

RESEARCH ARTICLE / ARAŞTIRMA MAKALESİ

SICAKLIĞIN GÖZENEKLİ MALZEMELERİN SES YUTUM KATSAYISI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

EFFECT OF TEMPERATURE ON THE SOUND ABSORPTION OF POROUS MATERIALS

Murat UYSAL ¹, Murat YILMAZ ², Ahmet FEYZİOĞLU ³

¹Teksan Jeneratör ARGE Merkezi, 34791, İstanbul, Türkiye

²Teksan Jeneratör ARGE Merkezi, 34791, İstanbul, Türkiye

³Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34854, İstanbul, Türkiye

Öz

Günümüzde gürültü seviyesinin düşük olması istenen birçok endüstriyel üründe ses yalıtımı amacıyla sünger, taş yünü vb. malzeme kullanılmaktadır. Bu malzemeler sadece ses yutumu amacıyla kullanılabileceği gibi bazı durumlarda hava akışına izin verilen bir boşlukta ses iletimini düşürmek amacıyla da kullanılabilir. Bu malzemelerin bir diğer kullanım alanı ise konferans salonlarında konuşmacı ile dinleyiciler arasındaki ses iletim kalitesini en yüksek seviyeye taşımaktır. Bütün bu kullanım amaçlarının yanı sıra bu tip malzemelerin, kapalı bir kabin ya da oda içerisindeki değişken sıcaklık koşullarında nasıl davranış göstereceği önemli bir konudur. Kapalı bir ortam içerisindeki bir makinenin çalışması durumunda ortama yayılan ısı ve meydana gelen sıcaklık artışı ses yutumu katsayısı üzerinde etkili olabilmektedir. Malzeme ve ortamda bulunan havanın fiziksel özelliklerinin sıcaklık artışı ile değişmesi ses yutumu katsayısının da değişmesine neden olabilmektedir. Bu çalışmada, sıcaklık değişiminin süngerin ses yutumu katsayısı üzerindeki etkisi Miki modeli, Delany-Bazley modeli, ANSYS sonlu elemanlar analiz modeli ve empedans tüpü ile deneyel olarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: ses yutumu katsayısı, gözenekli akustik malzemeler, sıcaklık etkisi

Abstract

The management of noise levels in various industrial products has led to the utilization of materials like foam and rockwool to achieve sound insulation. These materials serve the purpose of sound absorption and, in certain scenarios, facilitate the reduction of sound transmission within spaces where airflow is permitted. Moreover, they play a crucial role in optimizing sound transmission quality between speakers and listeners within conference halls. While these applications are significant, an equally crucial consideration is how these materials respond to varying temperature conditions within enclosed spaces.

The interplay between temperature, sound absorption, and the materials' properties forms the core of this investigation. In environments where machinery operates within confined spaces, the release of heat and subsequent temperature increase can profoundly impact the sound absorption coefficient of materials. This phenomenon stems from alterations in both the physical characteristics of materials and the properties of the surrounding air as temperatures shift. To comprehensively study this phenomenon, the Miki model, Delany-Bazley model, ANSYS finite element analysis, and empirical impedance tube tests have been employed.

The Miki model and Delany-Bazley model have been cornerstones in predicting sound absorption coefficients of fibrous and porous materials. By defining relationships between characteristic impedance and propagation constants, these models enable approximations of sound absorption coefficients based on properties like density and porosity. However, while these models provide insightful predictions, their accuracy rests on various assumptions, such as the negligible impact of temperature changes on material structure. The aim of this study is to examine the validity of these assumptions by subjecting them to rigorous empirical and numerical testing.

Finite element analysis conducted through ANSYS software has been instrumental in verifying the mathematical predictions of sound absorption coefficients. This analysis involves manipulating variables like cylinder diameter and wavelength to ensure adequate resolution for accurate simulations. Such simulations shed light on the complex interactions between material properties, structure, and temperature. To further validate these numerical findings, empirical impedance tube tests were performed, adhering to ISO and ASTM standards. These tests provide empirical evidence of sound absorption

Sorumlu Yazar: Ahmet Feyzioğlu, Tel: 0216 777 07 77, E-posta: ahmet.feyzioglu@marmara.edu.tr

Gönderilme: 07.09.2023, **Düzenleme:** 15.02.2026, **Kabul:** 27.02.2026

coefficients under varying temperature conditions, serving as benchmarks for comparison with mathematical predictions.

The outcomes of this research are multifaceted. Firstly, they reveal the interconnectedness of sound absorption coefficients, temperature, and material properties. The proposition that temperature changes insignificantly affect material behavior, except for the variations in dynamic viscosity and density of air, has been examined in detail. The study indicates that this proposition is reasonably accurate under the conditions tested, with test results closely aligning with mathematical predictions. Additionally, the research underscores the reliability of the Miki model and Delany-Bazley model, as these mathematical approximations closely match both numerical simulations and empirical test results.

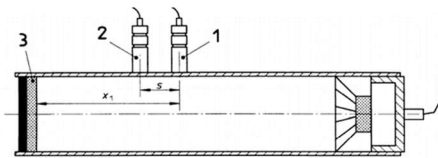
Practically, these findings hold substantial implications. In various industries, from generators to household appliances, the behavior of materials under changing temperature conditions is crucial for design and operational considerations. The study's conclusions suggest that the initial mathematical predictions and finite element analyses have a significant degree of universality. These insights can guide product design and operational strategies across diverse climates and thermal conditions.

This study aims to illuminate the intricate relationship between temperature, sound absorption, and material properties. By combining mathematical modeling, finite element analysis, and empirical testing, it highlights the interplay of these factors and offers practical insights into the behavior of porous materials under changing temperature conditions. The results validate the accuracy of mathematical predictions, confirming their utility in diverse contexts. Ultimately, this research contributes to the optimization of noise control strategies across various industrial sectors..

Keywords: absorption coefficient, porous materials, temperature effect

I. GİRİŞ

ISO-10534-2 standardında ses yutum katsayısının ölçüme ile ilgili yöntem tarif edilmektedir. Bu standartta, frekansa göre kullanılması gereken tüp çapı tanımlanmış olup ses yutum katsayısının hesabı için de denklemler verilmiştir. Standartta tarif edilen tüpün bir ucuna ses kaynağı, diğer ucuna ise numune yerleştirilmektedir. İki mikrofondan alınan ölçüm değerlerinin transfer fonksiyonu ile ses yutum katsayısı hesabı yapılmaktadır [1].



Şekil 1. Empedans Tüpü (ISO-10534-2)

Akış geçirgenliği için lif çapı, gözeneklilik oranı ve yoğunluk bilgileri ile Kozeny-Carman yöntem kullanılarak akış geçirgenliği tahmin edilmektedir. Akış geçirgenliği ve ses yutum katsayısı arasında Delany-Bazley (Miki) denklemleri ile açıklanan

matematiksel bir ilişki bulunmaktadır. Bu ilişkiden faydalanılarak elde edilen hata fonksiyonunun minimize edilmesi ile tahmin edilen akış geçirgenliği değerinden gerçek akış geçirgenlik değerine ulaşılmaktadır [2].

Literatürde, empedans tüpü ile deneysel olarak ses yutum katsayısının ölçülmesi, Delany-Bazley (Miki) yöntemi ile matematiksel olarak tahmin edilmesi, sonuçları karşılaştırarak hata oranının belirlenmesi ve sonuçların yakınsatılması gibi çalışmalar bulunmaktadır.

Bu çalışmada ise, deneysel olarak elde edilen ses yutum katsayısı, Delany-Bazley (Miki) yöntemi ile matematiksel olarak elde edilen ses yutum katsayısı ve sonlu elemanlar analizi ile elde edilen ses yutum katsayısı karşılaştırılarak sıcaklığın ses yutum katsayısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonlu elemanlar analiz modelinde yapılan akustik analizler ile ses yutum katsayısı nümerik olarak elde edilmekte ve bu ses yutum katsayısını verecek akış geçirgenlik değerleri parametrik olarak elde edilmektedir. Delany-Bazley (Miki) yöntemi ile tamamen matematiksel olarak elde edilen ses yutum katsayısı deneysel olarak elde edilen ses yutum katsayısı ve sonlu elemanlar analizi ile elde edilen ses yutum katsayısı ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

II. MATERYAL VE METOD

2.1. Analitik Hesaplamalar

Delany ve Bazley tarafından çok sayıdaki ölçüm sonucundan yararlanılarak ampirik bir bağıntı geliştirilmiştir. Bu bağıntıya göre izotropik homojen malzemelerdeki ses yayılımı iki kompleks değer ile belirlenmektedir. Karakteristik empedans $Z_0 = R + jX$ ve yayılım sabitini $\gamma = \alpha + j\beta$ içeren bu bağıntı ile lifli malzemelerin ses yutum katsayıları kestirebilmektedir [3].

$$R = \rho_0 c_0 \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{f}{\sigma} \right)^b \right\} \quad (1)$$

$$X = -\rho_0 c_0 \left\{ c \left(\frac{f}{\sigma} \right)^d \right\} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{\omega}{c_0} p \left\{ \left(\frac{f}{\sigma} \right)^q \right\} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\omega}{c_0} \left\{ 1 + r \left(\frac{f}{\sigma} \right)^s \right\} \quad (4)$$

Burada yer alan ρ_0 havanın yoğunluğunu, c_0 ses yayılım hızını, ω ise açısal frekansı ifade etmektedir. Denklemlerde yer alan a, b, c, d katsayıları ve p, q, r, s dereceleri kestirim modellerine göre farklılık gösteren sabitlerdir [4].

Tablo 1. Miki modeli için katsayı ve dereceler [4]

Katsayı	Derece
a = 0.0699	b = -0.632
c = 0.107	d = -0.632
p = 0.160	q = -0.618
r = 0.109	s = -0.618

Tablo 2. Delany-Bazley modeli için katsayı ve dereceler [4]

Katsayı	Derece
a = 0.0497	b = -0.754
c = 0.0758	d = -0.732
p = 0.169	q = -0.595
r = 0.0858	s = -0.700

Miki ve Delany-Bazley modellerinin her ikisi de lifli malzemeler için geliştirilmiş olup gözenekli malzemeler için de iyi sonuçlar vermektedirler. Delany-Bazley modelinde $0.01 < f/\sigma < 1$ aralığında çalışılması önerilirken, Miki modelindeki çalışma aralığı $0.01 < f/\sigma$ olup, herhangi bir üst sınır bulunmamaktadır [5].

Karakteristik empedans, yayılımı katsayısı, yansıma ve yutum katsayıları geçerli olmaktadır yeterli kalınlıkta malzeme kullanılacağı zaman geçerli olmaktadır. Çoğu zaman ise nispeten daha ince malzemeler uygulanmaktadır. Böyle bir durumda ise arkasına tam yansıtıcı bir yüzey yerleştirilmiş 1 kalınlığındaki bir malzemenin empedansı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır [3].

$$Z = Z_0 \coth \gamma l \quad (5)$$

Uygun Z_0 ve γ değerleri için ses yutum katsayısı ise aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$\alpha_n = 1 - \left| \frac{Z - \rho_0 c_0}{Z + \rho_0 c_0} \right|^2 \quad (6)$$

Miki ve Delany-Bazley yöntemleri ile malzemenin frekansa bağlı ses yutum katsayısına ulaşabilmek için spesifik akış direncinin bilinmesi gerekmektedir. Bunun için Poiseuille denklemi ile fiber çapı, birim hacim yoğunluğu ve fiber yoğunluğu bilinen malzemenin akış direnci aşağıdaki denklemler ile hesaplanabilmektedir.

$$\sigma_f = \frac{180\mu(T)(1 - \varphi)^2}{d_f^2(T)\varphi^3} \quad (7)$$

$$\varphi = 1 - \frac{p_m}{p_f} \quad (8)$$

Burada μ dinamik viskozite değeri, d_f fiber çapı, p_m birim hacim yoğunluğu ve p_f fiber yoğunludur [6]. Lifli malzemeler için verilen akış

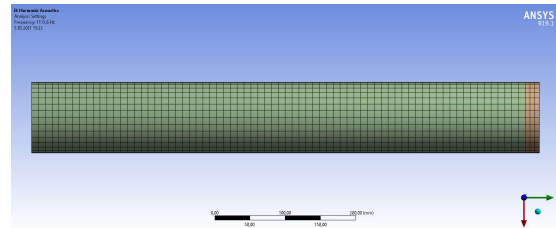
direnci formülündeki dinamik viskozite değeri ile fiber çapı sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Gözenekli malzemeler için akış direnci hesabı ise aşağıdaki denklem ile yapılmaktadır.

$$\sigma_g = \frac{32\mu(T)}{d_g^2(T)} \rho_0(T) \quad (9)$$

Bu formüle göre malzemenin akış direnci, havanın dinamik viskozite değeri ile malzemenin ısıl genişleme miktarına bağlı olarak değişmektedir. Diğer yandan havanın öz kütlesinin sıcaklık ile değişimi akış direnci üzerinde etkili olmaktadır [7].

$$d_s = d_i \left[1 + \frac{\alpha_L}{2} (T_s - T_i) \right] \quad (10)$$

2.2. Sonlu Elemanlar Analizi



Şekil 2. Sonlu Elemanlar Analiz Modeli

Sonlu elemanlar analizlerinde ANSYS yazılımı kullanılmıştır. Dalga boyu için uygun koşulu sağlayabilmek amacıyla silindir çapı, 90Hz – 2000Hz aralığı için 100mm, 800Hz – 6500Hz aralığı için ise 30mm olarak tanımlanmıştır [8]. Silindirin bir tarafında ses kaynağı tanımlanmış, numune modeli yer alan değer tarafında ise tam yansıtıcı yüzey tanımlanmıştır. Böylece, numunenin bir tarafı hava ile temas ederken diğer tarafı ise tam yansıtıcı yüzey ile temas etmektedir. 1/3 oktav bantlarda yapılan çözümlerin doğruluğunu sağlayabilmek amacıyla en büyük eleman ölçüsü, ilgili merkez frekansa karşılık gelen dalga boyunun sekizde biri olarak tanımlanmıştır [9].

2.3. Test Düzeneği

ISO 10534-2 ve ASTM E1050 standartlarına uygun olarak geliştirilmiş olan empedans tüpü ile ölçümler yapılmıştır. Bu empedans tüpü, farklı bant aralıklarını ölçmek amacıyla iki farklı iç çapa sahip olabilecek şekilde dönüştürülebilen bir empedans tüpü olup 98mm çap ile 50Hz – 700Hz aralığı, 23mm çap ile 700Hz – 6400Hz ölçülebilmektedir [10]. Sistemde, 4 kanallı NI-9215 veri toplama kartı ile B&K 4187 model mikrofonlardan elde edilen sinyaller toplanmakta, Blaupunkt EMA255 güç amplifikatörü ile hoparlör beslemesi yapılmaktadır.



Şekil 3. Testleri Gerçekleştirmede Kullanılan Empedans Tüpü

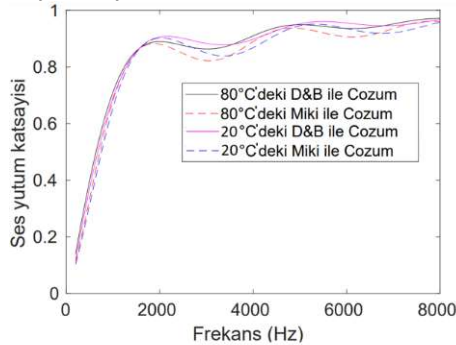
Yapılan testlerde 55mm kalınlıkta ve 23mm çapta kesilmiş sünger ile 55mm kalınlıkta 98mm çapta kesilmiş süngerlerin ses yutum katsayıları ölçülmüştür.



Şekil 4. Testte Kullanılan Süngerler

III. ANALİZ VE HESAPLAMALAR

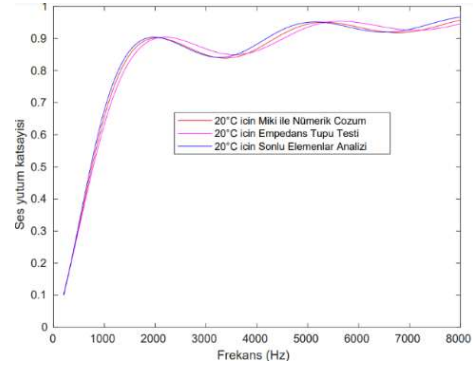
20°C ve 80°C'deki ölçümler ile sıcaklığın ses yutum katsayısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu ölçümler empedans tüpünün içerisinde ısıtıcı pedler ile ısıtılması ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları Miki ve Delany-Bazley formülleri kullanılarak hesaplanan değerler ile karşılaştırılmış, ANSYS sonlu elemanlar analizi ile üçüncü bir kontrol gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. Miki ve Delany-Bazley Modelleri ile Elde Edilen Sonuçlar

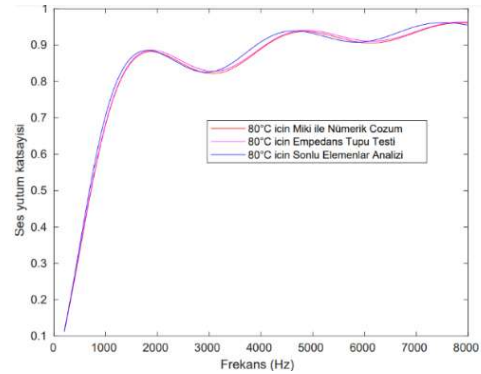
Miki ve Delany-Bazley formülleri kullanılarak 50mm kalınlığındaki sünger için hesaplanan ses yutum katsayılarının grafikleri oluşturulmuştur. Karşılaştırmak amacıyla oluşturulan bu grafiklerde iki yöntem ile çok yakın grafikler elde edilmesinin yanı sıra sıcaklığın etkisinin çok düşük olduğu görülmüştür. Burada en önemli nokta hesaplamalar yapılırken akış direnci hesabında ve Miki ile Delany-Bazley formüllerinde yalnızca havanın dinamik viskozitesi ve yoğunluğu değiştirilmiş, malzemenin lif yapısı ve gözenek yapısında meydana gelebilecek değişim ihmal edilmiştir. Yapılan bu kabulde malzemenin lif yapısında meydana gelecek ısı genleşmelerinin ihmal edilebilecek kadar küçük olması etkili olmuştur. Sıcaklık değişiminin yalnızca havanın dinamik viskozitesi ve yoğunluğu üzerinde etkili olduğu kabul edildiğinde elde edilen sonuçlara göre sıcaklığın ses yutum katsayısı üzerindeki etkisi oldukça düşüktür. Sonuçların doğruluğunu kontrol etmek amacıyla;

nümerik doğrulamada Sonlu Elemanlar Analizleri, deneysel doğrulamada ise empedans tüpü ile yapılan test sonuçları kullanılmıştır.



Şekil 6. 20°C'de Miki Modeli, Sonlu Elemanlar Analizi ve Empedans Tüpü Test Sonucu Karşılaştırması

20°C'de yapılan empedans tüpü testleri Miki ve Delany-Bazley modeli ve Sonlu Elemanlar Analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmada frekans bazlı inceleme yapılmış ve en yüksek farkın %3.1 olduğu görülmüştür. Test sonucu ile nümerik analizlerin karşılaştırılmasında görülebilecek olan bir fark olduğundan sonuçların örtüştüğü ve doğrulandığı kabul edilmiştir.



Şekil 7. 80°C'de Miki Modeli, Sonlu Elemanlar Analizi ve Empedans Tüpü Test Sonucu Karşılaştırması

80°C'de yapılan empedans tüpü testleri Miki ve Delany-Bazley modeli ve Sonlu Elemanlar Analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmada frekans bazlı inceleme yapılmış ve en yüksek farkın %2.8 olduğu görülmüştür. Test sonucu ile nümerik analizlerin karşılaştırılmasında görülebilecek olan bir fark olduğundan sonuçların örtüştüğü ve doğrulandığı kabul edilmiştir.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, ses izolasyonu için tercih edilen sünger yapısındaki malzemenin ses yutum katsayısının sıcaklık ile değişimi incelenmiştir. İncelemelerde, Miki ile Delany-Bazley modeli kullanılarak nümerik çalışmalar yapılmış ve ANSYS ile sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçların doğrulaması için ise empedans tüpü ile testler yapılmıştır. Çalışmanın başında yapılan önerme; sıcaklığın malzeme üzerindeki değişiminin ihmal edilmesi,

yalnızca havanın dinamik viskozite ve yoğunluk değişiminin göz önünde bulundurulması şeklinde oluşturulmuştur. Hesaplamalar, nümerik analizler ve empedans tüpü ile yapılan testlerin sonucunda önerme doğrulanmıştır. Bu sonuç, özellikle dünyanın çeşitli ülkelerine ürün gönderimi yapan jeneratör, beyaz eşya vb. sektörler için önem taşımaktadır. İlk aşamada yapılan hesaplamaların ve analizlerin farklı ülkelerin çeşitli iklim koşullarında da çok büyük ölçüde geçerli olacağı görülmüştür. Bunun yanı sıra makinenin çalışması sonrasında meydana gelecek ısılar neticesinde yükselecek sıcaklık da ses yutumu katsayısı üzerinde önemli bir etkiye sahip olamayacaktır. Başlangıçta yapılan akustik analizler ve hesaplamalar dünyanın her yerinde, her iklim koşulunda ve makinenin çalışmaya başlaması sonrasında geçerliliğini güvenli bir biçimde koruyacağı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] ISO. (1998). ISO 10534-2:1998 Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 2: Transfer-function method.
- [2] Yang, T., Saati, F., Horoshenkov, K. V, Xiong, X., Yang, K., Mishra, R., Marburg, S., ve Militký, J. (2019). Study on the sound absorption behavior of multi-component polyester nonwovens: Experimental and numerical methods. *Textile Research Journal*, 89(16), 3342-3361
- [3] Delany, M.E., ve Bazley, E.N. (1970). Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied acoustics*, 3(2), 105-116.
- [4] Komatsu, T. (2008). Improvement of the Delany-Bazley and Miki models for fibrous sound-absorbing materials. *Acoustical science and technology*, 29(2), 121-129
- [5] Arslan, E., ve Çalışkan, M. (2017). Gözenekli malzemelerin ses yutma katsayılarının ampirik ve sayısal yöntemlerle tahmini, *12.Ulusal Akustik Kongresi, Bildiriler kitabı*.
- [6] Pelegrinis, M. T., Horoshenkov, K. V, ve Burnett, A. (2016). An application of Kozeny–Carman flow resistivity model to predict the acoustical properties of polyester fibre. *Applied Acoustics*, 101, 1-4.
- [7] Schiavi, A., Miglietta, P., ve Guglielmone, C. L. D. (2009). Considerations on the airflow resistivity measurement of porous and fibrous materials as function of temperature. İçinde EURONOISE 2009 Edinburgh, Scotland October 26-28 (ss. 1-10). Institute of Acoustics.
- [8] Russell, D. A. (1999). Absorption coefficients and impedance. *Science and Mathematics Department. GMI Engineering & Management Institute Flint, MI, 48504*.
- [9] Arjunan, A., Wang, C.J., Yahiaoui, K., Mynors, D.J., Morgan, T., Nguyen, V.B., ve English, M. (2014). Sound frequency dependent mesh modelling to simulate the acoustic insulation of stud based double-leaf walls. *Proceedings of the 2014 Leuven Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA2014)*.
- [10] ASTM E1050. (2019). Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System.