

Gözenekli malzemelerin ses yutma katsayılarının deneysel ve sayısal yöntemlerle bulunması

Hüray CAN*

Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Çağış Kampüsü, Balıkesir

Geliş Tarihi (Recived Date): 05.02.2018
Kabul Tarihi (Accepted Date): 22.04.2018

Özet

Bu çalışmada kapalı mekânlarda ve taşıt kabinlerinde gürültü düzeyini azaltacak yalıtım malzemeleri için akustik yutma katsayılarının parametrik modelleri geliştirilmiştir. Öncelikle süngerimsi malzemeler için daha önce başkaları tarafından geliştirilen akustik yutma katsayısının matematiksel modelleri bu çalışma için gözden geçirilmiş ve uygun olanları sentetik gözenekli malzemeler üzerinde gözeneklilik, akış direnci vb. gibi değişkenlere bağlı olarak tekrar düzenlenmiştir. Matematiksel modellerde akustik empedanstan yola çıkılarak hesaplanan yutma katsayısı için doğrusal ve tek boyutlu dalga yayını esas alınmış olup, bu şartlar daha sonraki deneysel şartlarına uygunluk açısından gerekli görülmüştür. Daha sonra yine bu çalışma kapsamında geliştirilen çift mikrofonlu empedans tüpü ile FFT analiz cihazı ve bilgisayar kullanarak deneysel olarak yukarıdaki malzemeler için tek boyutlu doğrusal dalga yayınında yutma katsayısı ölçümleri yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Akustik empedans, ses yalıtım malzemeleri, akustik yutma katsayısı.

Determination of sound absorption coefficients of porous materials by means of experimental and numerical methods

Abstract

In this study, parametric models of acoustic absorption coefficients were developed for the insulation materials which will decrease the noise levels in closed places and vehicle cabins. Firstly, mathematical models of the acoustic absorption coefficient which were improved by other researchers for the foam materials were reviewed for the present study. The convenient ones were rearranged related to the variables as the porosity, flow resistivity etc. on the foam materials. In mathematical models, linear and

* Hüray CAN, hcan@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-1049-9242>

one-dimensional wave propagation formed the basis for the absorption coefficient which was calculated on the basis of acoustic impedance. These conditions were necessary for the subsequent experimental conditions in terms of convenience. Then, one-dimensional linear wave propagation absorption coefficient measurements were conducted for the abovementioned materials using the double-microphone impedance tube, FFT analyzer and the computer developed for the present study.

Keywords: *Acoustic impedance, sound insulation materials, acoustic absorption coefficients.*

1.Giriş

Teknolojik gelişmelerle birlikte artan gürültü, her geçen gün biraz daha yaşamı zorlaştırmaktadır. Gürültünün yayılma alanında (kaynakla alıcı arasındaki yolda) azaltılmasının birçok yolu olmakla birlikte ilk önlemlerden biri ses yalıtımıdır. Bunun için de öncelikle ses kaynağı ya da kaynaklarının belirlenerek uygun malzemeler ile yalıtımının sağlanması gerekir. Bu nedenle yalıtım malzemelerindeki akustik iletimin tanımlanabilmesi önem kazanmaktadır [1].

Kinsler ve Frey [2], harmonik hareket, çeşitli sistemlerin titreşim analizi, akustik düzlem dalgalar, sesin iletilmesi, tek ve üç boyutlu dalga denklemlerinin çözümü ve ses dalgalarının yutulmasını incelemiştir. Beranek [3], ses yutma kapasitesinin; malzemenin yüzeyi üzerinde veya malzeme içinde ses enerjisindeki kayıplara neden olabileceğini ve ses yutma kapasitesinin malzemenin yapısına, yoğunluğuna, elastikiyetine ve diğer özelliklere bağlı olduğunu belirtmiştir. Ses yutma kapasitesi ve malzemenin fiziksel özellikleri arasındaki ilişkiyi de ortaya koymuştur. Craggs [4], Mankovsky [5] ve Attenborough [6], gözenekli malzemelerde ses yutma katsayısının yoğunlukla akustik empedans vasıtasıyla ifade edileceğini belirtmişlerdir. Allard [7], gözenekli (gözenekli sünger esaslı) malzemelerde kesme modülünün ölçümü ve serbest alanda normal yüzey empedansının hesaplanmasını yapmış, ayrıca deneysel çalışmalarda elde edilen verilerin uygulanması için, kesme modülünün teorik olarak bulunmasını sağlamıştır. Can [8], lifli ve gözenekli (gözenekli sünger esaslı) malzemelerde ses yutma katsayılarının karşılaştırılmasını yapmıştır. Oliva [9], daha önce yapılmış empedans metodları üzerinde malzemelerin çeşitli özelliklerini kullanarak yutma katsayısını bulmuştur. Çalışkan [10], empedans tüpü ölçümlerinden elde edilen verileri işleyerek farklı tip ve kalınlıktaki gözenekli malzemelerinin akış direnci parametrelerini hesaplamıştır.

Bu çalışmada kapalı mekanlarda ve taşıt kabinlerinde gürültü düzeyini azaltacak yalıtım malzemeleri için akustik yutma katsayılarının belirlenmesinde kullanılacak model araştırılmış ve elde edilen sonuçlar ölçüm verileriyle karşılaştırılmıştır.

2.Teori

Ses yalıtım malzemesinin yutma katsayısı (α); yoğunlukla akustik empedans (Z) vasıtasıyla ifade edilir. Şekil 1'de gösterilen ses yalıtım malzemesinin yüzey empedansını bulmak için; malzeme rijit bir zemine yerleştirilir ve diğer yüzünün akustik alan olarak tanımlanan hava ile temas halinde olması sağlanır. Malzemenin yüzeyinde

M_1 ve M_2 , olan iki nokta seçilir. Serbest havadaki M_2 , malzemedeki ise M_1 'dir. Buna göre empedans:

$$Z = \frac{P}{v} \quad (1)$$

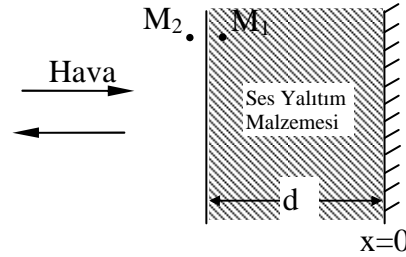
bağıntısından hesaplanır [4].

Burada Z empedans, p basınç, v hızı gösterir.

Gözenekli malzemenin yüzeyindeki basınç ve hava akışının sürekliliği iki denklemlerle ifade edilir:

$$p(M_2) = p(M_1) \quad (2)$$

$$v(M_2) = v(M_1)\phi \quad (3)$$



Şekil 1. Rijit duvara dayalı bir malzeme tabakası [7].

Serbest havadaki empedans $Z(M_2)$ ve gözenekteki empedans $Z(M_1)$ malzemenin yüzeyinde şu şekilde bulunur:

$$Z(M_2) = \frac{p(M_2)}{v(M_2)}, \quad Z(M_1) = \frac{p(M_1)}{v(M_1)} \quad (4)$$

$$\phi Z(M_2) = Z(M_1) \quad (5)$$

Burada ϕ gözenekliliktir.

Bir gözenekteki dalga denklemi çözülerek malzemenin yüzey empedansı elde edilir [4]:

$$Z(M_1) = -j Z_c \cotg kd \quad (6)$$

$$Z(M_2) = -j \frac{Z_c}{\phi} \cotg kd \quad (7)$$

Yukarıdaki denklemlerde d malzemenin kalınlığını, k havadaki dalga sayısını ve Z_c karakteristik empedansı gösterir.

Süngerimsi ses yalıtım malzemelerinde ise Z yüzey empedansı, aşağıda verilen denklemden hesaplanır[9,10].

$$Z = -j \frac{(Z_1^s Z_2^f \mu_2 - Z_2^s Z_1^f \mu_1)}{D} \quad (8)$$

Bu denklemde yer alan D bir orandır ve aşağıdaki ifade ile açıklanır.

$$D = (1 - \phi + \phi \mu_2) [Z_1^s - (1 - \phi) Z_1^f \mu_1] \operatorname{tg} \delta_2 \ell + (1 - \phi + \phi \mu_1) [Z_2^f \mu_2 (1 - \phi) - Z_2^s] \operatorname{tg} \delta_1 \ell \quad (9)$$

Şekil 1'deki M_2 noktasındaki yutma katsayısı $\alpha(M_2)$; yansıma katsayısı $R(M_2)$ kullanılarak elde edilir[3,5].

$$\alpha(M_2) = 1 - |R(M_2)|^2 \quad (10)$$

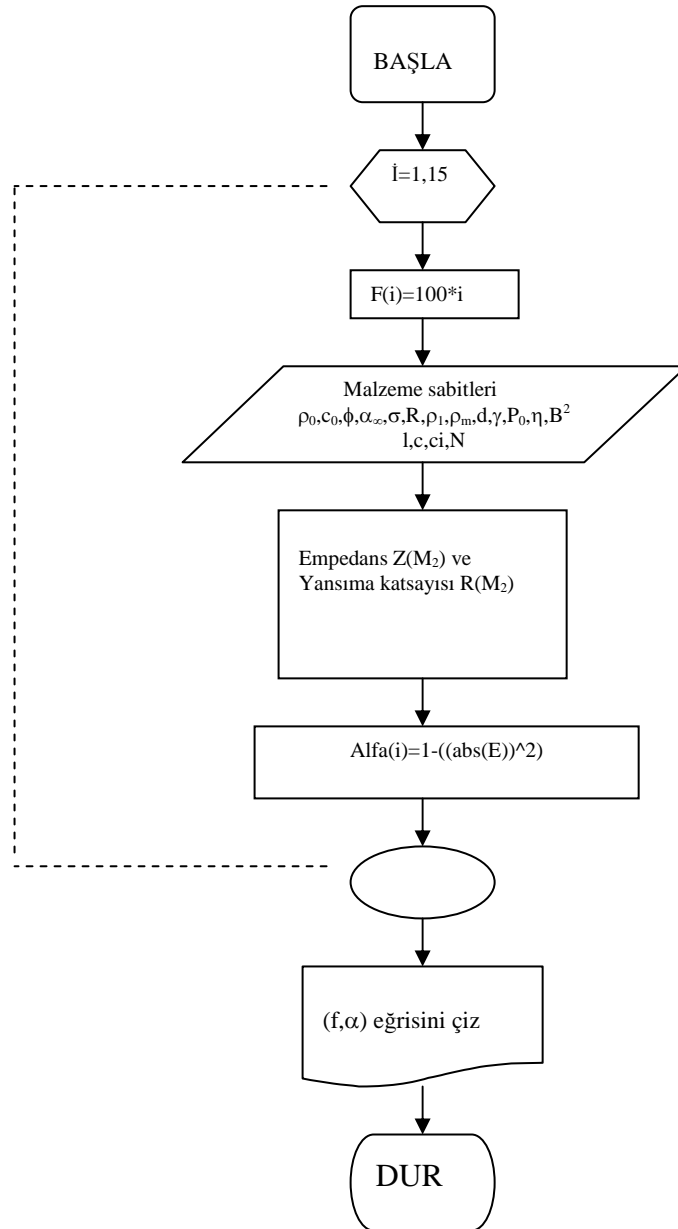
Burada, yansıma katsayısı

$$R(M_2) = \frac{Z(M_2) - Z_c^1}{Z(M_2) + Z_c^1} \quad (11)$$

şeklindedir.

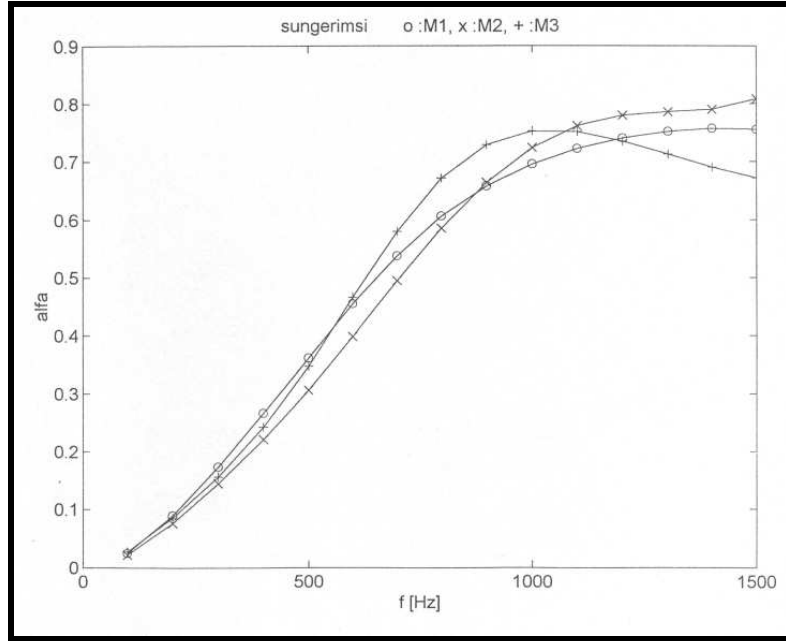
3.Bilgisayar programı

Öncelikle akustik yutma katsayısının matematiksel modeli bu çalışma için gözden geçirilmiş ve uygun olan süngerimsi malzemelerin üzerinde gözeneklilik, yapı şekil faktörü, akış direnci, kesme modülü, malzemenin kalınlığı, ses basıncı, poisson oranı vb. gibi değişkenlere bağlı olarak tekrar düzenlenmiştir. Matematiksel modelde akustik empedanstan yola çıkılarak hesaplanan yutma katsayısı doğrusal ve tek boyutlu dalga yayılımı esas alınmış olup, bu şartlar daha sonraki deneysel şartlara uygunluk açısından gerekli görülmüştür. Bölüm 2'de belirtilen rijit duvara dayalı yalıtım malzemelerinin empedans modelleri dikkate alınarak Şekil 2'deki blok diyagramından yutma katsayıları hesaplanmıştır[1].



Şekil 2. Gözenekli malzemelerin (gözenekli sünger esaslı) yutma katsayısının bulunması için kullanılan ana programın blok diyagramı [1].

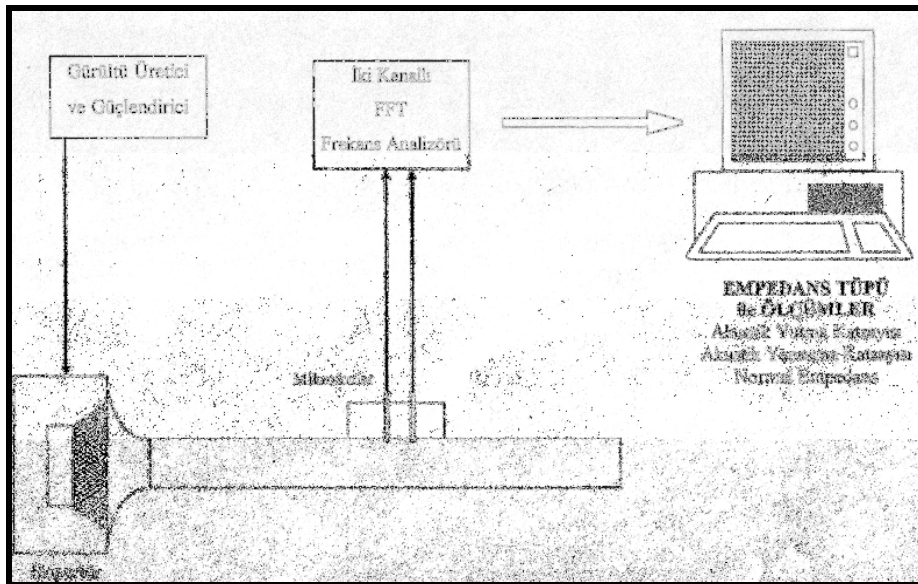
Bilgisayar programının çalıştırılması sonucu elde edilen verilerden, yutma katsayısının frekansa göre değişimi Şekil 3’te verilmiştir. Şekillerde görüleceği üzere yapılan çalışmada farklı yoğunlukta yalıtım malzemesi kullanıldığından dolayı farklı yutma katsayıları gözlenmiştir. Gözenekli malzemelerinin de yutma katsayıları artan frekansa bağlı olarak artış göstermiştir.



Şekil 3. Gözenekli (Gözenekli sünger esaslı) malzemelerde yutma katsayıları.

4. Deneysel çalışma

Model sonuçlarının doğruluğunu kontrol edebilmek için, çift mikrofona empedans tüpü ile FFT analiz cihazı kullanarak malzemelerin tek boyutlu doğrusal dalga yayılımında yutma katsayıları ölçülmüştür (Şekil 4). Ölçüm değerlerinin değişimi Şekil 5'te verilmiştir [1,2].



Şekil 4. Empedans tüpü.



Şekil 5. Süngerimsi ses yalıtım malzemelerinde deneysel yutma katsayıları.

Şekil 3'te M_1, M_2, M_3 'ün gözenekli (gözenekli sünger esaslı) ya da süngerimsi S_1, S_2 ve S_3 malzemeler olduğu gösterilmiştir. Deneysel yutma katsayısı bulunurken de gözenekli (gözenekli sünger esaslı) malzeme kullanıldığından Şekil 5'te eğriler üzerinde S_1, S_2 ve S_3 malzemeler tekrar belirtilmiştir.

5. Sonuçlar ve tartışma

Gözenekli (Gözenekli sünger esaslı) malzemeler ise izotropik malzemelerdir. Yani; farklı yönlerde, yapısal özellikleri değişkenlik göstermez. Gözenekli malzemelerin modellenmesinde kullanılan parametrelerde, sabit ve deneysel ölçümü yapılan değerler olmak üzere iki grupta toplanır. Sabit parametreler Tablo 1'de, deneysel parametreler Tablo 2'de verilmiştir [5,6].

Tablo 1. Gözenekli (Gözenekli sünger esaslı) malzemelerin modellenmesinde kullanılan sabit parametreler.

Parametreler	Semboller	Birimi
Havanın yoğunluğu	$\rho=1.213$	kg/m^3
Ses hızı (havada)	$c_o=342.2$	m/s
($\gamma=c_p/c_v$)	$\gamma=1.4$	—
Ses basıncı	$p_o=1.0132 \cdot 10^5$	Pa
Havanın viskozitesi	$\eta=1.84 \cdot 10^{-5}$	poise
Prandtl sayısı	$B^2=0.71$	—
Poisson oranı	$\nu=0.4$	—

Tablo 2. Gözenekli(Gözenekli sünger esaslı) malzemelerin deneysel parametreleri.

Malzemeler	Parametreler	Ölçüm	Birimi
Malzeme 1	Akış direnci(σ)	98600	Ns/m ⁴
	Kesme modülü(N)	(1.45+j1.925)10 ⁵	N/m ²
	Yapı şekil faktörü(α_∞)	4	-
	Gözeneklilik(ϕ)	0.96	-
	İskelet yoğunluğu(ρ_1)	100	kg/m ³
Malzeme 2	Akış direnci(σ)	65800	Ns/m ⁴
	Kesme modülü(N)	(4.25+j1.25)10 ⁵	N/m ²
	Yapı şekil faktörü(α_∞)	3.17	-
	Gözeneklilik(ϕ)	0.97	-
	İskelet yoğunluğu(ρ_1)	160	kg/m ³
Malzeme 3	Akış direnci(σ)	72250	Ns/m ⁴
	Kesme modülü(N)	(5+j3.25)10 ⁵	N/m ²
	Yapı şekil faktörü(α_∞)	5.29	-
	Gözeneklilik(ϕ)	0.98	-
	İskelet yoğunluğu(ρ_1)	125	kg/m ³

Sayısal ve deneysel yutma katsayılarının karşılaştırılmasında Gözenekli(Gözenekli sünger esaslı) malzemeler lifli malzemelere göre daha iyi sonuç vermiştir[8]. Süngerimsi malzemelerde 1000 Hz civarında her üç malzeme için birbirine yakın değerler bulunmuştur. Gözenekli malzemelerin yutma katsayılarının karşılaştırılması Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Gözenekli(Gözenekli sünger esaslı) malzemelerin yutma katsayılarının karşılaştırılması.

Malzeme	Frekans(Hz)	Yutma katsayısı(Hesaplanan)	Yutma katsayısı(Deneysel)
Malzeme 1	500	0.36	0.17
	1000	0.7	0.6
	1500	0.75	0.91
Malzeme 2	500	0.31	0.24
	1000	0.73	0.83
	1500	0.81	0.87
Malzeme 3	500	0.35	0.24
	1000	0.75	0.75
	1500	0.68	0.9

6. Sonuç

Bu çalışmada; ses yalıtım malzemesi olarak Gözenekli(Gözenekli sünger esaslı) malzemeler kullanılmış olup, homojen olarak alınan malzemelerin akustik empedans modelleri kurularak sayısal yutma katsayıları bulunmuştur.

Sayısal çalışmaları, deneysel çalışmalar desteklemiştir. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçları iki bölüm altında toplayabiliriz:

Bunlardan birincisi; ses yalıtım malzemelerinin yutma katsayısında etken olan akış direnci, kesme modülü, yapısal şekil faktörü, gözeneklilik, iskelet yoğunluğu gibi parametrelerin ölçümü yapılmıştır.

İkincisi; Şekil 4'te gösterilen, empedans tüp ile elde edilen yutma katsayıları hesaplanmış(MATLAB programı) yutma katsayıları ile karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda bazı frekanslarda sayısal ve deneysel sonuçlar birbirine tutmamıştır. Deneysel çalışmalarda; numunelerin hazırlanmasında ve deneysel empedans tüpündeki rezonans olayı bu sonuçları olumsuz yönde etkilemiş olabilir.

Süngerimsi malzemelerde yaklaşık olarak 500 Hz'de 0.34, 1000 Hz'de 0.72, 1500 Hz'de 0.74 yutma katsayıları elde edilmiştir.

Bunun sonucunda; Gözenekli(Gözenekli sünger esaslı) malzemelerde yüksek frekanslarda yutma katsayıları daha iyi olduğu anlaşılmıştır.

Böylelikle gürültünün niteliğine uygun ses yalıtım malzemelerindeki ses yutma katsayısının belirlenmesine çalışılmıştır.

Semboller

Simge	Adı	Tanım/Değeri	Birimi
c_0	Sesin havada yayılma hızı		ms^{-1}
d	Malzemenin kalınlığı		m
k	Dalga sayısı		-
N	Kesme modülü		Nm^{-2}
R	Yansıma katsayısı		-
u	Parçacık hızı		ms^{-1}
Z	Empedans		-
Z_C	Karakteristik empedans		-
Z^s	Havadaki empedans		
Z^f	İskeletteki empedans		
α_∞	Yapı şekil faktörü		
α	Yutma katsayısı		-
ε	Yer değiştirme vektörü		-
η	Havanın viskozitesi		poise
φ	Deplasman potansiyeli		-
ϕ	Gözeneklilik	$V_{göz}/V_{top}$	-
ρ_1	İskelet yoğunluğu		kgm^{-3}
ρ_0	Havanın yoğunluğu		kgm^{-3}
σ	Akış direnci		Nsm^{-4}
ω	Açısal frekans		$rads^{-1}$

Kaynaklar

- [1] Can, H., Akustik Yalıtım malzemelerinin sayısal ve deneysel yönden analizi ve geliştirilmesi, **Doktora Tezi**, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, (1999).
- [2] Kinsler, E.L., Frey, A.R., **Fundamentals of Acoustics**, John Wiley&Sons Inc., 231-261, New York, (1950).
- [3] Beranek, L.L., **Acoustics**, American Institute of Physics Inc., 16-40, New York, (1986).
- [4] Craggs, A., Hildebrandt, J.G., The Normal Incidence Absorption Coefficient of a Matrix of Narrow Tubes with Constant Cross Section, **J. Sound Vib.**, 105, 101-107, (1986).
- [5] Mankovsky, V.S., **Acoustics of Studios and Auditoria**, Focal Pres,27-56, London, (1980).
- [6] Attenborough, K., The prediction of oblique-incidence behaviour of fibrous absorbents, **Journal of Sound and Vibration**, 14, 183-191, (1971).
- [7] Allard, J.F., **Propagation of Sound in Porous Media**, 207-215, London, (1993).
- [8] Can, H., Emel, E., Ses Yalıtım Malzemelerinin Parametrik Modelleri”, **8.Ulusal Akustik Kongresi**, Bildiriler CD’si, Kemer-Antalya, 27-28 Kasım (2008).
- [9] Oliva, D., Hongisto V., Sound absorption of porous materials Accuracy of prediction methods, **Applied Acoustics**, 74, 1473–1479, (2013).
- [10] Arslan, E., Çalışkan, M., Gözenekli malzemelerin ses yutma katsayılarının ampirik ve sayısal yöntemlerle tahmini, **12.Ulusal Akustik Kongresi**, Bildiriler kitabı, 277-283, İzmir, (2017).