla Şekil 8'de belirtilen değerlerden kısmen daha yüksek olması beklenebilir.

Çalışmanın ileriki aşamalarında empedans tüpü ölçümlerinde elde edilmiş olan öncül verilerin doğrulanması adına nümerik benzetimlerin yapılması planlanmaktadır. Yine gelecek aşamalarda elde edilen ses yutma katsayısı değerleri ışın izleme benzetimlerinde kullanılarak *sebuların* anıtsal iç mekândaki hacim akustiği parametrelerini ve akustik konforu ne derecede etkilediğinin incelenmesi amaçlanmaktadır.

TEŞEKKÜRLER

Yazarlar, 2007–2011 yılları arasında gerçekleştirilen Süleymaniye Cami restorasyonunda, kubbedeki sebuların yerleşimleri ve ölçülerinin yanısıra restorasyon sürecine dair kıymetli bilgileri paylaşan şantiye şefi Yüksek Mimar Nilgün Olgun’a teşekkürlerini sunmaktadırlar. Ayrıca ölçümlerde kullanılan empedans tüpü ve laboratuvar koşullarını sağlayan Mezzo Stüdyo’ya ve sebu- nun üretim sürecine katkılarından ötürü Galip Körükçü’ye içten teşekkürle- rini belirtmektedirler.

4. KAYNAKLAR

- [1] H. Tayla, *Geleneksel Türk Mimarisinde Yapı Sistem ve Elemanları*, vol. 1, 2 vols. İstanbul: TAÇ Vakfı Yayınları, 2007
- [2] M. Kayılı, “Sinan ve Boşluklu Rezonatörler” (Sinan and Cavity Resonators) *Gazi University Journal of Faculty of Engineering and Architecture*, vol. 3, no. 1-2, pp. 1-17, 1988.
- [3] J. C. Valière, B. Palazzo-Bertholon, J. D. Polack, and P. Carvalho, “Acoustic pots in Ancient and Medieval buildings: Literary analysis of ancient texts and comparison with recent observations in French churches,” *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 99, no. 1, pp. 70–81, 2013.
- [4] Z. Đorđević, K. Penezić, S. Dimitrijević, “Acoustic Vessels as an Expression of Medieval Music Tradition in Serbian Sacred Architecture”, *Muzikologija Musicology* vol. 22, pp. 105-132., 2017.
- [5] M. Mijic, D. Sumarac-Pavlovic, “Analysis of Contribution of Acoustic Resonators Found in Serbian Orthodox Churches”. *Building Acoustics*, vol.11, no.3, pp.197-212, 2004.
- [6] N. Kanev, “Resonant Vessels in Russian Churches and Their Study in a Concert Hall.”, *Acoustics*, vol.2, no.2, pp. 399-415, 2020.
- [7] A. P. O. Carvalho, V. Desernaulds, Y. Loerincik, “Acoustic behavior of ceramic pots used in middle age worship spaces- A laboratory analysis” In ICSV9, Orlando, USA, 2002.
- [8] V. Desernaulds, Y. Loerincik, A. P. O. Carvalho, “Efficiency of 13th century acoustic ceramic pots in two Swiss churches.” In NOISE-CON 2001, 29-31 October, 2011.
- [9] T. Zakinthinos, D. Skarlatos, “The effect of ceramic vases on the acoustics of old Greek orthodox churches”. *Applied Acoustics*, vol. 68, pp.1307-1322, 2007.
- [10] Arns, R. G., & Crawford, B. E. “Resonant cavities in the history of architectural acoustics.” *Technology and culture*, vol.36, no.1, pp.104-135, 1995.
- [11] N. Olgun, R. Şengün, “2007-2010 Yılları Arasında Yürütülen Restorasyon Çalışmalarında Süleymaniye Camii Ana Kubbesinde Yapılan Güçlendirme Çalışmaları” Türkiye ve İtalya’dan Restorasyon Uygulamaları *Sempozyumu*, 2016.
- [12] Yılmaz, Y., Kanuni Vakfıyesi Süleymaniye Külliyesi, Vakıflar Genel Müdürlüğü Yayınları, 2008.
- [13] O.L. Barkan. *Süleymaniye Camii ve İmareti İnşaatı (1550-557) Cilt 1*. Ankara: Türk Tarih Kurumu Yayınları, 1972
- [14] N. Olgun, kişisel görüşme, 18 Ocak 2020.

- [15] Z. Sü Gül, M. Çalışkan, A. Tavukçuoğlu, “Geçmişten Günümüze Süleymaniye Cami Akustiği”. *MEGARON / Yıldız Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi E-Dergisi*, vol. 9, no. 3, pp. 201-216, 2014.
- [16] Z. Sü Gül, N. Xiang, M. Çalışkan, “Investigations on sound energy decays and flows in a monumental mosque.” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol.140, no.1, pp. 344-355, 2016.
- [17] Z. Sü Gül, “Acoustical Impact of Architectonics and Material Features in the Lifespan of Two Monumental Sacred Structures.” *Acoustics*, vol.1, no.3, pp. 493-516, 2019.
- [18] Z. Sü Gül, M. Çalışkan, A. Tavukçuoğlu, N. Xiang, “Assessment of Acoustical Indicators in Multi-domed Historic Structures by Non-Exponential Energy Decay Analysis.” *Acoustics Australia*, vol.46, no.2, pp. 181-192, 2018.
- [19] G. Atay, and Z. Sü Gül. “Clay pots of Ottoman Architecture: Acoustics, structure and ventilation.” *Proceedings of Meetings on Acoustics 179ASA*. Vol. 42., 2020.
- [20] M. Long. *Architectural Acoustics*. USA: Elsevier, 2006, pp.203-204.
- [21] Kayılı, M., “Mimar Sinan’ın Camilerindeki Akustik Verilerin Değerlendirilmesi”, *Mimarbaşı Koca Sinan: Yaşadığı Çağ ve Eserleri*, İstanbul, T.C. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü, pp.545-555., 1988.

YENİ NESİL AÇIK KAYNAKLI SONLU ELEMANLAR YAZILIMI KULLANIMIYLA HARMONİK BİR DÜZLEMSEL DALGANIN SAÇINIMI İÇİN KİRLİLİK HATASININ TAHMİNİ

Mete Ögüç¹

Metzen Akustik, Sultangazi, İstanbul, Türkiye

e-posta: info@metzenakustik.com

Ali Fethi Okyar²

Yeditepe Üniversitesi, Ataşehir, İstanbul, Türkiye

e-posta: okyar@yeditepe.edu.tr

Nezih Topaloğlu³

Yeditepe Üniversitesi, Ataşehir, İstanbul, Türkiye

e-posta: nezih.topaloglu@yeditepe.edu.tr

Tahsin Khajah⁴

The University of Texas at Tyler, Tyler, Teksas, A.B.D.

e-posta: tkhajah@uttyler.edu

ÖZET

Dairesel bir silindirin eksenine dik olarak çarpan bir harmonik, düzlemsel ses dalgasının saçılmasına yönelik analitik çözüm, geniş çapta incelenen ve iyi bilinen bir problemdir. Bu çalışma, yüksek dereceden sonlu elemanlar analizinde kirlilik hatası çalışmasıyla ilgilidir. Kesin çözüm değiştirilerek, alan kesme hatası, hata hesaplamasından çıkarıldı. Dolayısıyla hesaplanan hata, kirlilik hatasının doğrudan bir göstergesidir. Hesaplama alanı içinde zaman-harmonik akustik dalgalar **çözümünü** tahmin etmek için Python tabanlı açık kaynaklı kısmi diferansiyel denklem çözücü bir platform kullanılmıştır. Orta frekanslı rejimde baz derecesinin artırılmasının kirlilik hatasını önemli ölçüde azaltabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: sonlu elemanlar analizi, akustik saçınım, soğurma sınır koşulları

**ESTIMATION OF POLLUTION ERROR BY UTILIZING A NEW
GENERATION OPEN-SOURCE FINITE ELEMENT SOFTWARE
FOR THE SCATTERING OF A PLANE, HARMONIC SOUND WAVE**

ABSTRACT

Analytical solution to the scattering of a plane, harmonic sound wave, propagating normally to the axis of a circular cylinder is a widely studied and a well-known problem. This work is concerned with study of pollution error in high order finite-element analysis. By modifying the exact solution, the domain truncation error was eliminated from error calculation. Hence the calculated error is a direct indicator of pollution error. A new generation Python-based open-source partial differential equation solver platform have been used to estimate the solution in the interior of the computational domain for time-harmonic acoustic waves. It is shown that increasing the basis order can substantially reduce the pollution error in mid- frequency regime.

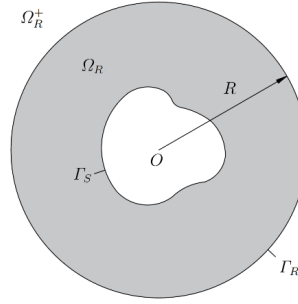
Keywords: *finite-element analysis, acoustic scattering, absorbing boundary conditions*

1. GİRİŞ

Zamandan bağımsız bir düzlemsel ses dalgası düzensiz şekle sahip iki boyutlu bir objeye çarptığında gerçekleşen saçılma harmonik akustik dalga denklemi çözümüyle modellenabilir (Şekil 1). Dalga, Helmholtz denklemini,

$$\Delta u + k^2 u = 0, \quad \Omega_R^+ \text{ içinde,} \quad (1)$$

u akustik basınç veya hız potansiyeli uzaysal bileşeni, k dalga sayısı ve Δ Laplace operatörü için sağlar.



Şekil 1. Akustik saçınım problemi geometrisi kırılan çözüm alanı gösterimi.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r^{\frac{d-1}{2}} \left(\frac{\partial u}{\partial r} - iku \right) = 0, \quad (2)$$

d problemin uzaysal boyutu, i sanal sayı, $r = |\mathbf{x}|$ merkezden uzaklık için sonsuzlukta sağlamalıdır. Bu koşul ile yalnızca sonsuzluğa doğru uzaklaşan dalgalara izin verilir.

Esnemeyen ses saçıcı obje yüzey sınırında ise u_{inc} gelen düzlemsel dalga ve saçıcı obje yüzeyine dik yön n_s için sınır koşulu,

$$\frac{\partial u}{\partial n_s} = - \frac{\partial u_{inc}}{\partial n_s}, \quad \Gamma_S \text{ üstünde} \quad (3)$$

olacaktır.

Bu denklemlere yönelik mükemmel uyumlu katman [1,2], soğurma sınıl koşulu [3-5], izogeometrik analiz [6,7] gibi birçok sonlu eleman çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Soğurma sınır koşulu (SSK) yönteminde sonsuz dış

alan bir sınırla kırılabilir ve problem sonlu bir Ω_R çözüm alanı için geçerli hale getirilir. *Çözüm*, saçıcı obje ile kurgusal bir dış sınırda tanımlanan SSK arasında hesaplanır. Sonsuz alanı kurgusal olarak kırpan bu sınır $\Gamma_R = \{x \in \mathbb{R}^2 : |x| = R\}$ üzerinde Sommerfeld'in sonsuzluktaki radyasyon koşulu farklı SSK yaklaşımları ile yakınsanır. Bu tip SSK'ların genel formunu tarif etmek için Denklem 2 yerine,

$$\frac{\partial u}{\partial n_R} - Bu = 0, \quad \Gamma_R \text{ üstünde,} \quad (4)$$

DtN - *Dirichlet-to-Neumann* - haritalandırma terimi B operatörü olarak yer alır. Böylece, Helmholtz denklemi zayıf formu, $u \in H^1(\Omega_R)$ fonksiyonu çözümü için,

$$\int_{\Omega_R} \nabla u \cdot \nabla v - k^2 uv \, d\Omega_R - \int_{\Gamma_R} Buv \, d\Gamma_R = \int_{\Gamma_S} v \frac{\partial u_{inc}}{\partial n_S} \, d\Gamma_S, \quad (5)$$

tüm terimlerin ağırlıklandırma fonksiyonu v ile çarpımıyla yazılabilir [8,9].

2. SOĞURMA SINIR KOŞULLARI

Kurgusal dış sınır üzerinde en basit SSK tipi, Sommerfeld radyasyon koşulu sonsuzluk yerine yarıçap R üzerinde, bir Robin sınır koşulu olarak,

$$\frac{\partial u}{\partial n_R} - iku = 0, \quad \Gamma_R \text{ üstünde,} \quad (6)$$

tanımlanarak oluşturulur. Kurgusal dış çapa gelen dalgaları uygun bir biçimde karşılamak için tasarlanmış olan diğer SSK'lara - bu listeyle sınırlı kalmamak şartıyla - Enquist ve Majda [3] ve Feng [4] örnek olarak verilebilir. Bu çalışmada ise Sommerfeld ile birinci ve ikinci dereceden Bayliss-Gunzberger-Turkel (BGT) koşulları kullanılmıştır. İki boyutlu Helmholtz denklemi için n dereceli BGT koşulu,

$$B_n = \prod_{j=1}^n \left(\frac{\partial}{\partial r} + \frac{2j - 3/2}{r} - ik \right), \quad (7)$$

genel formunda yazılabilir [5].

Bu durumda Denklem 5'te B operatörü yerine Sommerfeld koşulu için Denklem 6, birinci ve ikinci dereceden BGT koşulları için ise Denklem 7'den elde edilen operatör terimi yerleştirilerek zayıf form denklemleri oluşturulabilir.

3. SİLİNDİR İÇİN AKUSTİK SAÇINIM

Sonlu elemanlar modeli performansı, kesin çözümü literatürde mevcut basit bir geometri için yapılan hesaplama ile karşılaştırılarak değerlendirilir. Bu çalışmada da, dairesel bir silindirin eksenine dik olarak çarpan harmonik düzlemsel ses dalgası için gerçekleşen saçınma, akustik dalga denklemi çözümü ile kesin olarak hesaplanabildiği için sonlu elemanlar modelini doğrulamakta kullanılmıştır.

Akustik dalga denklemi değişkenlere ayırma yöntemi ile çözüldüğünde bir silidire çarparak saçılan dalga için kesin çözüm, iki boyutlu bir düzlem üzerinde, silindirik Bessel fonksiyonu J_m , silindirik Hankel fonksiyonu H_m , mod sayısı m , dalga geliş açısı α için ve Neumann faktörü ϵ_m için $\epsilon_0 = 1$ ve $m \geq 1$ için $\epsilon_m = 2$ olmak üzere,

$$u_{ex} = - \sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_m i^m \frac{J'_m(ka)}{H'_m(ka)} H_m(kr) \cos m(\theta - \alpha) \quad (8)$$

ile FEniCS ortamında Betik 1'de gösterildiği gibi hesaplanabilir [10,11].

Betik 1. Akustik saçınım problemi kesin çözüm için Python kodu ekran görüntüsü.

```
eps_m = 2
u_sum = 0

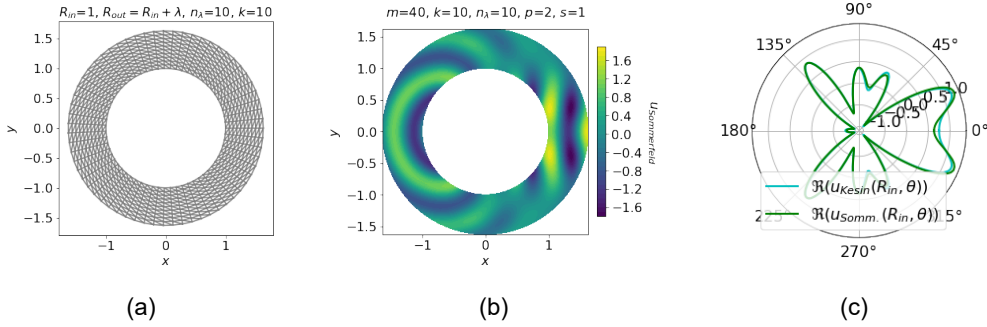
for m in range(1, mn+1,1):
    J = jvp(m, k*r_in, 1)
    H = h1vp(m, k*r_in, 1)
    u_sum = u_sum - eps_m * pow(1j, m) * J / H * hankel1(m, k*radius) * np.cos(m*Theta)

J_0 = jvp(0, k*r_in, 1)
H_0 = h1vp(0, k*r_in, 1)

u_ex = -J_0/H_0*hankel1(0, k*radius) + u_sum
```


4. SONLU ELEMENLAR MODELİ

Çözüm ağı için $P_p \Lambda^0(\Delta_2)$ tipi elemanlar kullanıldı. Bu notasyonda P_p ile p baz dereceden polinomların çözümünü yapabilen Lagrange elemanlar seçildiği, Λ^0 ile ayrıklaştırmanın H^1 Sobolev uzayında olduğu, Δ_2 ile ise ayrıklaştırılan iki boyutlu çözüm alanında üçgen elemanların kullanıldığına işaret edilir [12].



Şekil 2. Silindir saçınım problemi için (a) FEniCS’te oluşturulan çözüm ağı, (b) Sommerfeld SSK ile çözüm için kontur gösterimi, (c) silindir üzerindeki genliklerin kesin çözüm ile Sommerfeld SSK çözümü karşılaştırması.

Saçınım problemlerinde dalgaların çözülebilmesi için dalga boyu λ başına ayrıklaştırma yoğunluğu n_λ belirlenmelidir. Saçıcı objeyi temsil için R_{in} çapında bir dairesel silindir kullanılmıştır. Dalgaların içinde ilerledikleri ortam ise R_{out} çapında bir sınır ile kesilmiştir. Radyal yönde serbestlik derecesi $n_r = \lceil n_\lambda(R_{out} - R_{in})(k/2\pi) \rceil$ ile, teğet yöndeki serbestlik derecesi ise $n_t = \lceil 2\pi n_r \rceil$ ile hesaplanarak Şekil 2’de gösterilen çözüm ağı oluşturulmuştur.

Betik 2. Sommerfeld SSK ile zayıf form denklemi FEniCS kodu ekran görüntüsü.

```
# Zayıf Form Tanımı

a_r = \
+ inner(nabla_grad(u_r), nabla_grad(v_r))*dx\
- inner(nabla_grad(u_i), nabla_grad(v_i))*dx\
- pow(k,2)*( inner(u_r,v_r) - inner(u_i,v_i))*dx\
+ k*(inner(u_r,v_i) + inner(u_i,v_r))*ds(2)

a_i = \
+ inner(nabla_grad(u_r), nabla_grad(v_i))*dx\
+ inner(nabla_grad(u_i), nabla_grad(v_r))*dx\
- pow(k,2)*( inner(u_r,v_i) + inner(u_i,v_r))*dx\
- k*(inner(u_r,v_r) - inner(u_i,v_i))*ds(2)

a = a_r + a_i

L_r = -(C_1*v_i + C_2*v_r)*ds(1)
L_i = (C_1*v_r - C_2*v_i)*ds(1)

L = L_r + L_i

# Çözümü hesapla
u = Function(V)
solve(a == L, u)
```

FEniCS, henüz karmaşık sayı hesaplamaları yapma yeteneğine sahip değil. Bu nedenle, FEniCS'te karmaşık sayılar içeren bir model kurgulanırken zayıf form denklemi gerçek ve sanal kısımlara ayrılarak ifade edilmelidir. Çözüm ağı oluşturulan iki boyutlu herhangi bir geometri için Betik 2'de Sommerfeld SSK örneği ile gösterildiği gibi çözüm elde etmek mümkündür. Sonlu elemanlar analizi Sommerfeld SSK kullanımı ile çözüm alanı içerisinde dalga dağılımı ve saçıcı yüzeyi üzerindeki genliklerin kesin çözüm ile karşılaştırması Şekil 2'de gösterilmiştir.

5. BULGULAR VE HATA ANALİZİ

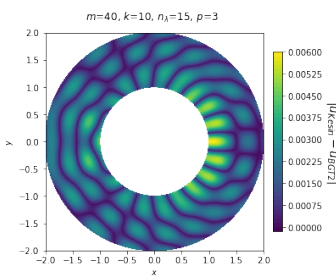
Sonlu elemanlar yöntemini kullanabilmek için dalga yayılımı gerçekleşen sonsuz alanı kurgusal bir sınırla kırpmak *çözümde hataya neden olur*. *Yüksek dereceli SSK* kullanarak bu hatanın üstesinden gelinebilir fakat bu tip sınır koşullarını probleme uyarlayabilmek için *yüksek dereceli türevlerin doğru bir biçimde hesaplanması gerekir*. Soğurma koşulunu zenginleştirme teknikleri kullanmak hatayı azaltmak için *bir seçenektir fakat* bugüne kadar yapılan *sayısal analizler çözüm alanı kırpmaya* hatasının ayrıklaştırma hatasından daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur [13].

Dsouza, Khajah, *et al.*[13] detaylı gösterdikleri üzere BGT koşulu için alan kırpmaya hatasını hesaplamadan çıkarmayı sağlayan değiştirilmiş kesin çözüm kullanılarak yalnızca kirlilik hatasını hesaplamak mümkün oldu. *Böylece yapılan hata hesaplamasında kullanılan SSK'dan bağımsız olarak* modelin performansı değerlendirilebildi. Hata analizlerde görelî L_2 -hata normu,

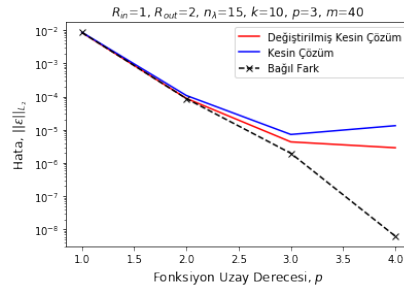
$$\epsilon_2 = \frac{\left\{ \int_{\Omega} |u_h(x) - u_{ref}(x)|^2 dx \right\}^{1/2}}{\left\{ \int_{\Omega} |u_{ref}(x)|^2 dx \right\}^{1/2}}, \quad (9)$$

u_h sayısal çözüm, u_{ref} ise kesin çözüm, değiştirilmiş kesin çözüm veya yüksek fonksiyon derecesine sahip referans sayısal çözüm olacak biçimde kullanıldı.

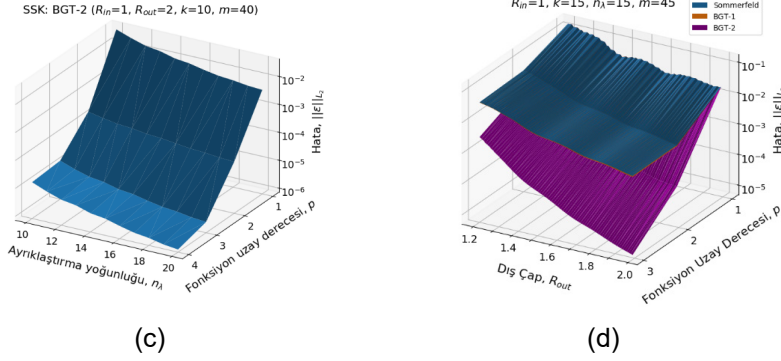
Hazırlanan betik, 4GB kullanılabilir RAM'e ve Intel® Core™ i5 M520 2.4GHz işlemciye sahip bir bilgisayarda FEniCS v.2019.1.0 ile koşturuldu. Aynı çözüm ağı üzerinde kesin çözüm, değiştirilmiş kesin çözüm, Sommerfeld, BGT-1 ve BGT-2 SSK'ları için sayısal sonuçlar alındı.



(a)



(b)



Şekil 3. Silindirik akustik saçınım BGT-2 SSK için (a) çözüm alanı üzerinde keskin çözüm u_{ex} ile fark konturu, (b) fonksiyon uzay derecesi p için hata analizi, (c) ayırıklaştırma yoğunluğu n_λ ile fonksiyon uzay derecesi p değişkenlerine bağlı keskin çözüm hata analizi, (d) kırılma çapı ve fonksiyon uzay derecesi değişkenlerine bağlı Sommerfeld, BGT-1 ve BGT-2 SSK keskin çözüm hata analizi.

Çözüm alanı üzerinde keskin çözüm ile SSK modelleri arasında alınan farkın kontur gösterimi ile hatanın dalga geliş yönüne zıt olan “gölge alan” üzerine yoğunlaştığı gözlemlendi (Şekil 3a).

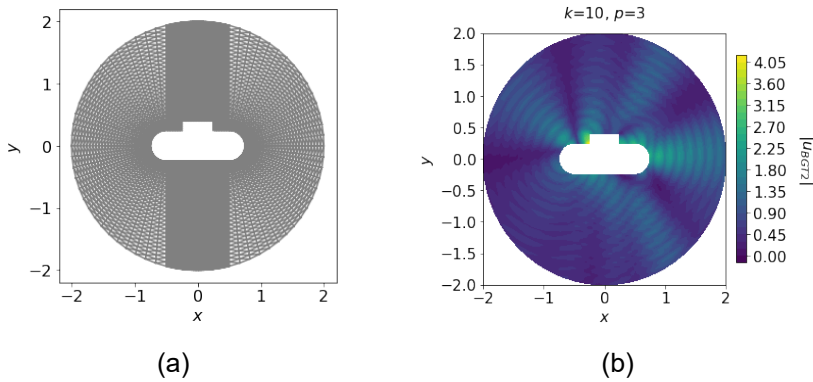
Karmaşık geometrilerin genellikle keskin çözümü olmadığı için iyice ayırıklaştırılmış bir çözüm ağında hesaplanan sayısal sonuç L_2 norm bağlı hata hesaplarında referans alınır. Bu nedenle, Şekil 3b’de sonuçları paylaşılan BGT-2 için yapılan hata analizinde fonksiyon uzay (baz) derecesi keskin çözüm, değiştirilmiş keskin çözüm ve yüksek çözünürlüklü sayısal çözüm için karşılaştırılmıştır. Hata miktarı ikinci dereceye kadar birlikte azalırken, üçüncü dereceden itibaren ise hata miktarında artış gözlemlenmiştir. Değiştirilmiş keskin çözüm için görüldüğü üzere baz derecesini arttırmak kirlilik hatasında düşüşe neden olmaktadır.

Ayırıklaştırma miktarı arttırılmış daha yoğun bir çözüm ağı ile 10^{-6} mertebelerinde hata elde edilebileceği ise Şekil 3c’de gösterilmiştir. Referans ses basınç düzeyi $20\mu\text{Pa}$ dikkate alınacak olursa 2.5×10^{-5} ve altı için çözüm alanı toplam sonucunda $\pm 2\text{dB}$ hata olacağı düşünülebilir.

Son olarak, Şekil 3d’de değişen kırılma çapı ve baz derecesi için keskin çözüm ile yapılan hata analizinde BGT-2 koşulunun Sommerfeld ve BGT-1 koşullarına kıyasla üstün performansı görülmektedir.

6. PROTOTİP UYGULAMA

Düzensiz şekle sahip bir geometri örneği olarak BGT-2 koşuluyla Şekil 4'te gösterilen ve temsili denizaltı geometrisine çarpan düz harmonik dalga ve $k = 10$ için akustik saçınım problemi çözüldü. Şekil 4a'da gösterilen çözüm ağı, açık kaynak kodlu GMSH v.4.6.0 yazılımı ile oluşturuldu.



Şekil 4. Temsili bir denizaltı geometrisi için (a) GMSH'te oluşturulan çözüm ağı, (b) FEniCS'te akustik saçınım analizi.

Denizaltı geometrisine gelen sonar dalgalar kurgulanan sonlu elemanlar SSK modeli ile Şekil 4b'de gösterildiği üzere çözümlendi.

7. SONUÇ

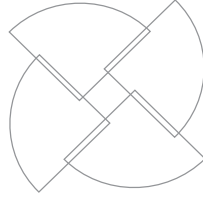
Radar, sonar, jeofizik keşifleri, medikal görüntüleme ve hasarsız test gibi birçok alanda uygulaması olan saçınım problemi için açık kaynak kodlu FEniCS'te Sommerfeld, BGT-1 ve BGT-2 SSK'ları kullanılarak bir sayısal model kurgulanmıştır. BGT-2 koşulu için orta frekanslı rejimde baz derecesini arttırmak kirlilik hatasını önemli ölçüde azaltmıştır. Prototip uygulama çalışması ile ise açık alan Helmholtz problemlerine yönelik FEniCS ve Python tabanlı hazırlanan kodun bir tasarım ve analiz aracı olarak kullanılabileceği gösterilmiştir.

8. KAYNAKLAR

- [1] Berenger, J.P., A perfectly matched layer for the absorption of electro-magnetic waves", J. Comput. Phys. Vol. 114, No. 1, pp. 185-200, 1994.
- [2] Shirron, J.J., Giddings, T.E., A finite element model for acoustic scattering from near a fluid-fluid interface, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. Vol. 196, pp. 279-288, 2006.
- [3] Enquist, B., Majda, A., Absorbing boundary conditions for the numerical simulation of waves, Math. Comput. Vol. 31, No. 139, pp. 629-651, 1977.



- [4] F. Kang, Finite element method and natural boundary reduction, in: Proc. Int. Congress of Mathematicians, Warsaw, Poland, pp. 1439-1453, 1983.
- [5] Bayliss, A., Gunzburger, M., Turkeli, E., Boundary Conditions for the Numerical Solution of Elliptic Equations in Exterior Regions, SIAM J. Appl. Math. Vol. 42, No. 2, pp. 430-451, 1982.
- [6] Khajah, T., Antoine, X., Bordas, S.P, B-spline FEM for time-harmonic acoustic scattering and propagation, Journal of Theoretical and Computational Acoustics, 2019.
- [7] Khajah, T., Villamizar, V., Highly accurate acoustic scattering: Isogeometric Analysis coupled with local high order Farfield Expansion ABC, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. Vol. 349, pp. 477-498, 2019.
- [8] Thompson, L.L., A review of finite-element methods for time-harmonic acoustics, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 119, No. 3, pp. 1315-1330, 2006.
- [9] Shirron, J.J., Babuska, I., A comparison of approximate boundary conditions and infinite element methods for exterior Helmholtz problems, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. Vol. 164, pp. 121-139, 1998.
- [10] Eringen, C., Mechanics of continua, Robert E. Krieger Publishing Company, 1980.
- [11] Martin, P.A., Multiple scattering: interaction of time-harmonic waves with N-obstacles, No. 107, Cambridge University Press, 2006.
- [12] Logg, A., Mardal, K.A., Wells, G.N., Automated solution of differential equations by the finite element method: The FEniCS book, Vol. 84, Springer Science & Business Media, 2012.
- [13] Dsouza, S.M., Khajah, T., Antoine, X., Bordas, S., Natarajan, S., Non Uniform Rational B-Splines and Lagrange approximations for time-harmonic acoustic scattering: convergence, accuracy, absorbing boundary conditions, Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, 2021.



Türk Akustik Derneği'nin düzenlediği 14. Ulusal Akustik Kongresi işitsel peyzaj, gürültü kontrolü, ses yalıtımı, hacim akustiği, akustik ölçümler, malzemeler, küçük odaların akustik tasarımı ve tasarım eğitiminde akustik ana konularında zengin bir katılım ile 7-8 Ekim 2021'de gerçekleşmiştir. 2020-2021 Uluslararası Ses Yılı kapsamına dahil olan bu etkinlikte akustik bilimine dair konuların yanı sıra düzenlenen panel ve özel oturumlar ile 2020 yılına damgasını vuran 'Covid-19', 'deprem' ve 'protestolar' tartışılmış ve katılımcılar sesin sosyal, politik ve toplumsal etkilerini değerlendirmeye davet edilmiştir. Kongre programına dahil olan bildiri tam metinleri ve davetli konuşmacıların konuşma özetleri 14. Ulusal Akustik Kongresi Bildiri Kitabı'nda sunulmaktadır.

14. Ulusal Akustik Kongresi'nin gerçekleştirilmesine katkıda bulunan sponsorlarımıza teşekkür ederiz.



Sosyal medyada bizi takip edin:



/hiperkitaptr



/hiperkitaptr

Bu kitabı Hiperkitap dijital kütüphanesinden tam metin olarak görüntüleyebilirsiniz.