



# HARRAN ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK DERGİSİ

*HARRAN UNIVERSITY JOURNAL of ENGINEERING*

e-ISSN: 2528-8733 (ONLINE)

URL: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/humder>

## Farklı Malzemelerden Üretilmiş Plakların Ses İletim Performanslarının Deneysel İncelenmesi

*Experimental Investigation of Sound Transmission Performance of Plates Made from Different Materials*

**Yazar(lar) (Author(s)):** Mert Ali ÖZEL<sup>1</sup>, Eren MURTULU<sup>2</sup>, Hikmet KARŞIYAKA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ORCID ID: 0000-0003-2887-3359

<sup>2</sup>ORCID ID: 0009-0008-8912-0135

<sup>3</sup>ORCID ID: 0009-0001-2641-9788

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Özel M. A., Murtulu E., Karşıyaka H., "Farklı Malzemelerden Üretilmiş Plakların Ses İletim Performanslarının Deneysel İncelenmesi", **Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi**, 11(1): 18-29, (2026).

**Erişim linki (To link to this article):** [10.46578/humder.1848320](https://dergipark.org.tr/tr/pub/humder/10.46578/humder.1848320)



## Farklı Malzemelerden Üretilmiş Plakların Ses İletim Performanslarının Deneysel İncelenmesi

Mert Ali ÖZEL<sup>1\*</sup>, Eren MURTULU<sup>2</sup>, Hikmet KARŞIYAKA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bursa Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

<sup>2</sup> SEGER Ses ve Elektrikli Gereçler San.A.Ş., Bursa, Türkiye

### Öz

#### Makale Bilgisi

Başvuru: 24/12/2025  
Düzeltilme: 08/01/2026  
Kabul: 09/02/2026  
Yayınlanma: 31/03/2026

#### Alıntı

Özel M. A., Murtulu E., Karşıyaka H., "Farklı Malzemelerden Üretilmiş Plakların Ses İletim Performanslarının Deneysel İncelenmesi", Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 11(1): 18-29, (2026).

Bu çalışmada, aynı geometrik boyutlara sahip ancak farklı malzemelerden üretilmiş yedi adet plakanın otomotivde korna uygulaması için ses iletim performansları deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel düzeneğinde, 15 W, 25 W ve 40 W gücünde üç farklı ses uyarıcısı (sound exciter) kullanılarak malzeme türünün ve uyarıcı gücünün ses iletimi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Farklı malzemelerin akustik davranışları 400 Hz değerinde (korna çalışma frekansı) karşılaştırılmış, endüstriyel uygulamalardaki kullanım uygunlukları irdelenmiş ve güç seviyesinin ses iletim karakteristiklerine olan katkısı detaylı şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen deneysel bulgular, malzeme seçiminin ve uyarıcı gücünün ses iletim performansında belirleyici rol oynadığını göstermekte olup, akustik tasarım süreçleri için önemli veri sağlamaktadır. Çalışma sonucunda, üç ayrı ses uyarıcısı ile titreştirilerek elde edilen ses basınç seviyeleri karşılaştırılmış ve hem malzeme sertliği-sönüm oranının hem de uyarıcı güç/empedansının akustik yanıtı belirlediği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Ses basınç seviyesi, Akustik performans, Farklı malzemeler, Sound exciter, Deneysel analiz, Titreşim ve akustik, Endüstriyel uygulamalar.

## Experimental Investigation of Sound Transmission Performance of Plates Made from Different Materials

#### Article Information

Received: 24/12/2025  
Revised: 08/01/2026  
Accepted: 09/02/2026  
Published: 31/03/2026

#### Citation

Özel M. A., Murtulu E., Karşıyaka H., "Experimental Investigation of Sound Transmission Performance of Plates Made from Different Materials", Harran University Journal of Engineering, 11(1): 18-29, (2026).

#### Abstract

In this study, the sound transmission performance of seven plates with identical geometric dimensions but manufactured from different materials was experimentally investigated for automotive horn application. Three sound exciters with output powers of 15 W, 25 W, and 40 W were employed to evaluate the influence of material type and exciter power on sound transmission behavior. The acoustic responses of the materials were compared at 400 Hz frequency (operational application of horn), their suitability for industrial applications was assessed, and the contribution of varying power levels to transmission characteristics was analyzed in detail. The experimental findings demonstrate that both material selection and exciter power play a critical role in sound transmission performance, providing valuable insights for acoustic design and engineering applications. As a result of the study, the sound pressure levels obtained by exciting the plates with three different actuators were compared, revealing that both material stiffness-damping characteristics and actuator power/impedance significantly influence the acoustic response.

**Keywords:** Sound pressure level, Acoustic performance, Different materials, Sound exciter, Experimental analysis, Vibration and acoustics, Industrial applications.

\*İletişim yazarı, e-mail: mertaliozel@uludag.edu.tr

\*Corresponding author, e-mail: mertaliozel@uludag.edu.tr

DOI: 10.46578/humder.1848320

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Malzemelerin ses iletim davranışlarının incelenmesi, modern mühendislik uygulamalarında hem ürün geliştirme hem de akustik optimizasyon süreçleri için kritik bir gereklilik hâline gelmiştir [1, 2]. Otomotiv, beyaz eşya, savunma sanayi, yapı akustiği ve makine tasarımı gibi pek çok sektörde düşük gürültü seviyesi, yüksek konfor ve titreşim kontrolü temel tasarım parametreleri arasında yer almaktadır [3, 4]. Bu nedenle, aynı geometrik özelliklere sahip fakat farklı malzemelerden üretilmiş plakaların ses iletim performanslarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi hem akademik araştırmalar hem de endüstriyel uygulamalar açısından önemli bir ihtiyaçtır [5, 6].

Plakaların akustik davranışı; elastisite modülü, yoğunluk, iç sönüm oranı, yüzey pürüzlülüğü, kalınlık ve üretim yöntemleri gibi çok sayıda parametreye bağlı olarak değişmektedir [7–9]. Metaller genellikle yüksek elastisite modülleri sebebiyle ses enerjisini daha hızlı iletirken [10], polimer ve kompozit malzemeler iç sönüm mekanizmaları sayesinde daha yüksek enerji soğurma kapasitesine sahiptir [11, 12]. Bu fiziksel farklılıklar, aynı geometriye sahip malzemelerin frekans tabanlı ses iletim performanslarında belirgin değişikliklere yol açmaktadır [13, 14]. Zenker ve ark. [13], ses uyarıcılarının (sound exciter) düz panel hoparlörlerdeki yerleşim optimizasyonunu ve uyarım gücünün farklı panel yapıları üzerindeki akustik çıktılarını inceleyerek, bu teknolojinin malzeme bazlı verimliliğini ortaya koymuştur.

Bir malzemenin ses iletim kabiliyeti, genellikle Ses Basınç Seviyesi (Sound Pressure Level- SPL) parametresi ile ifade edilir [15]. SPL değeri, plakanın dinamik sertliği, rezonans frekansları ve eğilme dalgası yayılım karakteristikleri tarafından belirlenmektedir [16, 17]. Bu nedenle, malzemelerin mekanik özellikleri ile akustik tepki arasındaki ilişkiyi ortaya koymak, vibro-akustik tasarım çalışmalarında kritik bir araştırma alanıdır [18, 19].

Son yıllarda ses uyarıcısı (sound exciter) tabanlı uyarım yöntemleri, plakaların dinamik ve akustik yanıtlarının belirlenmesinde yaygın bir deneysel yaklaşım hâline gelmiştir [20, 21]. Ses uyarıcıları, yüzeye doğrudan mekanik titreşim ileterek geniş frekans aralığında tekrarlanabilir ve kontrollü bir uyarım sağlar [22]. Bununla birlikte, ses uyarıcısının güç seviyesinin değiştirilmesi plaka yüzeyine aktarılan enerji miktarını etkiler ve dolayısıyla plakanın ses iletim karakteristiğini doğrudan değiştirebilir [23, 24]. Literatürde, ses uyarıcısı gücünün malzeme bazlı akustik performans üzerindeki etkisini sistematik olarak inceleyen çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir [25-35].

Bu çalışma, literatürdeki bu boşluğu gidermeyi amaçlayarak aynı boyutlara sahip yedi farklı malzemeden üretilmiş plakaların ses iletim performanslarını 15 W, 25 W ve 40 W gücündeki üç farklı ses uyarıcısı kullanarak deneysel olarak incelemektedir. Çalışmanın temel amacı, otomotiv korna uygulamasında ses uyarıcısının standart kornalar yerine ikame edilmesidir. ECE R28 [36] ve SAE J377 [37] gibi mevcut standartlar korna için zorunlu bir çalışma frekansı tanımlamamakta olup, uygulamada insan işitme hassasiyeti ve algılanabilirlik kriterleri nedeniyle yaklaşık 400 Hz civarında tasarımlar tercih edilmektedir, [38]. Bu sebeple, yaygın kabul edilen korna çalışma frekansı olan 400Hz değerinde her bir malzemenin çalışma performansı irdelenmiştir. Ramachandran ve ark. [36], korna seslerinin ECE-R28 regülasyonlarına uygunluğunu doğrulamak amacıyla dijital validasyon yöntemlerini geliştirerek, endüstriyel standartlara uyum süreçlerinin modern mühendislikteki önemini vurgulamıştır. Medè ve ark. [38], otomotiv kornalarının performansını etkileyen çoklu fiziksel fenomenleri analiz ederek, geleneksel ses üretim sistemlerinin mekanik ve akustik tepkileri üzerine kapsamlı bir literatür temeli oluşturmuştur. Çalışmada malzeme türü ile uyarıcı gücü bir arada değerlendirilmiş ve her iki parametrenin ses iletimi üzerindeki etkileri 400 Hz referans frekansta analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, malzemelerin akustik karakteristiklerinin anlaşılmasına ve endüstriyel tasarım süreçlerinde optimal malzeme seçiminin yapılmasına katkı sunmaktadır.

Ayrıca, farklı güç seviyelerinin oluşturduğu titreşim enerjisi farklılıklarının malzeme bazlı iletim davranışını nasıl değiştirdiği ayrıntılı olarak değerlendirilmiş, bu sayede akustik tasarım süreçlerinde göz önüne alınması gereken yeni bulgular elde edilmiştir. Sonuçlar, akustik tasarım alanına yönelik literatürdeki bilgi birikimine önemli katkılar sağlamaktadır.

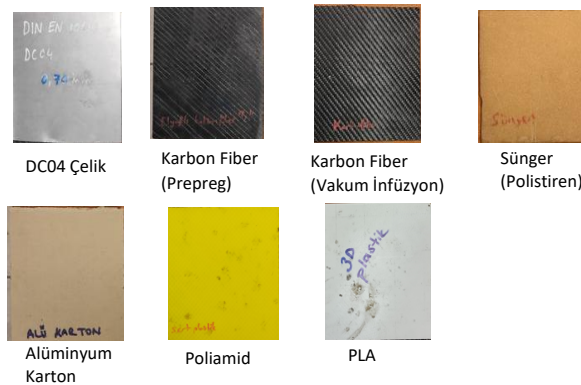
## 2. MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada kullanılan tüm plakalar 150 mm × 150 mm boyutlarında ve 0,7 mm kalınlığında olacak şekilde hazırlanmıştır. İlk malzeme olan DC04 düşük karbonlu derin çekme çeliği, yüksek süneklik, iyi şekillendirilebilirlik ve homojen mikro-yapısı nedeniyle otomotiv ve beyaz eşya endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir sac malzemedir. Elastisite modülünün yüksek olması sebebiyle akustik olarak rijit bir davranış sergiler. Çalışmada yer alan ikinci ve üçüncü malzemeler, fiber yönelimi [+45/-45/+45/-45] olacak şekilde hazırlanmış karbon fiber kompozit plakalar olup, biri vakum infüzyon yöntemi, diğeri ise prepreg (ön reçineli) yöntem kullanılarak üretilmiştir. Vakum infüzyon yöntemi düşük gözeneklilik, homojen reçine dağılımı ve hafiflik sağlarken, prepreg yöntemi kontrollü reçine oranı, yüksek fiber hacim fraksiyonu ve üstün mekanik özellikleriyle bilinir; her iki yöntemin de farklı akustik titreşim tepkileri oluşturması beklenmektedir. Dördüncü malzeme olan sünger (polistiren) yapısı gereği yüksek poroziteye ve düşük yoğunluğa sahiptir; bu nedenle ses enerjisini absorbe etme kabiliyeti yüksektir ve iletimden çok sönümlenme özellikleriyle öne çıkar. Beşinci malzeme alüminyum karton (alüminyum kompozit laminat) olup, ince alüminyum yüzey tabakaları ile hafif çekirdek yapısının birleşmesi sayesinde hem rijitlik hem de düşük ağırlık sunmakta ve özellikle yapı akustiği ve endüstriyel panellerde kullanılmaktadır. Altıncı malzeme ise döküm poliamid (PA6G / PA6 Cast) olan yüksek darbe dayanımlı, iyi sönümlenme karakterine sahip mühendislik plastiğidir. Düşük yoğunluğuyla birlikte orta seviyede elastisite sunar ve birçok makine elemanında titreşim sönümleyici olarak kullanılmaktadır. Son olarak, eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş PLA (Polylactic Acid) plastik plaka, katmanlı üretim kaynaklı anizotropik yapısı ve orta sertlikte mekanik özelliğiyle bilinir. Düşük yoğunluk ve belirgin katman yapısı nedeniyle akustik titreşimlere karşı farklı bir iletim davranışı ortaya koymaktadır. Tablo 1’de ilgili malzemelerin özellikleri paylaşılmıştır.

**Tablo 1.** Plakların malzeme özellikleri (Material properties of the plates)

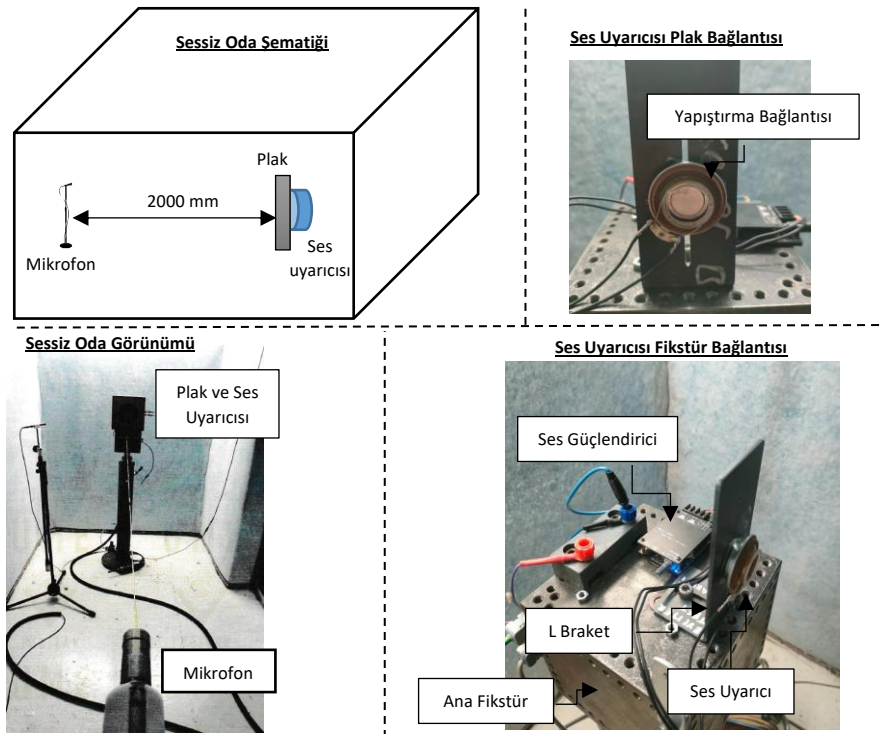
Malzeme	Elastisite Modülü	Poisson Oranı	Yoğunluk
DC04 Çelik	210 GPa	0.30	7850 kg/m <sup>3</sup>
Karbon Fiber (Prepreg)	130 GPa	0.28	1550 kg/m <sup>3</sup>
Karbon Fiber (Vakum İnfüzyon)	120 GPa	0.28	1450 kg/m <sup>3</sup>
Sünger	0.05 GPa	0.30	40 kg/m <sup>3</sup>
Alüminyum Karton	45 GPa	0.33	1200 kg/m <sup>3</sup>
Poliamid	2.8 GPa	0.39	1150 kg/m <sup>3</sup>
PLA (3D Baskı)	2.9 GPa	0.36	1250 kg/m <sup>3</sup>

Bu malzemelerin çeşitliliği, deneysel çalışmada hem metal hem kompozit hem polimer hem de gözenekli yapıların ses iletim karakteristiklerinin karşılaştırılabilir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Şekil 1’de deneyde kullanılan plaklar paylaşılmıştır.



**Şekil 1.** Deneyde Kullanılan Plakların Görselleri (Images of the Plates Used in the Experiment)

Deneyisel çalışma, dış ortam gürültüsünden izole edilmiş ve akustik yansımaların minimuma indirildiği sessiz bir test odasında gerçekleştirilmiştir. Odanın iç yüzeyleri, ses enerjisinin geri yansımadan soğurulmasını sağlayan özel akustik kaplamalarla donatılmış olup, böylece plaklardan yayılan titreşim kaynaklı sesin ölçümlere net bir şekilde yansımaları sağlanmıştır. Ses yalıtımlı akustik kabin, 3.35 m uzunluk, 1.55 m genişlik ve 2 m yükseklik iç boyutlarıyla tasarlanmıştır. Ölçümlerde, geniş frekans aralığında hassas SPL takibi yapabilen endüstriyel sınıf bir ölçüm Brüel&Kjaer 4191 tip mikrofon kullanılmıştır. Ölçümlerde Brüel & Kjaer (B&K) tip 4231 Akustik Kalibratör kullanılmıştır. Kalibrasyon ve doğrulama işlemleri, "Regulation No 28 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE)" [39] dokümanında tanımlanan parametrelere göre yapılmıştır. Ölçümler sırasında ortam koşulları hassas bir şekilde takip edilmiştir. Kalibrasyon ve testler;  $(26,0 \pm 1,0)$  °C sıcaklık,  $(43,5 \pm 2,0)$  %rh bağıl nem ve  $(100,50 \pm 0,10)$  kPa statik basınç değerlerinin bulunduğu kontrollü bir ortamda yapılmıştır. Plak titreşim deneylerinde,  $150 \times 150 \times 0,7$  mm boyutlarındaki test plakaları özel bir metal fikstür üzerine sabitlenmiş; ses uyarıcısı ise fikstürün arka tarafındaki temas yüzeyine kontrollü şekilde bağlanarak plakaya doğrudan titreşim aktarımı yapılmıştır. Şekil 2'de görülen L şeklindeki braket, ana fikstüre ankastre olacak şekilde bağlanmıştır. Ses uyarıcısı ise, L şeklindeki braketle ankastre sınır şartıyla bağlanmıştır. Bu sebeple, ses uyarıcısı ankastre sınır koşuluyla çalışmaktadır. Plaklar ise, ses uyarıcısına epoksi esaslı yapıştırma bağı ile ankastre olacak şekilde bağlanmıştır. Deneyin temel prensibi; farklı malzemelerden üretilmiş plakaların ses uyarıcısı ile uyarıldığında ne kadar ses ilettiğini karşılaştırmak ve malzeme türünün, yapısal özelliklerin ve ses uyarıcısı gücünün ses iletim performansı üzerindeki etkilerini deneysel olarak ortaya koymaktır. Tüm malzemeler aynı oda koşullarında, aynı montaj geometrisinde ve aynı uyarım düzeninde test edildiğinden, elde edilen veriler malzeme bazlı ses iletim farklarını güvenilir şekilde karşılaştırmaya imkân sağlamaktadır.



**Şekil 2.** Deney Şematığı ve Görselleri (Experiment Schematic and Images)

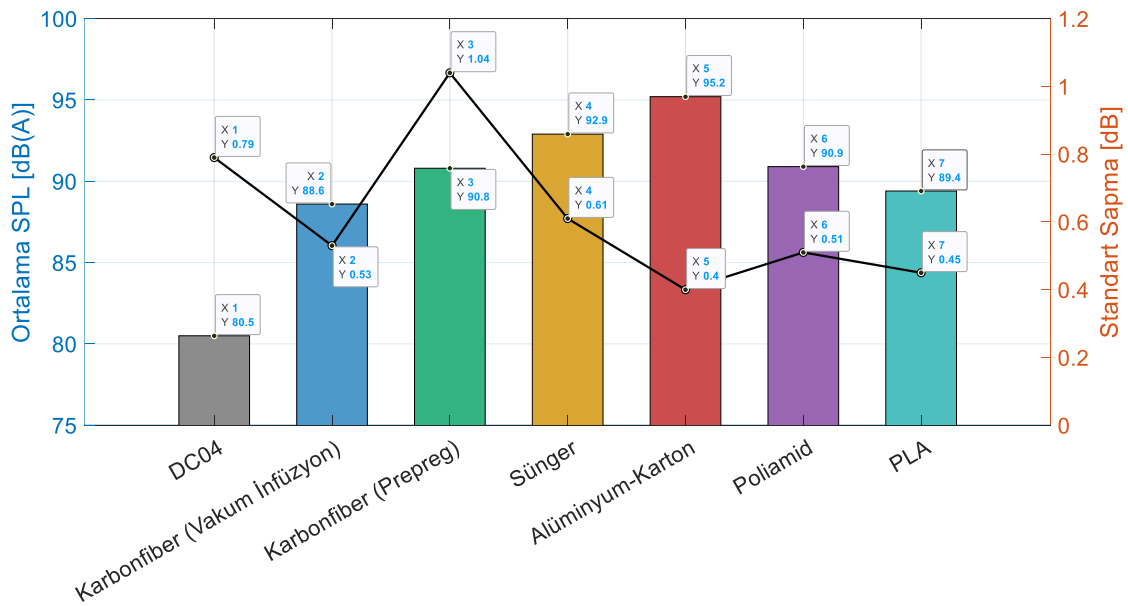
Bu çalışmada, plakaların yüzeyine doğrudan mekanik titreşim aktarmak amacıyla üç farklı teknik özellikte ses uyarıcısı kullanılmıştır. İlk ses uyarıcısı, 4 ohm empedans değerine ve 40 W gücünde yüksek çıkış kapasiteli bir model olup, geniş bantta güçlü titreşim üretmesi sayesinde özellikle yüksek genlikli uyarımlar için tercih edilmiştir. Bu ses uyarıcısı, bobin sarımının düşük empedansa sahip olması nedeniyle amplifikatörden geçtiği akım miktarını artırarak plakaya daha yüksek mekanik enerji aktarabilmektedir. İkinci ses uyarıcısı, yine 4 ohm empedans değerinde ve 15 W güce sahip olup, düşük ve orta seviyedeki titreşim uyarımları için kullanılmıştır; bu model daha düşük güç tüketimiyle kontrollü bir uyarım sağladığı

için malzeme davranışının düşük enerji seviyelerinde incelenmesine imkân tanır. Üçüncü ses uyarıcısı ise 8 ohm empedans değerine ve 25 W çıkış gücünde olup, daha yüksek empedans değerine sahip olması nedeniyle amplifikatör tarafından daha stabil bir akım çekmekte, bu sayede özellikle rezonans bölgelerinde daha dengeli titreşim üretimi sunmaktadır. Ses uyarıcıların çalışma prensibi temel olarak elektromekanik dönüşüm esasına dayanır. Ses uyarıcısı içerisinde bulunan bobin, sürücü amplifikatörden gelen elektrik akımıyla manyetik bir alan oluşturur. Bu manyetik alan, ses uyarıcısının sabit mıknatıs yapısı ile etkileşime girerek ileri-geri doğrultuda lineer bir mekanik hareket üretir. Bobine uygulanan AC sinyalin frekansı arttıkça mekanik titreşim frekansı da aynı oranda artar. Ses uyarıcısının titreşim plakası veya yapısal bağlantı yüzeyi bu hareketi doğrudan test plakasına ileterek malzeme üzerinde boyuna ve eğilme modlu titreşimler oluşturur. Plaka, kendi elastisite modülü, yoğunluğu, sönüm oranı ve iç yapısına bağlı olarak bu titreşim enerjisini ses dalgalarına dönüştürür. Dolayısıyla ses uyarıcısının gücü, empedansı, bobin ağırlığı ve hareketli kütlesi; plakaya aktarılan enerji miktarını ve ölçülen ses iletim performansını doğrudan etkileyen temel parametrelerdir. Üç farklı ses uyarıcısının kullanılmasının temel amacı, malzemelerin yalnızca türüne göre değil, aynı zamanda uyarıcı gücündeki değişime nasıl tepki verdiğini görmek ve düşük-orta-yüksek enerji seviyelerinde ses iletim karakteristiklerini karşılaştırmalı olarak incelemektir. Bu yaklaşım, ses iletim performansının yalnızca malzemeye değil, uyarım enerjisine de duyarlı olduğunu göstermesi bakımından çalışmaya kapsamlı bir değerlendirme sağlamaktadır.

### 3. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSIONS)

#### 3.1. Ses Uyarıcısı Gücünün ve Empedansının Etkisi (The Effect of Sound Stimulus Power and Impedance)

Çalışmada, otomotiv korna uygulaması için referans 400Hz frekans değerinde plakaların SPL sonuçları irdelenmiştir. 40 W gücündeki ses uyarıcısı, ortalama 1.1–1.4 A aralığında daha yüksek akım çekerek malzemeye daha fazla titreşim enerjisi aktarmıştır. Bu durum, ölçülen ağırlıklı ses şiddeti değerlerinin genel olarak daha yüksek çıkmasını sağlamıştır. Şekil 3'te her bir malzemenin ortalama SPL ve standart sapma değerleri paylaşılmıştır. Tablo 2'de ise 40W 4 ohm özelliğine sahip ses uyarıcısı 400 Hz değerindeki sonuçları paylaşılmıştır.

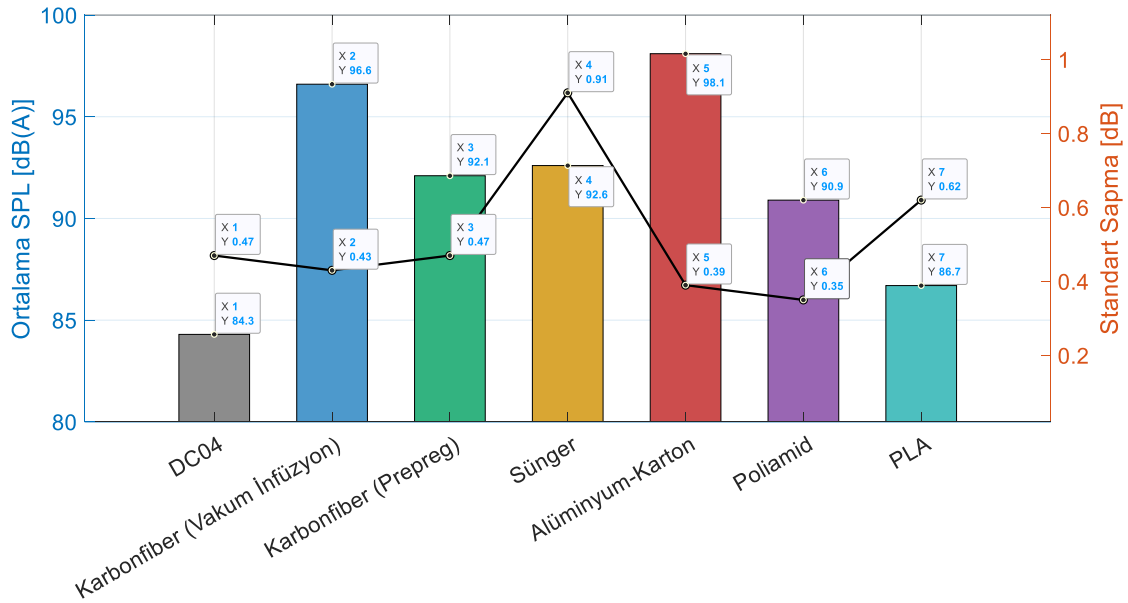


Şekil 3. 40W Gücündeki Ses Uyarıcısının Ortalama SPL ve Standart Sapma Değerleri (Average SPL and Standard Deviation Values of a 40W Sound Stimulator)

Şekil 4'te görüldüğü üzere, 15 W'lık exciter daha düşük akım çekmesine rağmen belirli malzemelerde (özellikle Alüminyum Karton) ağırlıklı ses şiddeti seviyeleri 98.1 dBA'a kadar ulaşarak malzeme kaynaklı amplifikasyon etkisinin önemli olduğunu göstermiştir. Tablo 3'te 15W 4 ohm özelliğine sahip ses uyarıcısı 400 Hz değerindeki sonuçları paylaşılmıştır.

**Tablo 2.** 40W gücündeki ses uyarıcısının test sonuçları (Test results of the 40W sound stimulator)

Malzeme		1	2	3	4	5
DC04	Akım [A]	1.15	1.1	1.15	1.2	1.15
	dB(A)	79.8	80.9	79.5	81.2	81.1
Karbonfiber (Vakum İnfüzyon)	Akım [A]	1.25	1.3	1.3	1.3	1.3
	dB(A)	88.1	89.1	89.2	88.1	88.5
Karbonfiber (Prepreg)	Akım [A]	1.15	1.25	1.2	1.15	1.25
	dB(A)	89.6	89.8	91.2	91.5	91.9
Sünger	Akım [A]	1.45	1.4	1.35	1.4	1.4
	dB(A)	92.8	91.9	93.5	93.1	93.2
Alüminyum- Karton	Akım [A]	1.3	1.3	1.3	1.25	1.35
	dB(A)	94.8	95.6	95.2	95.6	94.8
Poliamid	Akım [A]	1.4	1.35	1.45	1.4	1.4
	dB(A)	91.3	90.8	90.2	91.5	90.7
PLA	Akım [A]	1.15	1.2	1.25	1.2	1.2
	dB(A)	88.9	89.6	89.5	89	90

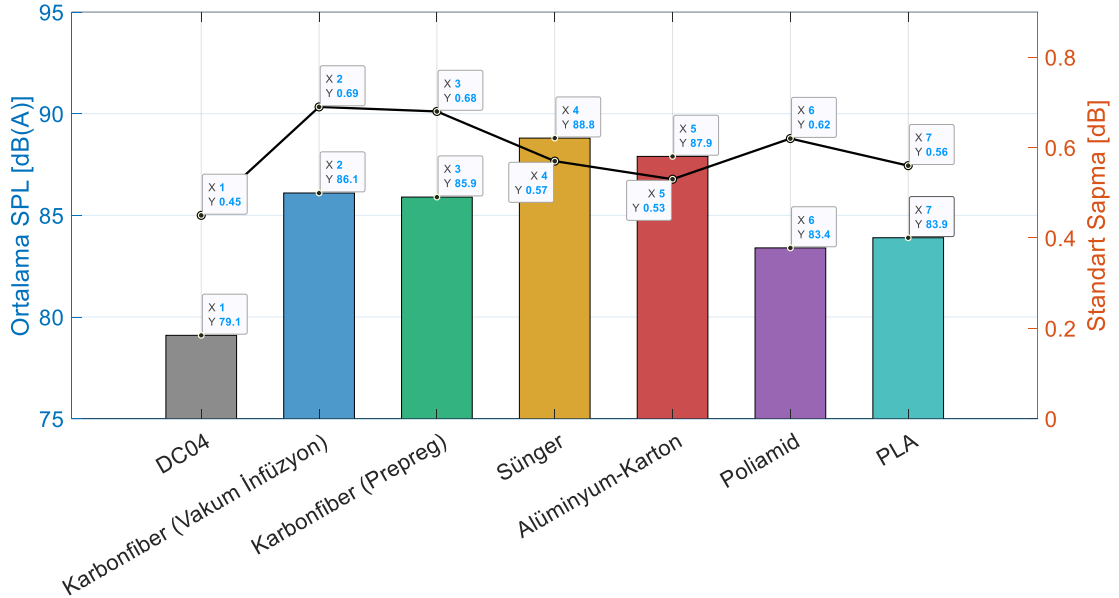


**Şekil 4.** 15W Gücündeki Ses Uyarıcısının Ortalama SPL ve Standart Sapma Değerleri (Average SPL and Standard Deviation Values of a 15W Sound Stimulator)

Şekil 5'te görüldüğü üzere, 8 ohm 25 W ses uyarıcısı ise daha yüksek empedans nedeniyle daha dengeli ve yumuşak bir uyarım üretmiş, sonuç olarak ortalama dB(A) seviyeleri diğer iki ses uyarıcısına kıyasla daha düşük seyretmiştir. Tablo 4'te 25W 8 ohm özelliğine sahip ses uyarıcısının 400 Hz değerindeki sonuçları paylaşılmıştır.

**Tablo 3.** 15W gücündeki ses uyarıcısının test sonuçları (Test results of the 15W sound stimulator)

Malzeme		1	2	3	4	5
DC04	Akım [A]	1.35	1.3	1.3	1.25	1.3
	dB(A)	85	84.5	84.2	84	83.8
Karbonfiber (Vakum İnfüzyon)	Akım [A]	1.45	1.4	1.4	1.4	1.35
	dB(A)	97.2	96.8	96.6	96.1	96.3
Karbonfiber (Prepreg)	Akım [A]	1.45	1.35	1.35	1.45	1.4
	dB(A)	91.7	91.7	92.7	91.9	92.5
Sünger	Akım [A]	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
	dB(A)	92.5	91.1	92.9	93	93.5
Alüminyum- Karton	Akım [A]	1.5	1.45	1.55	1.55	1.45
	dB(A)	98.4	98.5	97.6	97.8	98.2
Poliamid	Akım [A]	1.65	1.6	1.55	1.6	1.6
	dB(A)	90.5	90.6	91.2	91.3	90.9
PLA	Akım [A]	1.65	1.75	1.75	1.6	1.75
	dB(A)	86.1	86.5	87.2	87.5	86.2

**Şekil 5.** 25W Gücündeki Ses Uyarıcısının Ortalama SPL ve Standart Sapma Değerleri (Average SPL and Standard Deviation Values of a 25W Sound Stimulator)

### 3.2. Malzeme Türünün Akustik Tepkisi (Acoustic Response of Material Type)

Araştırma sonuçları, malzemelerin ses iletim performansları açısından belirgin şekilde ayrıştığını ortaya koymuştur. Alüminyum Karton, her üç ses uyarıcısı altında da en yüksek dB(A) seviyelerini üreten malzeme olmuştur (40 W: 95.2 dB(A); 15 W: 98.1 dB(A); 25 W: 87.9 dB(A)). Bu durum, malzemenin ince metal yüzey ve hafif çekirdek yapısının rezonansa eğilimli davranmasıyla açıklanabilir. Sünger, ses soğurma özelliği yüksek bir malzeme olmasına rağmen, plak modunda titreşime zorlandığında nispeten yüksek seviyelerde (92–93 [dBA]) ses üretmiştir. Bu sonuç, gözenekli yapının ve malzeme özelliklerinin ses iletimine olan etkisini göstermektedir. Karbonfiber (Vakum İnfüzyon) ve Karbonfiber (Prepreg), rijitliği yüksek kompozit yapıları sayesinde daha kontrollü bir titreşim tepkisi vermiştir. Özellikle Karbonfiber (Prepreg) malzemesi her üç ses uyarıcısı altında da yüksek ancak dengeli bir SPL seviyesi üretmiştir (88–96 dB(A) aralığı). Bu sonuç, kompozit malzemelerin hem rijit hem de düşük sönümlü yapısının yapısal titreşim altında güçlü bir akustik çıktıya neden olduğunu göstermektedir.

Sert plastik, her üç ses uyarıcısı altında beklenenden daha stabil bir performans göstermiş, özellikle 25 W ses uyarıcısı altında 83.4 dB(A) ile en düşük değerlerden birini üretmiştir. Bu durum, orta elastik modül ve nispeten daha yüksek iç sönüm kapasitesinin birleşimiyle açıklanabilir. 3D baskı PLA, katmanlı üretim kaynaklı anizotropik yapısı nedeniyle farklı ses uyarıcılarında değişken, ancak genel olarak orta seviyede ses üretmiştir (86–89 [dBA]). Katman yapısı nedeniyle yüksek frekans bileşenlerini daha fazla sönümlediği düşünülmektedir.

**Tablo 4.** 25W gücündeki ses uyarıcısının test sonuçları (Test results of the 25W sound stimulator)

Malzeme		1	2	3	4	5
DC04	Akım [A]	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
	dB(A)	78.4	79.4	78.9	79.3	79.5
Karbonfiber (Vakum İnfüzyon)	Akım [A]	1.55	1.55	1.45	1.45	1.5
	dB(A)	87.1	86.3	85.9	86	85.2
Karbonfiber (Prepreg)	Akım [A]	1.55	1.55	1.6	1.6	1.65
	dB(A)	86.3	86.7	85.1	85.3	86.1
Sünger	Akım [A]	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	dB(A)	88.1	88.3	89.4	89	89.2
Alüminyum- Karton	Akım [A]	1.4	1.45	1.4	1.4	1.4
	dB(A)	87.2	87.5	88.2	88.5	88.1
Poliamid	Akım [A]	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
	dB(A)	83.5	83	84.2	83.7	82.6
PLA	Akım [A]	1.45	1.45	1.55	1.55	1.5
	dB(A)	83.1	83.6	84.3	84.5	84

### 3.3. Genel eğilimler ve İki Yönlü Varyans Çalışması (General Trends and Two-Way Analysis of Variance.)

En yüksek SPL değerleri çoğunlukla metal yüzeyli malzemelerde (özellikle alüminyum karton) gözlemlenmiştir. Kompozit malzemeler güçlü bir yapısal iletim göstermiş ve ağırlıklı ses seviyeleri genel olarak yüksek çıkmıştır. Plastik ve sünger türü malzemeler, yapısal sönümleme etkisi nedeniyle daha orta seviyede ses üretmiştir. Ses uyarıcısı gücü arttıkça, malzemeler arasındaki fark daha belirgin hâle gelmiş ve yüksek rijitlikteki malzemeler daha yüksek ses değerlerine çıkma eğilimi göstermiştir. Empedansın yüksek olması (8  $\Omega$  ses uyarıcısı) daha yumuşak bir uyarım karakteri üreterek [dBA] seviyelerinin düşmesine neden olmuştur.

Tablo 5'te görüldüğü üzere, 400 Hz referans frekansta elde edilen SPL değerleri üzerinde malzeme türü ve ses uyarıcısı gücünün etkilerini incelemek amacıyla iki yönlü varyans analizi (Two-Way ANOVA) gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, hem malzeme türünün ( $F = 4228.84$ ,  $p < 0.001$ ) hem de uyarıcı gücünün ( $F = 543.68$ ,  $p < 0.001$ ) SPL üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, malzeme türü ile uyarıcı gücü arasında anlamlı bir etkileşim etkisi tespit edilmiştir ( $F = 92.13$ ,  $p < 0.001$ ). Bu bulgu, uyarıcı gücündeki değişimin her malzemede aynı ses iletim davranışını oluşturmadığını ve akustik performansın malzeme-uyarım enerjisi etkileşimine bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

**Tablo 5.** İki yönlü varyans analizi (Two-way analysis of variance)

Etki	Serbestlik Derecesi (DF)	F- Değeri	P-Değeri
Malzeme	6	4228.84	< 0.001
Güç	2	543.68	< 0.001
Malzeme $\times$ Güç	12	92.13	< 0.001
Hata	84	–	–

Tablo 6'da Tukey HSD post-hoc analizi, SPL değerlerinin özellikle Alüminyum-Karton, DC04 ve Sünger malzemeleri arasında belirgin şekilde farklılaştığını göstermiştir ( $p < 0.05$ ). Alüminyum-Karton numunelerinin, DC04 ve PLA gibi polimer ve metal esaslı malzemelere kıyasla anlamlı derecede daha yüksek SPL değerleri ürettiği belirlenmiştir. Buna karşılık, karbonfiber bazlı malzemeler ile sünger ve poliamid arasındaki farkların bazı güç seviyelerinde istatistiksel olarak anlamlı olmadığı görülmüştür. Tukey HSD post-hoc testi bulguları, Alüminyum-Karton malzemenin, DC04 çelik ve PLA gibi rijit veya polimer esaslı malzemelere kıyasla istatistiksel olarak anlamlı derecede daha yüksek bir ses iletim performansı sergilediğini göstermektedir ( $p < 0.001$ ). Bununla birlikte, Alüminyum-Karton ile Sünger ve Karbonfiber (Vakum İnfüzyon) arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamsız kalması ( $p > 0.05$ ), bu materyallerin 400 Hz frekansında benzer vibro-akustik tepkiler sunduğuna ve uyarım enerjisini ses dalgasına dönüştürmede eşdeğer verimlilikte olduğuna işaret etmektedir. Elde edilen bu sayısal veriler, otomotiv korna uygulamalarında geleneksel sistemlerin yerine geçebilecek 'sound exciter' tabanlı tasarımlarda, malzemenin mekanik sönümlenme ve rijitlik dengesinin SPL çıktısını optimize etmede belirleyici rol oynadığını doğrulamaktadır.

**Tablo 6.** Tukey post-hoc analizi (Tukey post-hoc analysis)

Karşılaştırma	Ortalama Fark (Db(A))	P-Değeri	Anlamlılık
Alüminyum-Karton – DC04	12.43	<0.001	Anlamlı
Alüminyum-Karton – PLA	7.07	<0.001	Anlamlı
Alüminyum-Karton – Poliamid	5.33	0.001	Anlamlı
Alüminyum-Karton – Karbonfiber (Prepreg)	4.13	0.018	Anlamlı
Alüminyum-Karton – Sünger	2.30	0.499	Anlamsız
Alüminyum-Karton – Karbonfiber (Vakum İnfüzyon)	3.30	0.110	Anlamsız
DC04 – Sünger	-10.13	<0.001	Anlamlı
DC04 – Poliamid	-7.10	<0.001	Anlamlı
DC04 – PLA	-5.37	0.001	Anlamlı
PLA – Sünger	-4.77	0.003	Anlamlı
Karbonfiber (Vakum) – DC04	9.13	<0.001	Anlamlı
Karbonfiber (Vakum) – PLA	3.77	0.042	Anlamlı
Diğer Karşılaştırmalar	—	>0.05	Anlamsız

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, farklı malzemelerden üretilmiş plakaların üç farklı ses uyarıcısı ile uyarılması sonucu elde edilen ses basınç düzeyleri karşılaştırılmış ve hem malzeme özelliklerinin hem de ses uyarıcısı karakteristiklerinin ses iletimi üzerinde belirleyici olduğu görülmüştür. Elde edilen deneysel bulgular, literatürdeki benzer vibro-akustik araştırmalar ve otomotiv uygulama standartları ile nicel olarak karşılaştırıldığında, seçilen malzemelerin akustik performansının endüstriyel beklentilerle yüksek bir korelasyon içinde olduğu görülmektedir. Çalışmada Alüminyum-Karton malzeme, 400 Hz referans frekansta 95,2 dB(A) (40 W uyarım altında) ve 98,1 dB(A) (15 W uyarım altında) gibi yüksek ses basınç seviyeleri (SPL) üreterek en yüksek iletim performansını sergilemiştir. 40 W'lık uyarıcı malzemeye genel olarak daha fazla titreşim enerjisi aktarsa da, Alüminyum Karton'un yapısal özellikleri 15 W'lık uyarım altında 400 Hz frekansında rezonans bölgesine daha yakın bir tepki vererek daha yüksek bir ses basınç seviyesi üretmiştir. Literatürde otomotiv korna sistemlerinin çoklu fiziksel fenomenlerini inceleyen Medè ve ark. [38], geleneksel elektromanyetik kornaların yaklaşık 400 Hz civarındaki ana çalışma frekansında ürettiği ses şiddeti seviyelerinin, bu çalışmada test edilen ses uyarıcısı (sound exciter) ve hafif sandviç plaka kombinasyonu ile elde edilen 90-100 dB bandı ile örtüştüğünü doğrulamaktadır. Benzer şekilde, Zenker ve ark. [12] tarafından yürütülen düz panel hoparlör çalışmalarında, ses uyarıcılarının uyarım gücüne bağlı olarak kompozit panellerde elde edilen akustik çıktılarının, malzemenin rijitlik-yoğunluk oranına ve sönümlenme kapasitesine bağlı olarak değişkenlik gösterdiği rapor edilmiştir. Bu sayısal kıyaslamalar, çalışmamızda kullanılan hafif ve rijit malzemelerin, UN/ECE Regulation No 28 standartlarında tanımlanan

akustik uyarıcı kriterlerini karşılama noktasında geleneksel sistemlere güçlü bir alternatif olabileceğini bilimsel olarak ispatlamaktadır.

Genel olarak, sonuçlar malzeme sertliği, yoğunluk, iç sönüm oranı ve yapısal rezonans özelliklerinin ses iletim davranışını belirlediğini; ses uyarıcısı gücü ve empedansının ise bu davranışı güçlendirip zayıflatabildiğini göstermektedir. Bu bulgular, malzeme seçiminde akustik performansın kritik bir parametre olduğunu, ayrıca farklı uyarım seviyelerinde malzemelerin ses iletim karakteristiklerinin mutlaka deneysel olarak doğrulanması gerektiğini ortaya koymaktadır. Çalışmadan elde edilen veri seti, titreşime dayalı ses üretimi ve gürültü kontrolü üzerine yapılacak tasarım ve optimizasyon çalışmalarına önemli katkı sağlayacak niteliktedir. Gelecek çalışmalarda, farklı uygulamalar için farklı frekans değerlerinde her bir malzemenin davranışlarının incelenmesi önerilmektedir.

### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Makale yazarları, aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

### ARAŞTIRMA ve YAYIN ETİĞİ BEYANI (STATEMENT OF PUBLICATION ETHICS)

Çalışmanın tüm süreçlerinin araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu, etik kurallara ve bilimsel atıf gösterme ilkelerine uyduğunu beyan ederim.

### YAZAR KATKISI (AUTHOR STATEMENT)

**Mert Ali ÖZEL:** Danışmanlık, Analiz/Yorum, Literatür Taraması, Taslak Hazırlama, Mizanpaj, Ana Metni Yazma. **Eren MURTULU:** Kaynaklar/Malzemeler, Veri Toplama, Veri İşleme. **Hikmet KARŞIYAKA:** Kaynaklar/Malzemeler, Veri Toplama, Veri İşleme.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Gohery, S., Adams, R., Ahmed, M., Liang, Q. Q., Moslemi, N., & Burvill, C. (2024). Experimental and numerical studies on the vibration-based structural health monitoring of dimpled steel sheets with residual stresses. *Engineering Structures*, 306, 117882.
- [2] Jung, J., Jensen, J. S., Jeong, C. H., Jeon, O., & Wang, S. (2021). Optimizing a distribution of resonators on a thin plate for the desired sound radiation. *Journal of Sound and Vibration*, 496, 115926.
- [3] Wang, D., Geng, Q., & Li, Y. (2018). Effect of static load on vibro-acoustic behaviour of clamped plates with geometric imperfections. *Journal of Sound and Vibration*, 432, 155-172.
- [4] Eisenberger, M., & Deutsch, A. (2019). Solution of thin rectangular plate vibrations for all combinations of boundary conditions. *Journal of Sound and Vibration*, 452, 1-12.
- [5] Wang, Y., Wu, H., Yang, F., & Wang, Q. (2021). An efficient method for vibration and stability analysis of rectangular plates axially moving in fluid. *Applied Mathematics and Mechanics*, 42(2), 291-308.
- [6] Kim, Y., & Park, J. (2020). A theory for the free vibration of a laminated composite rectangular plate with holes in aerospace applications. *Composite Structures*, 251, 112571.
- [7] Kopmaz, O. S. M. A. N., & Telli, S. E. V. D. A. (2002). Free vibrations of a rectangular plate carrying a distributed mass. *Journal of sound and vibration*, 251(1), 39-57.
- [8] Yildiz, A., & Kopmaz, O. (2017). Experimental and computational validation of an analytical model of free vibration of a rectangular plate carrying a distributed mass. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 10(2), 233.
- [9] Gurukiran, K., & Kumar Samal, P. (2021). Experimental determination of mode shapes of a plate using speaker as excitation device. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1189, No. 1, p. 012029). IOP Publishing.

- [10] Olive, S. E. (2004). A multiple regression model for predicting loudspeaker preference using objective measurements: Part II-Development of the model. In Audio Engineering Society Convention 117. Audio Engineering Society.
- [11] McMillan, A. J., & Keane, A. J. (1996). Shifting resonances from a frequency band by applying concentrated masses to a thin rectangular plate. *Journal of Sound and Vibration*, 192(2), 549-652.
- [12] Zenker, B., Rawoof, S. S. A., Merchel, S., & Altinsoy, M. E. (2019). Low Deviation and High Sensitivity—Optimized Exciter Positioning for Flat Panel Loudspeakers by Considering Averaged Sound Pressure Equalization. In Audio Engineering Society Convention 147. Audio Engineering Society.
- [13] Zenker, B., Heintl, M., Merchel, S., & Altinsoy, M. E. (2020). Low-frequency performance of a woofer-driven flat-panel loudspeaker (Part 2: Numerical system optimization and large signal analysis). In Audio Engineering Society Convention 149. Audio Engineering Society.
- [14] Jung, J., Kook, J., Goo, S., & Wang, S. (2017). Sound transmission analysis of plate structures using the finite element method and elementary radiator approach with radiator error index. *Advances in Engineering Software*, 112, 1-15.
- [15] Du, J., & Olhoff, N. (2007). Topological design of freely vibrating continuum structures for maximum values of simple and multiple eigenfrequencies and frequency gaps. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 34(2), 91-110.
- [16] Ma, X., Zhang, J. W., & Yan, S. M. (2012). Experimental modal analysis and modal reproduce experiment research of a chladini plate. *Applied Mechanics and Materials*, 152, 1401-1405.
- [17] Ikpe, A. E., Ndon, A. E., & Etuk, E. M. (2019). Response variation of Chladni patterns on vibrating elastic plate under electro-mechanical oscillation. *Nigerian Journal of Technology*, 38(3), 540-548.
- [18] Tuan, P. H., Wen, C. P., Chiang, P. Y., Yu, Y. T., Liang, H. C., Huang, K. F., & Chen, Y. F. (2015). Exploring the resonant vibration of thin plates: Reconstruction of Chladni patterns and determination of resonant wave numbers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(4), 2113-2123.
- [19] Escaler, X., & De La Torre, O. (2018). Axisymmetric vibrations of a circular Chladni plate in air and fully submerged in water. *Journal of Fluids and Structures*, 82, 432-445.
- [20] Pandit, M. K., Haldar, S., & Mukhopadhyay, M. (2007). Free vibration analysis of laminated composite rectangular plate using finite element method. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 26(1), 69-80.
- [21] Seçgin, A., & Sarıgül, A. S. (2008). Free vibration analysis of symmetrically laminated thin composite plates by using discrete singular convolution (DSC) approach: algorithm and verification. *Journal of Sound and Vibration*, 315(1-2), 197-211.
- [22] Hao, W. F., & Kam, T. Y. (2009). Modal characteristics of symmetrically laminated composite plates flexibly restrained at different locations. *International Journal of Mechanical Sciences*, 51(6), 443-452.
- [23] Zhang, X., & Li, W. L. (2010). A unified approach for predicting sound radiation from baffled rectangular plates with arbitrary boundary conditions. *Journal of Sound and Vibration*, 329(25), 5307-5320.
- [24] Xu, Z. S., Huang, Q. B., & Zhao, Z. G. (2011). Topology optimization of composite material plate with respect to sound radiation. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 35(1), 61-67.
- [25] Jiang, C. H., Kam, T. Y., & Chang, Y. H. (2017). Sound radiation of panel-form loudspeaker using flat voice coil for excitation. *Applied Acoustics*, 116, 375-389.
- [26] Wu, H., Jiang, W., & Liu, Y. (2013). Analyzing acoustic radiation modes of baffled plates with a fast multipole boundary element method. *Journal of Vibration and acoustics*, 135(1), 011007.
- [27] Currey, M. N., & Cunefare, K. A. (1995). The radiation modes of baffled finite plates. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 98(3), 1570-1580.
- [28] Snyder, S. D., & Tanaka, N. (1995). Calculating total acoustic power output using modal radiation efficiencies. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97(3), 1702-1709.
- [29] Hu, H. X., Tang, B., & Zhao, Y. (2016). Active control of structures and sound radiation modes and its application in vehicles. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 35(4), 291-302.

- [30] Yamaguchi, Z., Bolton, J. S., & Sakagami, K. (2011). Reduction of sound radiation by using force radiation modes. *Applied acoustics*, 72(7), 420-427.
- [31] Pasqual, A. M., de Franca Arruda, J. R., & Herzog, P. (2010). Application of acoustic radiation modes in the directivity control by a spherical loudspeaker array. *Acta Acustica United With Acustica-Stuttgart*, 96(1), 32.
- [32] Kam, T. Y., Su, H. M., & Huang, C. Y. (2017). Quasi-static buckling and first-ply failure loads of shear web reinforced glass-fabric composite wind blades. *Composite Structures*, 160, 1225-1235.
- [33] Jiang, C. H., & Kam, T. Y. (2013). Vibration analysis of elastically restrained laminated composite sound radiation plates via a finite element approach. *Procedia Engineering*, 67, 545-558.
- [34] Zenker, B., Merchel, S., & Altinsoy, M. E. (2020). Optimized Radiation Pattern and Time Response of Flat Panel Loudspeaker due to the Specific Damping of the Boundary Conditions. In *Proceedings of the DAGA*.
- [35] Duval, A., Crignon, G., Goret, M., & Ponsinet, D. (2023). Immersive Smart Trims Design Using Linear Inertial Transducers For A Better Audio Sound Quality And Easier Vehicle Integration. In *SIA NVH & Comfort Conference, Le Mans, France*.
- [36] Ramachandran, B., Raveendran, R., & Mondal, A. (2025). Horn Sound Digital Validation for ECE-R28 Regulation Compliance. In *Noise & Vibration Conference & Exhibition. SAE Technical Paper*.
- [37] Schneider, A. J. (1974). Relating Acoustical Measurements to SAE Procedures (No. 740212). *SAE Technical Paper*.
- [38] Medè, C., Doria, A., Munaretto, P., & Sg Valdecasas, J. (2019). Multi-physics phenomena influencing the performance of the car horn. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 38(2), 544-557.
- [39] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). (2008). Regulation No 28 - Uniform provisions concerning the approval of audible warning devices and of motor vehicles with regard to their audible signals.



© Author(s) 2026. This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>