

OTOMOTİVDE KULLANILAN ELYAFLI MALZEMELERİN AKUSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Tunahan DOĞRU^{*,**,***} 
Erhan PULAT^{****} 

Alınma: 13.03.2020; düzeltme: 05.06.2020; kabul: 12.06.2020

Öz: Akustik konfor faktörleri günümüz müşterilerinin otomobil tercihlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Ana otomotiv üreticileri yüksek yalıtım kabiliyeti olan ancak düşük maliyetli ürünleri tercih etmektedirler. Bu nedenle, izolatör tasarımcıları ve üreticileri sürekli olarak kendilerini geliştirmelidir. Elektrikli araçların yaygın kullanımı sonucunda, akustik konfor beklentileri artmıştır. Bu çalışmanın amacı, taşıtlarda kullanılan yalıtım malzemelerinin ses iletim kaybı ve ses emme katsayısını elde ederek yorumlamaktır. Yalıtım malzemeleri farklı içerik, ağırlık ve kalınlıklarda seçilmiştir. Ağırlık, ses iletim kaybı, ses emme katsayısı arasındaki ilişki incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ses emme katsayısı, Ses iletim kaybı, Empedans tüpü, Elyaf malzemeler

Investigation of Acoustic Properties of Fibrous Materials Used in Automotive

Abstract: Acoustic comfort factors play an important role in automobile preferences of today's customer. The main automotive manufacturers also have a basic desire. They prefer products with strong insulation ability but low cost. For this reason, insulator designers and manufacturers must be in continuous development. As a result of the widespread use of electric vehicles, expectations for acoustic comfort have been increased. Purpose of this study, to obtain sound transmission loss and sound absorption coefficient of insulation materials used in vehicles. These insulating materials will be selected in different contents, weights and thicknesses. Relation between weight, sound transmission loss, sound absorption coefficient will be investigated. In this way, this study will be a main information source for acoustic studies in the automotive sector.

Keywords: Sound absorption coefficient, Sound transmission loss, Impedance tube, Fiber materials

* Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Görükle, 16059 Bursa.

** Erkurt Holding A.Ş. Ar-Ge, Minareli Çavuş Cad. 2-1, 16140 Nilüfer-Bursa.

*** Şimdiki Adres: TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. İstanbul Cad. No: 574, 16110, Bursa.

**** Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Görükle Kampüsü, 16059 Bursa, İletişim Yazarı: Erhan Pulat (pulat@uludag.edu.tr).

1. GİRİŞ

Günümüz araç kullanıcılarının konfor beklentileri her geçen gün artmaktadır. Araç kabinlerindeki yolcuların, motor ve çevresel gürültünün azaltılması, kabin içerisindeki sıcaklığın korunması, otonom sürüş sistemleri ve dokunmatik ekran gibi bazı beklentileri bulunmaktadır. Otomobil ortamından ve araç motorundan gelen gürültünün azaltılması günümüz kullanıcıları için sürekli iyileştirilmesi gereken bir beklentidir (Aydın ve Batmaz, 2012). Bu nedenle, ana otomotiv üreticileri rekabetçi yalıtım malzemeleri sunan tedarikçilerle çalışmayı tercih etmektedir. Araçlarda birçok farklı türde yalıtım malzemesi bulunmaktadır. Ancak temel gereklilikler aynıdır. Özellikle elektrikli otomobillerin yaygın kullanımı ile konfor özelliklerinin iyileştirilmesi beklentisi artmıştır. Çünkü kaçınılması gereken motor gürültüsü yavaşça yerini yol gürültüsüne bırakmaktadır.

Dokusuz yüzeyli iğneleme yöntemiyle üretilen kumaş ürünler ve mineral katkılı ürünler gibi elyafly malzemelerin gürültü kontrol performansını anlama konusunda literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Lee ve diğ. (2017) epoksi reçine ile birleştirilmiş keten ve cam yünü kompozitlerinin ses emme performansını araştırmış ve keten kompozitlerinin gürültü azaltma katsayısının daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Veerakumar ve Selvakumar (2012) polipropilen, kapok lif oranlarını araştırmıştır ve 30:70 karışım oranında sıkıştırılmamış kapok/polipropilen numunesinin diğere numuneler arasında en iyi sonuca sahip olduğunu bulmuşlardır. Shu ve diğ. (2011) empedans tüpü yöntemiyle dört farklı lif türünün ses emme özelliklerini araştırmışlardır ve daha düşük lif yoğunluğuna sahip bir kumaşın daha iyi ses emme performansı sağladığını bildirmişlerdir. Wang ve Torng (2011) deneysel olarak farklı yoğunlukta taş ve cam yününün ses emme özelliklerini elde etmiş, numune kalınlığının artırılmasının ses emme kapasitesini geliştireceği sonucuna varmışlardır. Na ve diğ. (2007) yankılanma odasıyla birlikte beş mikrofiber ve bir normal fiberin ses emme katsayılarını araştırmışlardır. Mikrofiberlerin ses emiliminin yankılanma odası yöntemiyle aynı kalınlık veya ağırlıktaki geleneksel kumaşlardan daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Selver (2019) doğal elyaf ve hibrit kompozitlerin, cam elyafı kompozitlerinden daha yüksek iletim kayıplarına sahip olduğunu ve dış bölgede doğal elyaf kullanıldığında daha az gürültü iletildiğini bulmuşlardır. Yang (2012) doğal liflerin (jüt, keten ve rami) ve bileşiklerinin ses emme ve gürültü azaltma katsayılarının karbon ve cam elyaf bileşiklerinden daha yüksek olduğunu ölçmüştür. Lim ve diğ. (2018) çeşitli kalınlık ve kütle yoğunlukları olan kenaf elyaflarının ses emme davranışını araştırmış ve artan kalınlık ve yoğunluklarla ses emme katsayısında artış gözlemlemişlerdir. Meriç ve diğ. (2016) düzlem dalganın emme davranışını tahmin etmek için transfer matrisi yöntemine dayanan çok katmanlı gözenekli bir malzemenin analitik bir modelini geliştirmiş ve analitik ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum sağlamışlardır.

Bu çalışmada, farklı yalıtım malzemeleri türleri karşılaştırılmıştır. Malzemeler, dokusuz kumaş ürünler ve mineral katkılı malzemeler dâhil olmak üzere farklı sınıflardan seçilmiştir. Üretim teknolojisinin izin verdiği ölçüde, malzemeler türlerine, içeriklerine, alan ağırlıklarına ve kalınlıklarına göre karşılaştırılmıştır. Bu malzemelerin ses iletim kaybı ve ses emme katsayısı empedans tüpü testleri ile elde edilmiştir. Otomotiv iç kaplama malzemeleri için bu alternatifler arasındaki test sonuçları, malzeme seçiminde yardımcı olacaktır. Tüm sonuçlar karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir, bu nedenle uygun bir tasarım için rehber olması amaçlanmaktadır.

2. DENEYSEL METOT

2.1. Akustik Ölçümler

Malzemeler empedans tüpü ile test edilmiştir. Seçilen ölçüm yöntemi, numune üretimi kolaylığı, küçük numune boyutları ve kısa test süreleri açısından fayda sağlamaktadır. Bu çalışmada kullanılan cihaz literatürde Kundt tüpü olarak da adlandırılmaktadır. Kundt tüpü, Alman fizikçi August Kundt tarafından bir gaz veya katı çubuktaki ses hızını ölçmek için icat

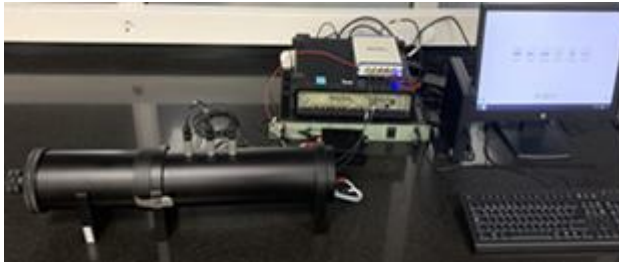
edilen deneysel bir akustik cihazdır (Kundt, 1866). Deneysel çalışmalarda Erkurt Ar-Ge laboratuvarındaki empedans tüpü kullanılmış ve özellikleri Tablo 1’de verilmiş olup Şekil 1’de gösterilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan tüpün frekans aralığı kurulumun boyutlarına göre belirlenmektedir. Alt frekans sınırı mikrofonun aralığına bağlıdır. Bu sınırdan daha düşük frekanslar için mikrofon aralığı dalga boyunun sadece küçük bir kısmını elde etmektedir. Bu sınırın altındaki frekanslarda yapılan ölçümler, iki mikrofon arasında kabul edilmemekte ve faz hataları oluşmaktadır. Bu deneylerde düşük frekans limiti 100 Hz olarak belirlenmiştir. Üst frekans sınırı tüpün çapına bağlıdır. Yapılan ölçümler 100- 6400 Hz aralığındadır ve Şekil 1b’de gösterilen tüplerden 29 mm çaplı olanı ile yüksek frekanslar 100 mm çaplı olanı ile düşük frekanslar hesaplanmaktadır. Daha sonra bu frekanslar enterpolasyon ile süreksiz olarak birleştirilmektedir. Burada üst frekans aşağıdaki 1 numaralı eşitliğe göre belirlenmektedir ve c ses hızı (m/s), d tüp çapı (m) ve K ($= 0,586$ SI sistemi) ise sabit bir değerdir (Crocker ve Sommerfeldt, 2008).

$$f_u = \frac{Kc}{d} \quad (1)$$

Tablo 1. Cihaz listesi

Cihaz Adı	Marka	Model	Ölçüm Aralığı
Empedans Tüpü	Brüel&Kjær	4206 tipi	100-6400 Hz
Empedans Tüpü	Brüel&Kjær	4206-A tipi	100-6400 Hz
Mikrofon	GRAS	46BL-S1 ¼” CCP	10-10000 kHz / ± 2 dB
Kalibratör	Brüel&Kjær	4231 tipi	1 kHz / 94.0 dB ± 0.2 dB
Veri toplama	NI Instruments	USB-4431	0.8 Hz AC/DC 24 bit
Amfi	SMSL	S 36-A PRO	20 Hz-20 kHz / 8 Ω
Yazılım	Bias	TestSENS	-



a.



b.

Şekil 1:

Empedans tüpü şekilleri

a. Bütün cihazlar b. Empedans tüpleri

2.1.1. Ses Emme Katsayısı Ölçümü

Malzemelerin ses emme katsayısını belirlemek için ölçümler, endüstriyel bir standart olarak genelde kullanılan ISO 10534-2 (1998) test yöntemine göre gerçekleştirilmiştir. Yalıtım malzemelerinin, ses emme katsayısını belirlemek için bir empedans tüpü, iki mikrofon konumu ve bir dijital frekans analiz sistemi kullanılmaktadır. Bu yöntem ses emici malzemelerin akustik yüzey empedansını belirlemek için de uygulanmaktadır. Çünkü ses emici bir malzemenin empedans oranları, malzemenin hava akışı direnci, gözeneklilik, elastikiyet ve yoğunluk gibi

fiziksel özellikleriyle ilişkilidir. Bu test yönteminde açıklanan ölçümler temel araştırma ve ürün geliştirmede yararlıdır. Ölçüm ise basitçe 2 numaralı eşitlikte açıklanmıştır.

$$\text{Ses emme katsayısı } (\alpha) = \frac{\text{emilmiş akustik enerji}}{\text{gelen akustik enerji}} \quad (2)$$

Ses emme katsayısı hesabında geçen ses hızı,3numaralı eşitlik yardımıyla hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte T sıcaklık (K), c_0 ses hızıdır (m/s). Ses hızı hesaplandıktan sonra dalga boyu da aşağıda gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$c_0 = 343,24 \sqrt{\frac{T}{293}} \text{ ve } \lambda_0 = \frac{c_0}{f} \quad (3)$$

Kalibrasyon faktörünün belirlenmesi işlemi için bütün birbirini takip eden başarılı ölçümlere göre geçerli düzeltmelerden elde edilen sonuçlar model halinde işleme dahil edilmelidir. Aynı matematiksel işlemler kullanılarak, tüpteki numune üzerindeki güçlü akustik yansımaları engelleyebilmek için H_{12}^I ve H_{12}^{II} ölçülmektedir. Kalibrasyon faktörü H_C , transfer fonksiyonu H_{12}^{II} kullanılarak 5 nolu eşitlikteki gibi hesaplanmaktadır (Aydın ve Batmaz, 2012; ISO 10534-2, 1998).

$$H_C = (H_{12}^I \cdot H_{12}^{II})^{\frac{1}{2}} = H_C(e)^{j\theta_c} \quad (4)$$

Sistemdeki mikrofonların, ilk konum transfer fonksiyonu H_{12} ve yer değişimi sonrası transfer fonksiyonu H_{12}^{II} olarak belirtilmektedir. Kalibrasyon faktörü ve mikrofonların yer değiştirmesi ile tespit edilen transfer fonksiyonları hesaplanmalıdır. Burada yapılan ölçümlerde mikrofonlar 100 mm çaplı ve 29 mm çaplı tüpler üzerinde aynı sıra ile konumlandırılacak şekilde yer değiştirilmiştir. Bu sayede 100-6400 Hz aralığının tamamı ölçülmüştür. Daha sonra ölçümlere devam edilerek karmaşık transfer fonksiyonları çözümlenmelidir (ISO 10534-2,1998).

$$\hat{H}_{12} = |\hat{H}_{12}|(e)^{j\theta} = \hat{H}_r + j\hat{H}_i \quad (5)$$

Burada, \hat{H}_{12} , doğrulanmamış transfer fonksiyonu, θ , doğrulanmamış faz açısı, \hat{H}_r , \hat{H}_{12} 'nin gerçek kısmı, \hat{H}_i , sanal kısmıdır. Mikrofonlardaki uygunsuzlukları gidermek için 6 numaralı eşitlik kullanılmaktadır.

$$H_{12} = |H_{12}|(e)^{j\theta} = \frac{\hat{H}_{12}}{H_C} \quad (6)$$

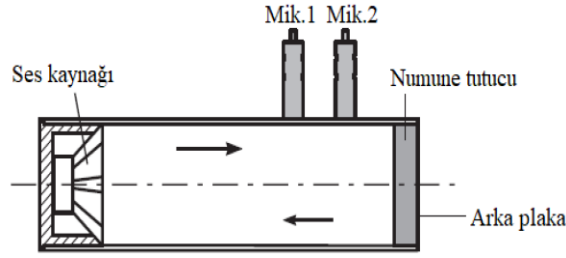
Gelen dalganın yansıma faktörü 7 numaralı eşitlik yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$r = |r|(e)^{j\theta_r} = r_r + jr_i = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}}(e)^{2jk_0x_1} \quad (7)$$

Burada, r_r , gerçek bileşen, r_i , sanal bileşen, x_1 , test numunesi ile uzak mikrofon arasındaki mesafe, θ_r , yansıma faktörünün faz açısı, H_I , gelen ses dalgasının transfer fonksiyonu, H_R , yansıyan ses dalgasının transfer fonksiyonudur. Ses emme katsayısının empedans tüpü ile belirlenmesinde 8 numaralı eşitlikten yararlanılmaktadır (ISO 10534-2,1998).

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2 \quad (8)$$

Ölçüm yöntemi Şekil 2'de şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2:

Ses emme katsayısı ölçümünün şematik gösterimi (Brüel&Kjær, 2019)

Testin yapılışında, test numunesi düz, sert, pürüzsüz ve hava geçirmez empedans tüpünün bir ucuna monte edilmektedir. Düzlem dalgalar tüpe monte edilmiş bir gürültü kaynağı tarafından üretilmektedir. Tüpün duvarına monte edilen iki mikrofondan elde edilen sinyallerin karmaşık akustik transfer işlevi, test malzemesinin emme katsayısını ve empedans oranını hesaplamak için kullanılmaktadır (Brüel&Kjær, 2019). Karmaşık akustik transfer fonksiyonunun hesaplanması, cihazın yazılımı tarafından sağlanmaktadır. Kullanılabilir frekans aralığı, borunun genişliğine ve mikrofondan konumları arasındaki boşluğa bağlıdır. Şekil 3'te gösterilen kurulum 24 saniyelik bir ölçüm süresine, rastgele ses dalgalarına ve 6 dB'lik bir amplifikatör ses seviyesine ayarlanmıştır.

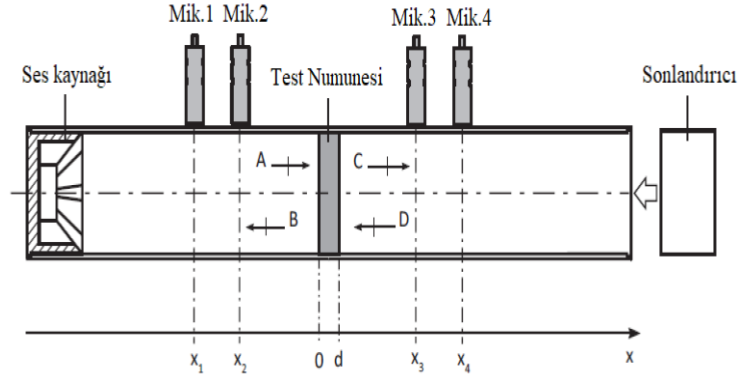
2.1.2. Ses İletim Kaybı Ölçümü

Bir ortam içinde dolaşan bir akustik dalga ikinci bir ortamın sınırıyla karşılaştığında, yansıyan ve iletilen dalgalar üretilmektedir. Ses dalgası yayılımı doğrudan ortamın özelliklerinden etkilenmektedir. Bu nedenle, bir ses dalgası farklı bir enine kesite, malzeme özelliğine veya sıcaklığa sahip bir ortama geçtiğinde, ses enerjisinin bir kısmı kaynağa geri döner, böylece devam eden dalga enerjisi kaybolmaktadır (Kinsler ve diğ., 1982).

Ses iletim kaybı TL, 9 numaralı eşitlikte belirtilmiştir ve birimi dB'dir. Burada W_s başlangıç ses gücüdür ve W_t ise iletilen ses gücüdür. Akustik dalga gücü ve bu eşitlik ses basıncından elde edilebilir, çünkü ses basıncı ve parçacık hızı, düzlem dalgalarının baskın olduğu düşük frekans bölgesinde aynı fazdadır.

$$TL = 10 \log_{10} \left(\frac{W_t}{W_s} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{p_t}{p_s} \right) \quad (9)$$

Yansıtılan ve iletilen dalgaların basınç genliği, malzemelerin yoğunluğuna, karakteristik empedanslara, iki ortamdaki sesin hızına ve gelen dalga arayüzle yaptığı açıya bağlıdır. Ölçümler, genellikle malzemelerin ses iletim kaybını belirlemek için kullanılan ASTM E2611 (2019) test yöntemine göre gerçekleştirilmiştir. Ölçüm yöntemi Şekil 3'te şematik olarak görülmektedir.



Şekil 3:
Ses iletim kaybı ölçümünün şematik gösterimi (Brüel&Kjær, 2019)

Empedans tüpünün bir ucuna bir ses kaynağı (hoparlör) monte edilmekte ve tutucuya bir malzeme örneği yerleştirilmektedir. Hoparlör, düzlem dalgalar olarak yayılan rastgele ses dalgaları üretmektedir. Düzlem dalgaların yayılması sırasında, dalgaların bir kısmı örnekte tutulmaktadır. Bu dalgalar, ses kaynağı ile tüpe yansıyan, malzeme tarafından emilen ve malzemeden alıcı tüpe geçen kısımlar olarak ayrışmaktadır. Malzemeden geçen düzlem dalgaların bazıları, alıcı tüpün ucuna geçmektedir. Burada dalgaların bir kısmı yansıtılmakta ve bazıları tüpten çıkmaktadır. Bu nedenle ölçüm iki farklı sonlandırıcı yöntemle gerçekleştirilmektedir. Ölçüm için önce yankısız sonlandırma yöntemi ve sonra yansıtıcı sonlandırma yöntemi kullanılmaktadır.

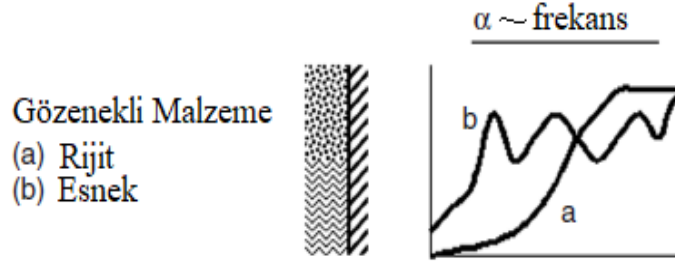
2.2. Elyaf Malzemeler

Algılanan konfor seviyesini doğrudan etkileyen, motor gürültüsü, yoldan gelen gürültü, şanzıman gürültüsü, dış ortam gürültüsü, vb. gibi önlenmesi gereken birçok etki bulunmaktadır. Çeşitli bölgelerin neden olduğu problemler için farklı malzemelerle farklı NVH (Noise Vibration Harshness) çözümleri geliştirilmiştir. Bu çözümlerde kullanılan bazı malzemeler, bu çalışmada kullanılmıştır ve Tablo 2’de görölmektedir.

Gözenekli malzemeler, yüzey şekilleri ve geometrisinde bulunan açıklıkları ile karakterize edilmektedir. Bunlar, malzeme liflerindeki aralıkların veya köpöklü ürünlerin oluşturduğu bir dizi tünel benzeri gözenek ve açıklıktan oluşmaktadır. Genellikle, sınırlamalar dâhilinde, bu açıklıklar ne kadar açık ve sıkı bağlanırsa, malzemenin ses emici verimliliğinin değerleri o kadar büyük olmaktadır. Öte yandan, gözenekler ve sızıntılar küçükse ve birbirine bağlanmazlarsa, malzeme daha az verimli hale gelmektedir. Bu gözenekli emiciler kategorisine, lifli kumaşlar, keçeler, cam ve taş yünleri, akustik sıva, poliüretan ürünler, çeşitli püskürtme ürünleri ve belirli akustik fayans türleri dâhildir.

Gözenekli bir malzeme gelen ses dalgalarına maruz kaldığında, malzemenin yüzeyindeki ve malzemenin gözenekleri içindeki hava molekülleri titreşmeye zorlanmakta ve işlem sırasında ses enerjisi, termal ve viskoz kayıpları nedeniyle ısı enerjisine dönüşmektedir. Düşük frekanslarda bu değerlikler izotermal iken, yüksek frekanslarda adyabatiktir. Lifli malzemelerde, enerjinin çoğu, liflerden saçılmayla ve tek tek liflerden kaynaklanan titreşim tarafından da emilebilmektedir. Malzemenin lifleri, ses dalgalarının etkisi altında birbirine sürtünmekte ve sürtünme kuvvetleri tarafından enerji dönüşümü sağlanmaktadır (Crocker ve Sommerfeldt, 2008).

Gözenekli malzemelerden en önemli beklenti sesin sönümlenmesidir. Ses iletim kaybı beklentisi daha ağır malzemelerin katman olarak kullanılması sonucunda elde edilmektedir. Gözenekli malzemelerin ses emme eğrisi davranışları Şekil 4’te gösterilmektedir. Çalışmada kullanılan elyafly olarak tabir edilebilecek malzemeler, gözenekli malzemeler sınıfına girdikleri için eğri davranışları Şekil 4’te a ile gösterilen eğriye benzer olmalıdır.

**Şekil 4:**

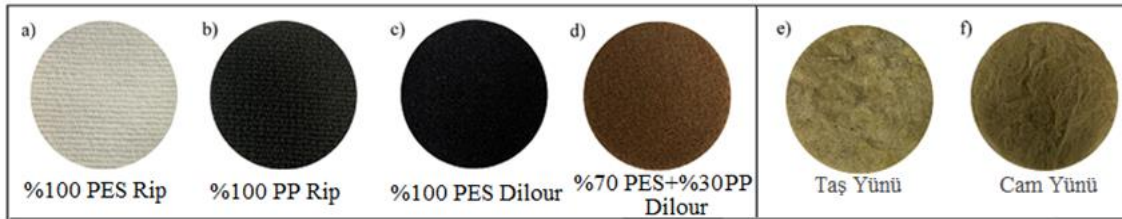
Gözenekli malzemelerin ses emme eğrisi davranışları (Crocker ve Sommerfeldt,2008)

Dokusuz kumaşlar için Rib ve Dilour terimleri ürünün yüzey modelini ifade etmektedir. Tablo 2'de de görülebileceği gibi, seçilen malzemelerin bazıları tam olarak aynı alan ağırlıkları ile seçilmemiştir. Örneğin, seçilen cam yünü ve taş yünü malzemelerinin kalınlıkları eşit tutulurken, yoğunlukları aynı değildir. Malzemelerin sıkıştırılması, sonuçları diğer parametrelerden daha fazla etkileyebileceğinden, mümkün olduğunca yakın değerlerle üretilen malzemeler seçilmiştir. Farklı alan ağırlıkları olan bu malzemeler için akustik parametreler elde edilmiştir. Daha sonra bu parametreler aynı sınıfta değerlendirilebilecek malzemeler ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan numuneler

Malzeme Türü	Numuneler	Şekil5	Ağırlıklı Alan	Kalınlık
Dokusuz Ürünler	% 100 PES-Rib	a	500 g/m^2	3 mm
	% 100 PP-Rib	b	500 g/m^2	3 mm
	% 100 PES-Dilour	c	900 g/m^2	5 mm
	% 70 PES + % 30 PP-Dilour	d	900 g/m^2	5 mm
Mineral Katkılı Malzemeler	Cam Yünü	e	2400 g/m^2	22 mm
	Taş Yünü	f	2200 g/m^2	22 mm

Numunelerin çapı, uygulanan akustik testin tüp standartlarına göre 29 mm ve 100 mm olarak düzenlenmiştir. Çalışmada kullanılacak olan numuneler, farklı içerik, kalınlık ve ağırlıklı alana göre hazırlanmıştır ve numunelere ait görsel Şekil 5'te yer almaktadır.

**Şekil 5:**

Çalışmada kullanılan numuneler

3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

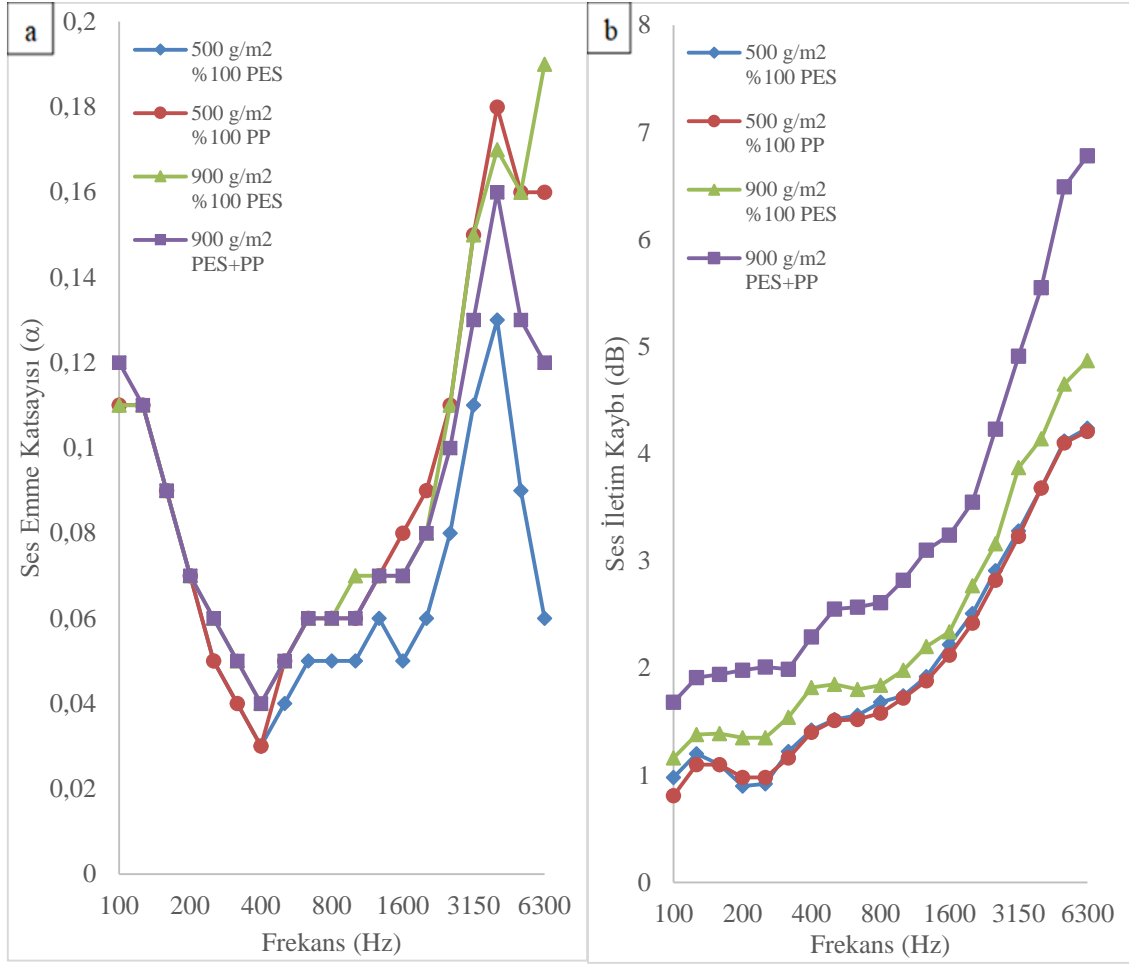
Bu malzemeler için 1/3 oktav bandında ses emme katsayısı ve ses iletim kaybı sonuçları verilmiştir.

3.1. Dokusuzİğnelemeli Ürünlerin Ölçüm Sonuçları

Dokusuz ürünler, iğneleme yöntemiyle ve PP (Polypropylen) ve PES (Polyester) elyaflarının katılmasıyla üretilmiştir. Bu malzemeler genellikle başka bir gözenekli malzemenin üzerine eklenerek görünüm özelliğini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Bu malzemelerle oluşturulan yüzeyler, son kullanıcının gözüyle gördüğü yüzeylerdir. Bu nedenle, bu malzemenin kalınlığı ve akustik değerleri çalışmadaki diğer malzemelerden daha düşüktür. PP ve PES elyafı kullanılması halinde akustik değerlerdeki farklılıklar görülmeye çalışılmıştır (Şekil 6). Frekans bandının ortalaması alındığında, aynı ağırlık ve kalınlıkta, %100 PP kullanıldığı durumda ses emme katsayısının arttığı ve ses iletim kaybında önemli bir değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir.

Ses emme katsayısı grafiği incelendiğinde, eğride, 400 Hz'e kadar bir azalma ve daha sonra 4000 Hz'e kadar bir artış olduğu görülmektedir. Ayrıca, dokusuz yüzeyler 4000-6300 Hz'lik yüksek frekans aralığında bir azalma göstermektedir. Bunun nedeni, birçok testten sonra düşük malzeme kalınlığı ile ilişkili bulunmuştur. Düşük kalınlıklı malzemeler ile empedans tüpünde çalışıldığında ölçüm bandının yüksek frekanslarında, eğride bir azalma görülmektedir. Bu azalış malzemenin bir doğal modundan kaynaklanıyor olabilir. Fakat yine de çınlama odası gibi ölçüm yöntemleri ile daha yüksek frekans seviyeleri için de ölçüm alınarak bu kısım doğrulanmalıdır. Empedans tüpü ile yapılan ölçümler 6300 Hz ile sınırlıdır. Malzemenin doğal modları arttıkça istenen ölçüm bu metot ile elde edilememektedir.

Ses iletim kaybı incelendiğinde, malzemenin kalınlığındaki artışın ve ağırlıktaki artışın olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Ses iletim kaybı, sınır koşulları ve alan ağırlıklarıyla daha fazla ilgilidir. Özetle, Şekil 6, akustik özelliklerin ağırlık artışı ile iyileştğini göstermektedir. Ayrıca, PP kullanımı da akustik özellikleri iyileştirmektedir.

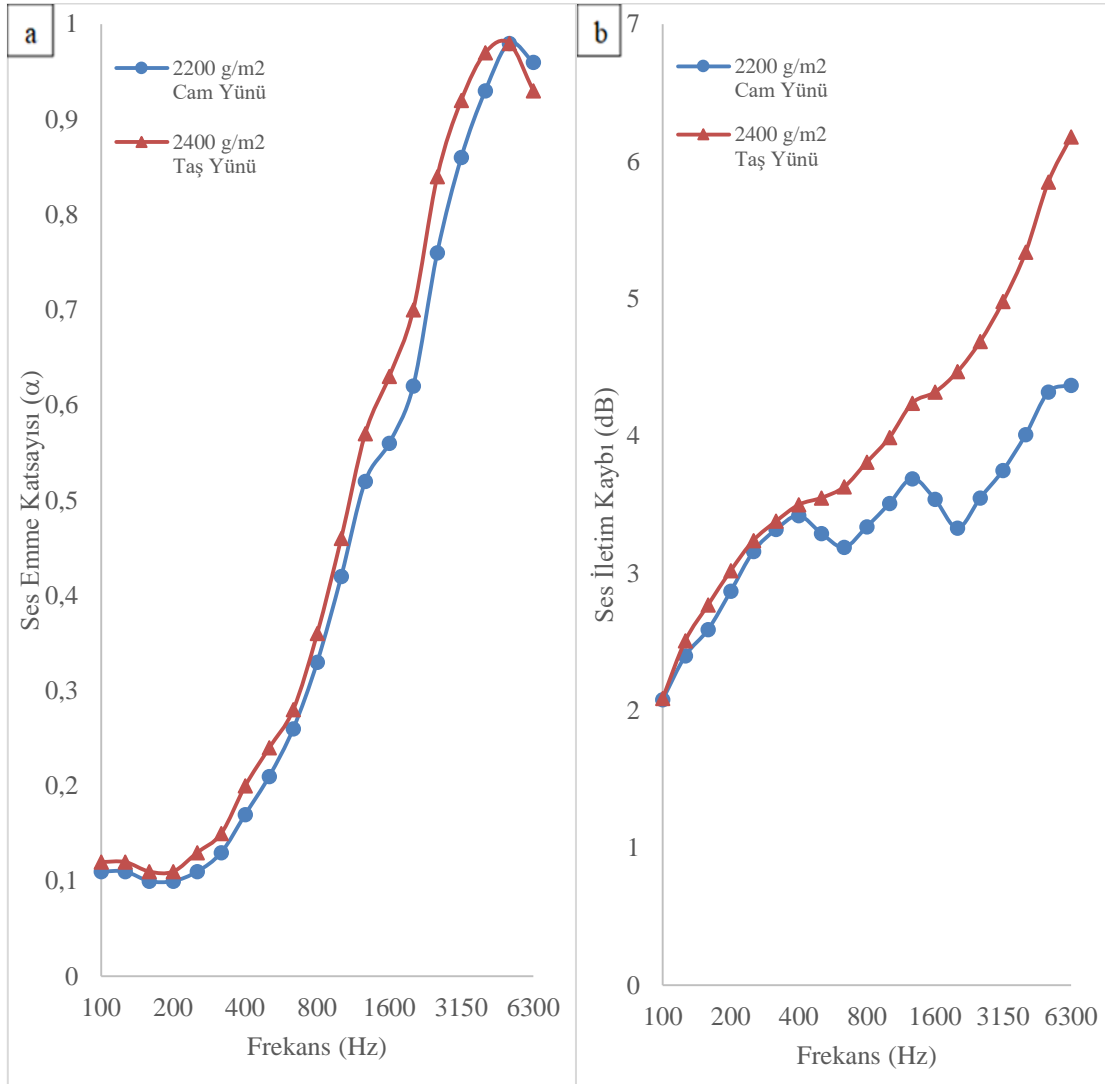


Şekil 6:
Dokusuz malzemelerin empedans tüpü ölçüm sonuçları
a. Ses emme katsayısı b. Ses iletim kaybı

3.2. Mineral Malzemelerin Ölçüm Sonuçları

Cam yünü, üretilen camın liflere dönüştürüldüğü 1450°C'de eritilmiş doğal ve geri dönüştürülmüş cam karışımından yapılmaktadır. Taş yünü, geri dönüştürülmemiş ancak bol miktarda volkanik kayalardan yapılmaktadır. Cam yünü gibi üretilen taş yününde bazalt yaklaşık 1500 °C sıcaklığa kadar eritilerek üretim gerçekleştirilmektedir. Farklı alan ağırlıkları ve aynı kalınlıktaki mineral katkı malzemelerin ses iletim kaybı ve ses emme katsayısı değerleri Şekil 7'de verilmiştir.

Şekil 7a incelendiğinde frekans bandının ortalaması alınırca, aynı ağırlıkta taş yünüün cam yününden 0,03 fazla bir ses emme katsayısına sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca eğrinin 400 Hz'e kadar neredeyse sabit bir değerde olduğu ve daha sonra 4000 Hz'e kadar bir artış olduğu görülmektedir, bu sonuç dokusuz yüzeylerde de aynı şekilde elde edilmiştir. Ses iletim kaybı eğrileri karşılaştırıldığında, cam yünüün daha düşük bir seviyede olduğu görülmektedir. Ancak bu malzemeler düşük ses iletim kaybı özelliklerine sahiptir ve bu nedenle bariyer etkisi olarak tercih edilmemektedir. Bu mineral katkı malzemeler, akustik açıdan düşünülen kütle yay sistemlerinde yay görevini üstlenerek mükemmel gürültü azaltma sağlamaktadırlar. Yünüün lifli yapısı nedeniyle, bu malzemeler yüksek frekanslı gürültüyü yansıtarak ses dalgalarını devre dışı bırakmaktadır.



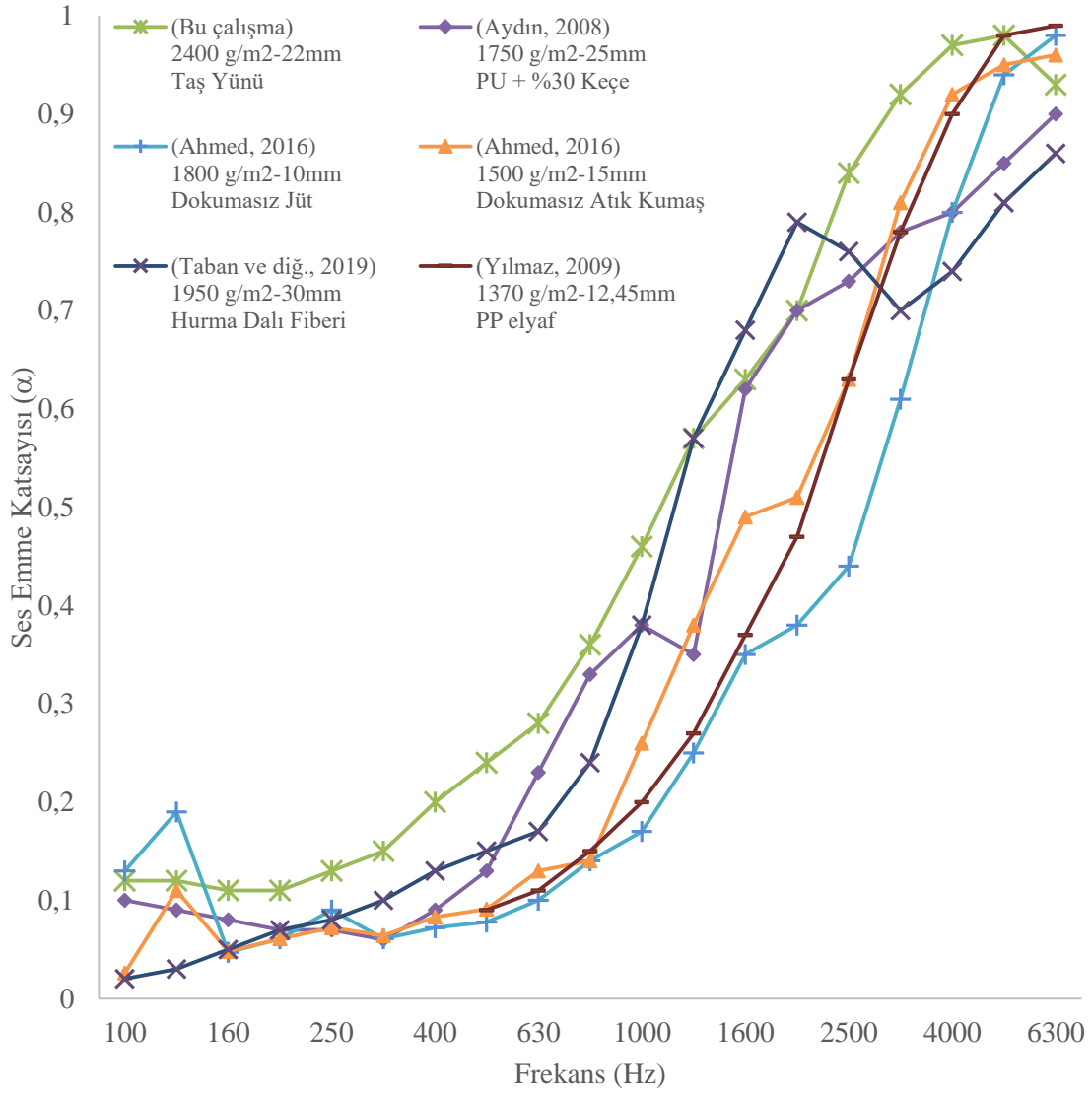
Şekil 7:
Mineral malzemelerin empedans tüpü ölçüm sonuçları
a. Ses emme katsayısı b. Ses iletim kaybı

Piyasadaki yaygın bir hata, camın yanması ve taşın yanmamasıdır. Bu doğru değildir ve her iki ürün de A1 yanmazdır. Bu malzemelerin yanmazlık özellikleri en önemli seçim sebepleridir. Ayrıca, bu malzemeler suya dayanıklıdır. Otomotiv sektöründe özellikle suya giren ve çıkan arazi araçları için tercih edilmektedir. Her iki malzeme de aynı yoğunlukta benzer basınç dayanımlarına sahiptir ve taş kg bazında daha ucuzdur. Bu nedenle, taş mineral katkıly yün en rekabetçi çözümdür.

3.3. Literatür ile Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

Literatürde paylaşılmış gözenekli, lifli olarak sınıflandırılabilen malzemeler ile bu çalışmada yapılan ölçüm sonuçları Şekil 8'de karşılaştırılmıştır.

Şekil 8'de yapılan çalışmaların literatürdeki verilerle karşılaştırılması göstermektedir ki Şekil 4'te yer alan gözenekli malzeme davranışları ile ilgili kısımla uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 8:

Bu çalışmada elde edilen ses emme katsayısı değerlerinin literatürde yer alan ses emme katsayısı değerleriyle karşılaştırılması

Bu çalışmada yer alan numunelerle birebir aynı özelliklerdeki numunelere ait ses emme katsayısı verilerini literatürde bulmak zordur. Üretim teknolojisi, lif uzunluğu, numune kalınlığı, lif tipi gibi birçok parametre bulunmaktadır. Zaten çalışmanın amaçlarından birisi yapılan bu ölçüm sonuçlarının literatürde yer almasıdır. Şekil 8'e göre lif tipi veya kalınlığı farklı olan numunelerin ses emme eğrisi davranışları bu çalışmada yer alan lifli gözenekli malzemelerin ses emme eğrisi davranışları ile uyumludur.

4. DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, lifli yapıdaki gözenekli malzemelerin, ağırlık ve kalınlık değişiminin, ses emme katsayısı ve ses iletim kaybı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın bulguları, gözenekli ve lifli yünlerin, düşük maliyet ve hafiflikleri ile ses emici yapılar için etkili malzemeler olduğunu göstermektedir.

%100 PP elyaf veya PP elyaf katkılı dokusuz rn,%100 PES elyaf veya PES elyaf katkılı dokusuz ürünlerden daha iyi ses emme katsayısına ve ses iletim kaybına sahiptir. 2400 g/m² taş yn, aynı kalınlıkta 2200 g/m²cam yönden daha yüksek ses emme katsayısına ve ses iletim kaybına sahiptir, ancak yine de büyük bir farklılık yoktur.

Ses emilimi için keçe, poliüretan, yn tipi gözenekli malzemeler tercih edilmelidir. Bu türler arasındaki seçim, malzemenin kullanılacağı ortamla ilgilidir. Mineral katkılı yn malzemeler suya dayanıklıdır. Keçe malzemesi ise suda kaldığında zlmekte ve koku yapmaktadır. Keçe ve yn tipi malzemeler yanıcı değildir. Yn malzemeler insan derisi için kaşıntılıdır. Ayrıca, keçe malzemesinin üretim işlemi diğerlerinden daha karmaşıktır. evre ile ilgili birçok seçim faktörü bulunabilir. Ancak bu seçimdeki en önemli faktör fiyattır. Ynl malzemeler bu tür malzemeler arasında en ucuz olanıdır. Çünkü bu ürünün hammaddesi sadece taş veya camdır. Ses iletim kaybı malzemenin fiziksel bir özelliği değildir. Malzemenin ağırlığını artırarak ses iletim kaybındaki artış, daha ağır yapının titreşim sönümlleme özellikleri ile de ilişkilendirilebilir. Bu sebeple ses iletim kaybı beklentisi olduğunda, ağırlık artışı oluşturulmalıdır. Genel olarak seçim, malzemenin otomobilde kullanılacağı bölgeye ve bu bölgedeki ses kaynağının frekansına göre yapılmalıdır. Bu çalışmada ise, kalınlık ve ağırlık değişiminin sonucu nasıl etkileyeceği gösterilerek, bu seçime faydalı olması beklenmektedir.

TEŐEKKÜR

Tecrübelerinden faydalandığımız Erkurt Holding'den İbrahim Aydın'a ve desteklerini esirgemeyen Uğur Akbaba'ya teőekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. Aydın, İ., Batmaz, İ. (2012) Determination of The Sound Absorption Coefficients of Insulation Materials Used on Vehicles, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27(4), 687–693.
2. Lee P.H., Ng, B.M.P., Rammohan, A.V., Tran, L.Q.N. (2017) An Investigation of the Sound Absorption Properties of Flax/Epoxy Composites Compared with Glass/Epoxy Composites, *Journal of Natural Fibers*, 14(1), 71–77. doi: 10.1080/15440478.2016.1146643
3. Veerakumar, A., Selvakumar, N.A. (2012) A Preliminary Investigation on Kapok/Polypropylene Nonwoven Composite for Sound Absorption, *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, 37(4), 385-388.
4. Shu, Y., Weidong, Y., Pan N. (2011) Investigation of The Sound-Absorbing Behavior of Fiber Assemblies, *Textile Research Journal*, 81(7), 673–682. doi: 10.1177/0040517510385177
5. Wang, C.N., Torng, J.H. (2001) Experimental Study of The Absorption Characteristics of Some Porous Fibrous Materials, *Applied Acoustics*, 62(4), 447–459. doi:10.1016/S0003-682X(00)00043-8
6. Na, Y., Lancaster, J., Casali, J., Cho, G. (2007) Sound Absorption Coefficients of Micro-Fiber Fabrics by Reverberation Room Method, *Textile Research Journal*, 77(5), 330–335. doi: 10.1177/0040517507078743
7. Selver, E. (2019) Acoustic Properties of Hybrid Glass/Flax and Glass/Jute Composites Consisting of Different Stacking Sequences, *Tekstil ve Mhendis*, 26(113), 42–51. doi: 10.7216/1300759920192611305

8. Yang, W., Li, Y. (2012) Sound Absorption Performance of Natural Fibers and Their Composites, *Science China Technological Sciences*, 55(8), 2278–2283.doi: 10.1007/s11431-012-4943-1
9. Lim, Z.Y., Putra, A., Nor, M.J.M., Yaakob, M.Y. (2018) Sound Absorption Performance of Natural Kenaf Fibres, *Applied Acoustics*, 130, 107–114.doi: 10.1016/j.apacoust.2017.09.012
10. Meriç, C., Erol, H., Aytakin, Ö. (2016) On The Sound Absorption Performance of a Felt Sound Absorber, *Applied Acoustics*, 114, 275–280.doi: 10.1016/j.apacoust.2016.08.003
11. Kundt, A. (1866) Acoustic Experiments, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. 35(4), 41–48.
12. ISO Norm 10534-2, (1998). Acoustics, Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes: Part 2: Transfer-function Method, International Organization for Standardization, Switzerland.
13. Crocker, M., Sommerfeldt, S. (2008) Handbook of Noise and Vibration Control, *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1898 pp.
14. Brüel&Kjær (2019) Product Data: Impedance Tube Kit (50 Hz – 6.4 kHz) Type 4206, Impedance Tube Kit (100 Hz – 3.2 kHz) Type 4206-A, Transmission Loss Tube Kit (50 Hz – 6.4 kHz) Type 4206-T. Erişim Adresi: <https://www.bksv.com/media/doc/Bp1039.pdf> (Erişim Tarihi: 08.11.2019)
15. Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B., Sanders, J.V. (1982) *Fundamentals of Acoustics*, The Journal of the Acoustical Society of America, USA.
16. ASTM E2611, (2019) Standard Test Method for Normal Incidence Determination of Porous Material Acoustical Properties Based on the Transfer Matrix Method, ASTM International, West Conshohocken, PA.
17. Aydın, İ. (2008) Otomobillerde Kullanılan İzolasyon Malzemelerinin Emme Katsayılarının Ölçülmesi ve Uygun Malzeme Kalınlığının Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
18. Ahmed, N.F. (2016) Effect of Fibers Types on the Properties of Acoustic and Thermal Nonwoven Fabrics Used in Cars, *Journal of Basic and Applied Scientific Research* 6(10), 9-18.
19. Taban, E., Khavanin, A., Jafari, A.J., Faridan, M., Tabrizi, A.K. (2019) Experimental and mathematical survey of sound absorption performance of date palm fibers, *Heliyon*. 5(6), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01977>
20. Yılmaz, N.D. (2009) Acoustic Properties of Biodegradable Nonwovens, *PhD Thesis*, NC State University, USA.

