

FARKLI ÖZELLİKTE KAPLAMALI KUMAŞ İÇEREN SANDVIÇ KOMPOZİT YAPILARIN TERMAL VE AKUSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THERMAL AND ACOUSTIC PROPERTIES OF SANDWICH COMPOSITE STRUCTURES CONTAINING COATED FABRIC WITH DIFFERENT PROPERTIES

Sena ARSLAN ATMACA^{*1}  Öznur İSKENDER¹ 

¹ Formfleks Otomotiv Yan Sanayi ve Ticaret A.Ş., Bursa, Türkiye.

ABSTRACT

In motor vehicles such as buses, trucks, trailers, and passenger cars, composite materials are utilized to enhance driving comfort by providing thermal and acoustic insulation within the cabin. In this study, multi-layered structures were produced using a combination of coated felt and phenolic felt for the top and bottom layers, and single or double-layered configurations of coated fabrics, such as aluminum foil-coated fiberglass fabric, silicone-coated fiberglass fabric, and vermiculite-coated silica fabric, for the intermediate layers. The structures were fabricated in flat molds under conditions of 185°C temperature, 170 bar pressure, and 120 seconds duration. The sound absorption coefficients of these structures were measured using an alpha cabin test device, and their thermal conductivity coefficients were determined using a thermal conductivity measurement device. The acoustic performance tests revealed that the K3 composite, consisting of phenolic felt, vermiculite-coated silica fabric, and phenolic felt sandwiched between two coated felts, was most effective at absorbing noise from the engine compartment. Evaluation of the thermal conductivity coefficients ranked the thermal insulation performance of the sandwich panels as follows: K1> K2> K3> K6> K4> K5. Based on the obtained data, it was determined that the K3 sample provides an optimal balance of acoustic and thermal insulation performance, making it the most suitable sandwich composite structure for these applications.

Keywords: Acoustic Performance, Composite Material, Sandwich Structure, Thermal Insulation.

ÖZET

Otobüs, kamyon, tır veya binek araç gibi farklı motorlu taşıtların iç kabininde, termal ve akustik izolasyon sağlayarak, sürüş konforunu artırmaya yönelik olarak kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, alt ve üst katmanda kaplama telası ve fenolik keçe kombinasyonu, ara katmanlarda ise özellikle termal izolasyon özellikleri ile ön plana çıkan alüminyum folyo kaplı cam elyaf kumaş, silikon kaplı cam elyaf kumaş ve vermikülit kaplı silika kumaş gibi kaplamalı kumaşların tekli ve ikili kombinasyonları kullanılarak düz kalıpta 185°C sıcaklık, 170 bar basınç ve 120 saniye süre ile çok katmanlı yapılar oluşturulmuş ve bu yapıların alfa kabin test cihazında ses yutumu katsayıları, termal iletkenlik ölçüm cihazında ise termal iletkenlik katsayıları ölçülerek birbiri ile karşılaştırılmıştır. Akustik performans test sonuçları incelendiğinde, motor bölgesinde meydana gelen gürültülerin absorpsiyonunu sağlamak üzere, iki kaplama telası arası, fenolik keçe, vermikülit kaplı silika kumaş ve fenolik keçe içeren K3 kompozisyonu olduğu tespit edilmiştir. Termal iletkenlik katsayısı sonuçları değerlendirildiğinde ise elde edilen sandviç plakaların termal izolasyon performansı K1> K2> K3> K6> K4> K5 şeklinde sıralanmaktadır. Elde edilen veriler göz önüne alındığında hem akustik hem de termal izolasyon performansını bir arada sunabilecek sandviç kompozit yapı K3 numunesi ile sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akustik Performans, Kompozit Malzeme, Sandviç Yapı, Termal İzolasyon.

*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: sena.arslan@ff-rd.com

Submission Date Başvuru Tarihi	Revision Date Revizyon Tarihi	Accepted Date Kabul Tarihi	Published Date Yayın Tarihi
20.12.2024	04.02.2025	26.03.2025	01.06.2025

1. GİRİŞ

Günümüzde otomotiv endüstrisi, kullanıcı deneyimini iyileştirmek ve sürüş konforunu artırmak amacıyla sürekli gelişim göstermektedir. Otomobil kabinleri, yeni nesil araçlarda yalnızca bir ulaşım aracı olmaktan ziyade, konforlu bir yaşam alanı olarak tasarlanmaktadır. Konfor beklentisi ses ve termal izolasyon ihtiyacını da beraberinde getirmektedir. Kabin içi termal denge ve akustik konfor, kullanıcıların sürüş deneyimi doğrudan etkilemektedir. Sıcak veya soğuk hava koşullarında termal izolasyonun yetersiz olması, yolcu konforunu ve sürüş güvenliğini olumsuz etkilemektedir [1]. Aynı zamanda kabin içi gürültü seviyesinin düşük olması, sürücü ve yolcuların yorgunluk hissinin azalmasına yardımcı olmaktadır [2].

Bu hedefler doğrultusunda, otomobillerde taban, tavan, motor bölgesi, kaput altı, egzoz hattı ve bagaj alanı gibi çeşitli bölgelerde ses ve termal izolatörler kullanılır. Bu izolatörlerin üretiminde genellikle, kompozit malzeme olarak adlandırılan, iki veya daha fazla farklı bileşenden oluşan malzemeler kullanılmaktadır [3]. Kompozit malzemeler, bireysel özelliklerini korumakla beraber, diğer malzemeler ile birleştirildikleri için daha üstün mekanik, termal ve akustik özellikler kazanan mühendislik materyallerine dönüşmektedir.

Kompozit malzemeler yaklaşık 80 yıldır otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır [4]. Hafiflik, yüksek mekanik dayanım, korozyon direnci ve tasarım kolaylığı gibi özellikler sayesinde otomotiv endüstrisinde sıklıkla tercih edilmektedir [5]. 2020 yılında elde edilen verilere göre, küresel otomotiv kompozit malzemeleri pazarının yaklaşık 9,4 milyar ABD doları olduğu tahmin edilmiş olup, 2027 yılına kadar yaklaşık 19,4 milyar ABD dolarına ulaşması öngörülmektedir [6].

Otomobillerde termal ve akustik performans beklentileri nedeniyle, karbon elyaf takviyeli, cam elyaf takviyeli, seramik matrisli, alüminyum matrisli, doğal elyaf ve sentetik elyaf kompozitler gibi birden fazla tipte kompozit malzeme kullanılmaktadır [7]. Her iki performans beklentisini karşılamak amacıyla, farklı kompozit malzemelerden oluşan çok katmanlı yapılar oluşturularak, sandviç malzemeler elde edilebilir.

Bir araç içerisinde gürültü üç temel kaynaktan yayılır. Bunlar motor gürültüsü, yol gürültüsü ve rüzgâr gürültüsüdür. Motor gürültüsü, güç aktarma elemanlarının çalışması esnasında ortaya çıkan gürültü ve titreşimlerinden kaynaklanmakta olup, frekans aralığı 50-500Hz'dir. Düşük devirlerde düşük frekanslarda ses çıkarırken, motor devri arttıkça frekans da yükselir. Yol gürültüsü, yol yüzeyi ve lastik arasındaki etkileşimden kaynaklanmakta ve frekans aralığı 500-1300Hz'dir. Yol gürültüsü genellikle 40 km/saat üzerindeki araç hızlarında fark edilmeye başlar, ancak genel iç gürültüye maksimum katkısı 50 ila 80 km/saat arasındadır ve daha sonra aerodinamik gürültünün baskın olduğu yüksek hızlarda azalır. Rüzgâr gürültüsü ise, aracın 100 km/saat üzerindeki hızlarda sabit bir ortam içerisinde hareket ederken çıkan aerodinamik gürültüdür. 1000-5000Hz frekans aralığındadır [8].

Bununla birlikte, bir araçta motor, egzoz sistemi, fren sistemi, elektrikli veya hibrit araçlar için batarya sistemi ve elektronik bileşenler başlıca ısı kaynaklarıdır. Özellikle motor, batarya ve egzoz gibi yüksek ısı üreten bileşenlerin, düşük ısıl iletkenlik katsayısına sahip kompozit malzemeler ile kaplanması ve çevresindeki ısı transferinin minimize edilmesi, aracın içindeki sıcaklık dengesini korumak için oldukça önemlidir. Örneğin, bir yolcu otobüsünde sürüş esnasında motor bölgesi 80°C sıcaklığa ulaşmaktadır [9].

Literatürde akustik performansı iyileştirmeye yönelik olarak, kabin içi gürültü seviyesini azaltmak amacıyla, dıştan içe doğru iki kaplama telası arasında PP/GF, PE film, taş yünü içeren bir kompozit sandviç yapı öneren bir çalışma ortaya koyulmuştur [10]. Başka bir çalışmada ise, hindistan cevizi lifi ve hindistan cevizi kabuğu kullanılarak kompozit ses emici malzemeler oluşturulmuş ve orta, düşük frekansta etkili sonuçlar elde edilmiştir [11]. Elektrikli araç batarya muhafazalarında kullanılmak üzere, termal yalıtım sağlamak amacıyla kompozit malzeme önerilen bir çalışma yapılmıştır. Önerilen kompozit malzemenin dış katmanlarında karbon fiber takviyeli kompozit, ara katmanlarda ise bakır kaplı polyster, melamin köpük ve grafit parçacıkları ile zenginleştirilmiş reçine bulunmaktadır [12].

Bu çalışmada, otobüs, kamyon, tır veya binek araç gibi farklı motorlu taşıtların iç kabininde, termal ve akustik izolasyon sağlayarak, sürüş konforunu artırmaya yönelik, yenilikçi bir, çok katmanlı kompozit

yapı geliştirilmiştir. Alt ve üst katmanda kaplama telası ve fenolik keçe kombinasyonu kullanılarak, akustik performansı ve mekanik dayanımı yüksek bir yapı oluşturulmuştur. Ara katmanlarda ise özellikle termal izolasyon özellikleri ile ön plana çıkan alüminyum folyo kaplı cam elyaf kumaş, silikon kaplı cam elyaf kumaş ve vermikülit kaplı silika kumaş gibi farklı malzemeler ayrı ayrı ve ikili kombinasyonlar şeklinde kullanılmıştır. Her bir katmanda spesifik performans özellikleriyle ön plana çıkan bir materyal kullanılarak oluşturulan çok katmanlı kompozit yapının termal iletkenlik, ses yalıtımı ve dayanıklılık açısından fark yaratan bir kompozisyon olması hedeflenmiştir.

Bu çalışma, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak hem termal hem de akustik izolasyonu bir arada sağlamayı hedefleyen, her bir katmanda spesifik performans özellikleri sunan, yenilikçi bir kombinasyon önermektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde oluşturulan çok katmanlı yapı için, malzemelerin seçimi, üretimi ve test teknikleri anlatılmıştır.

2.1. Malzeme Kompozisyonunun Seçimi

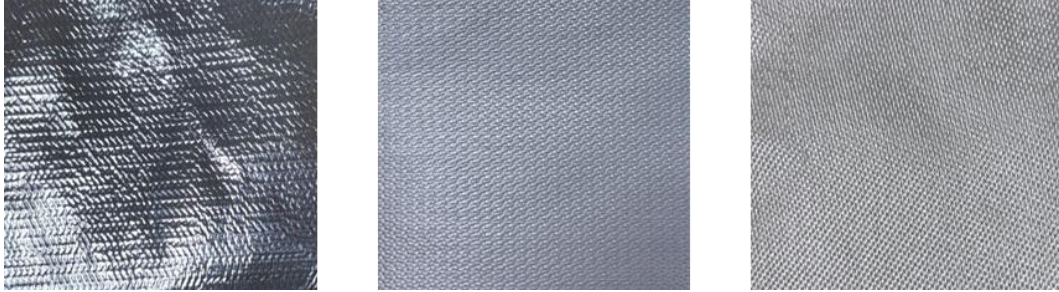
Bu çalışmada, çeşitli motorlu taşıtların iç kabininde sürüş konforunu artırmak amacıyla, çok katmanlı kompozit plaka elde edilmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Tablo 1’de yer alan malzeme kombinasyonları kullanılarak, termal ve akustik izolasyon performansının artırılması hedeflenmiştir. Malzeme kombinasyonları, benzer izolatörlerin şartnameleri, akustik ve termal izolasyon ihtiyaçları dikkate alınarak belirlenmiştir. Belirlenen malzemeler düz bir kalıpta preslenerek çok katmanlı kompozit plakalar elde edilmiştir. Üretilen numunelerin termal ve akustik performansları, ısı iletkenlik ve empedans tüpü testleriyle değerlendirilmiş ve hedefe yönelik en iyi performansı gösteren malzeme kompozisyonu seçilmiştir.

Tablo 1. Malzeme kompozisyonları (K)

İçerik						
K1	%5,68 Tela	%34,93 Fenolik Keçe	%18,78 Alüminyum Folyo Kaplı Cam Elyaf Kumaş	%34,93 Fenolik Keçe	%5,68 Tela	
K2	%5,16 Tela	%31,75 Fenolik Keçe	%18,78 Silikon Kaplı Cam Elyaf Kumaş	%31,75 Fenolik Keçe	%5,16 Tela	
K3	%5,68 Tela	%34,93 Fenolik Keçe	%18,78 Vermikülit Kaplı Silika Kumaş	%34,93 Fenolik Keçe	%5,68 Tela	
K4	%4,41 Tela	%27,12 Fenolik Keçe	%22,37 Vermikülit Kaplı Silika Kumaş	%14,58 Alüminyum Folyo Kaplı Cam Elyaf Kumaş	%27,12 Fenolik Keçe	%4,41 Tela
K5	%4,41 Tela	%27,12 Fenolik Keçe	%22,37 Vermikülit Kaplı Silika Kumaş	%14,58 Silikon Kaplı Cam Elyaf Kumaş	%27,12 Fenolik Keçe	%4,41 Tela
K6	%4,78 Tela	%29,41 Fenolik Keçe	%15,81 Silikon Kaplı Cam Elyaf Kumaş	%15,81 Alüminyum Folyo Kaplı Cam Elyaf Kumaş	%29,41 Fenolik Keçe	%4,78 Tela

Kompozit yapının en dış katmanında, kaplama malzemesi olarak, dokusuz yüzeye sahip bir tekstil malzemesi olan liflerin, ısı ve basınçla bağlanması sonucu elde edilen tela malzeme kullanılmıştır [13]. İzolasyonun konumlanacağı bölgede, parçanın su ve yağ ile temas etme olasılığı yüksek olduğundan, su ve yağ itici özellikli, deformasyona karşı dayanıklı ve termal stabiliteye sahip bir tela tercih edilmiştir. Bununla birlikte malzemenin hafif olması toplam ağırlığı arttırmamaktadır. Kullanılan kaplama telası, piyasada PANOX® ticari ismi ile bilinen, %50 karbon içerikli ve 130 kg/m³'tür yoğunluğa sahiptir.

Bununla birlikte özellikle akustik performans ve mekanik dayanımının yüksek, aynı zamanda diğer keçe'lere oranla maliyet avantajı sağlaması sebebiyle ana bileşen olarak fenolik keçe kullanımı kararlaştırılmıştır. Fenolik keçe, reçine ve elyaf hammaddesinin harmanlanması ile elde edilen bir tekstil malzemesidir. İçeriğinde bulunan fenolik reçine, formaldehit ve fenol türevleri arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyon sonucu oluşan ürünleri kapsayan termoset bir polimerdir [14]. Kullanılan fenolik keçe, %60 oranında polyester & pamuk karışımından oluşan elyaf ve %40 oranında fenol formaldehit reçine içermektedir. 800 kg/m³ yoğunluğa sahiptir. Ara katmanda ise ısı iletkenlik katsayısını düşürmek amacıyla, sıcaklık dayanımı ile ön plana çıkan kaplamalı kumaşlar kullanılmıştır. Bu kapsamda Onse Kompozit firmasından tedarik edilen ve Şekil 1'de gösterilen, alüminyum folyo kaplı cam elyaf kumaş, silikon kaplı cam elyaf kumaş ve vermikülit kaplı silika kumaş tek başına ve kombinasyonlar şeklinde çok katmanlı yapıya eklenmiştir.

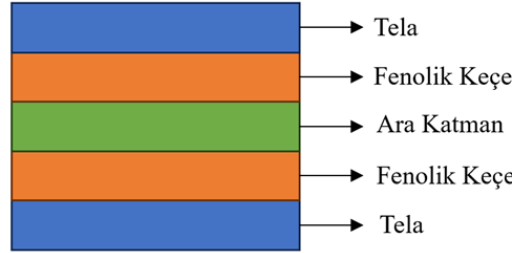


Şekil 1. Sırayla alüminyum folyo kaplı cam elyaf kumaş, silikon kaplı cam elyaf kumaş, vermikülit kaplı silika kumaş

Cam elyaf, özel olarak tasarlanmış ve dibinde küçük deliklerin bulunduğu özel bir ocaktan eritilmiş camın itilip katılaştırılması ile üretilmektedir. Bu ince lifler soğutulduktan sonra makaralara sarılarak ip haline getirilir [15]. E (elektrik) camı ise düşük maliyetli, yalıtkan, mukavemeti yüksek ve suya karşı dayanıklı bir cam tipidir. Genellikle nemli ortamlar için kullanılmaktadır [16]. Bu çalışmada kullanılan malzemelerden ikisi, 430 gr/m² yoğunluğunda E sınıfı cam elyafı ile üretilen ve farklı kaplamalar ile güçlendirilen kompozit malzemelerdir. Alüminyum folyo kaplanmış cam elyaf kumaş, bulundurduğu alüminyum folyo kaplama sayesinde yüksek ısı radyasyonunu yansıtarak, ısı dayanımını artırmaktadır. 180 °C'ye kadar ısıya dayanıklıdır. Cam elyafın dayanıklı ve esnek yapısı, alüminyum folyonun ısı ve ışık yansıtıcı özellikleriyle birleştirilerek termal izolasyon sağlamaktadır. Silikon kaplı cam elyaf kumaş ise, bulundurduğu silikon kaplama sayesinde sıvı, yağ vb. maddelerin kumaş altına geçişini engeller. Mekanik, termal ve elektrik gibi dış etkilere karşı yüksek direnç sağlar. Işık geçirmezliği, UV direnci ve oksidasyon direnci bulunmaktadır. 230 °C'ye kadar ısıya dayanıklıdır. Silika, silikon dioksit monomerlerinin polimerizasyonu sonucu oluşan ve doğada yaygın olarak bulunan bir bileşiktir [17]. Silika amorf ve kristal olarak iki ana türde doğada bulunmaktadır. Aynı zamanda bu türler sentetik olarak da elde edilebilmektedir [18]. Silika kumaş, amorf silika liflerinden oluşan ve olağanüstü ısı direncine sahip bir materyaldir. Termal şoka ve doğrudan alev etkisine karşı dirençlidir. Isıl iletkenlik katsayısı düşüktür ve 1000 °C'ye kadar dayanıklıdır. Vermikülit, silikat grubuna ait doğal, inorganik, toksik olmayan bir mineraldir. Hafifliği sayesinde, yaygın olarak yalıtım, kaplama gibi alanlarda kullanılmaktadır [19]. Ara katmanda kullanılan üçüncü malzeme 660 gr/m² yoğunluğa sahip, vermikülit kaplı silika kumaştır. Bu kompozit malzeme minimum %94 oranında silisyum dioksit içermektedir. Bulundurduğu vermikülit kaplama kumaşın ısı direncini artırır, kimyasal dayanıklılık sağlar ve aşınmaya karşı koruma sunmaktadır. Vermikülit kaplaması ayrıca kumaşa ekstra termal yalıtım özellikleri kazandırarak yüksek sıcaklık ortamlarında kullanımını daha uygun hale getirir. 1100 °C'ye kadar dayanıklıdır. Kullanılan tüm kumaş çeşitleri çift tarafı kaplamalı olacak şekilde ve saten dokuma tipinde tercih edilmiştir.

2.2. Prototip Ürünlerin Hazırlanması

Tüm prototip ürünlerde Şekil 2’de gösterildiği üzere, üst ve alt katmanda tela ve fenolik keçe kullanılmıştır.



Şekil 2. Çok katmanlı yapı gösterimi

Şekil 1’de gösterilen bu yapı, akustik performans ve termal yalıtım özellikleri açısından, ağır hizmet araçlarının bulunduğu zorlu koşullarda çalışan sistemlerin gereksinimlerini karşılamak için ideal kombinasyondur. Tablo 1’de verilen malzemeler 1 x 1,2 m ebatlarında hazırlanarak, üst üste olacak şekilde çok katmanlı yapı oluşturulmuştur. Prototip numune üretimleri, 250 tonluk hidrolik pres kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her katmanın homojen bir şekilde yerleştirilmesi için düz yüzeye sahip metal bir kalıp tercih edilmiştir. Hidrolik pres, sıkıştırma kuvveti oluşturmak hidrolik silindir kullanan bir makinedir [20].

Üretim esnasında kullanılan parametreler, nihai ürünün mekanik, termal ve yapısal özelliklerini doğrudan etkileyeceğinden kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada 185 °C sıcaklık, 170 bar basınç ve 120 saniye kullanılmıştır. Makine parametreleri, yapıda bulunan temel hammadde olan fenolik keçeğe göre belirlenmiştir. Fenolik reçinelerin termoset özellikleri, ısı ve basınç uygulamasıyla ortaya çıkmaktadır. Fenolik keçe içerisinde bulunan fenol formaldehit reçinenin kürleşmesi ve moleküller arası bağların güçlenmesi için minimum 170 °C sıcaklık kullanılması gerekmektedir. Bununla birlikte, 185 °C sıcaklık ve 120 saniye presleme süresi, reaksiyonu hızlandırarak kürleşme sürecinin daha verimli olmasını sağlamaktadır. Düşük sıcaklıklar, reaksiyonun yavaşlamasına ve zayıf bağ yapılarının oluşmasına yol açabilir, bu da nihai ürünün dayanıklılığını olumsuz yönde etkiler. Daha yüksek sıcaklıklar ise, fenolik reçinenin yanmasına sebep olarak, ürünün mekanik ve termal özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Basınç, kompozit malzemenin homojenliğini ve katmanlar arasındaki yapısal bütünlüğü sağlamada önemli bir faktördür. 170 bar basınç, yapıda bulunan katmanların, homojen birleşmesini ve aralarında kuvvetli bir bağ oluşmasını sağlamaktadır. Yeterli basınç uygulanmadığı takdirde, katmanlar arasında istenen yapısal bütünlük sağlanamadığından, malzemenin performansını ve dayanıklılığı azalmaktadır. Daha yüksek basınç değerleri ise, malzemede deformasyona neden olarak, malzemenin fonksiyonel özelliklerini kaybetmesine yol açar. Bu çalışma kapsamında, benzer malzemelerin üretim süreçlerine dair yürütülen çalışmalar temel alınarak, oluşturulan kompozit yapının yüksek performanslı ve dayanıklı olmasını sağlamak üzere, en uygun makine parametreleri kullanılmıştır.

Kompozit malzemelerin üretiminde, numune kalınlığının sabit tutulması, performans özelliklerinin karşılaştırılabilmesi ve deneysel sonuçların güvenilirliği açısından kritik bir gerekliliktir. Otomotiv endüstrisinde, termal ve akustik izolasyon amacıyla üretilen çok katmanlı paneller genellikle 20-25 mm aralığında üretilmektedir. Bu aralık, hafiflik ve performans gerekliliklerini sağlamak açısından optimal bir seçimdir. Tüm numunelerin 20 mm kalınlıkta olmasını sağlamak üzere, presleme esnasında farklı kalınlıklarda stoper mekanizmaları kullanılmıştır. Stoper, kalıpta sıkıştırmayı sınırlayan fiziksel bariyerlerdir. Bu mekanizmalar, numunenin istenilen kalınlıkta üretilmesine imkân tanıyarak, her bir katman arasındaki bağ yapısının homojen olmasını sağlamaktadır.

2.3. Ses Yutum Katsayısı Ölçümleri

Otomotiv sektöründe kullanılan yalıtım malzemelerinin akustik özelliklerini belirlemek için birçok standart ve standart dışı (işe özel) test yöntemleri bulunmaktadır. Günümüzde en çok kullanılan akustik test yöntemleri empedans tüpü, yarı yansız oda, çınlanım odası ve alfa kabin testleridir.

Çeşitli motorlu taşıtların iç kabininde sürüş konforunu artırmak amacıyla belirlenen 6 farklı malzeme kompozisyonu ile, kalıp sıcaklığı ve basıncı sabit tutularak elde edilen 6 adet prototip numunenin akustik performans testleri TS EN ISO 354 [21] standardına uygun olarak Formfleks Ar-Ge laboratuvarında yer alan alfa kabin test cihazı (Şekil 3) ile 400~10000 Hz ölçüm aralığında gerçekleştirilmiştir. Düz plaka formundaki bu prototip numunelerden, 1 x 1,2 m ebatlarında, 20 mm kalınlıkta hazırlanan test numuneleri, Şekil 3'te gösterildiği gibi alfa kabinin merkezine yerleştirilmiştir. Ölçüm sırasında tahrik alfa kabinin köşelerine yerleştirilmiş hoparlörler tarafından verilmekte olup, ses basıncı test numunesinin hemen üzerinde konumlu bulunan mikrofonlar aracılığı ile ölçülmektedir.



Şekil 3. Alfa kabin test cihazı

Alfa kabinler, sonuçların sağlıklı olması açısından çalışma aralığı olarak 400 Hz ile 10000 Hz frekans aralığında otomotiv endüstrisinin ihtiyaçlarına cevap verecek şekilde üretilmekte olup, akustik hesaplamalar ses kaynağından oluşturulan sesin sönümlenmesi için geçen süre baz alınarak yapılmaktadır. Serbest alan mikrofonlarıyla ölçüm yapılan alfa kabin testlerinde ses yutum katsayısı (α), aşağıda formülü verilen Sabine formülü kullanılarak yapılmaktadır [22].

$$\alpha = \frac{0.163 \times V}{S} \left(\frac{1}{TR} - \frac{1}{TR0} \right) \times C \quad (1)$$

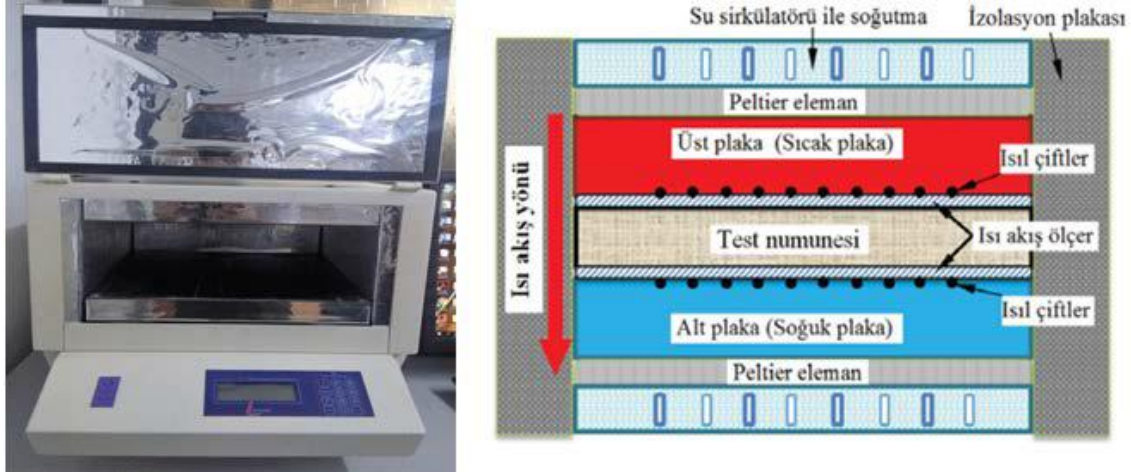
Burada V. Kabin hacmi, S: Numune Alanı, TR: Numune kabin içerisindeyken oluşan çınlanım süreleri, TR0: Kabin boş iken elde edilen referans çınlanım süreleri ve C: Kabin düzeltme katsayısıdır.

C katsayısı, kabin içindeki ses dalgalarının yayılımı ve sönümlenmesine ilişkin deneysel veya teorik olarak belirlenen bir faktördür. İdeal bir yankılanma odasında C genellikle 1 olarak kabul edilmektedir. Akustik performans testleri gerçekleştirilirken laboratuvar ortamı, 23 °C sıcaklık ve %45 bağıl neme sahip olacak şekilde şartlandırılmakta ve ortam, test esnasında dış ortamdan gelen gürültü minimum seviyede olacak şekilde izole edilmektedir.

2.4. Isıl İletkenlik Katsayısı Ölçümleri

Çalışma kapsamında elde edilen prototip numunelerinin ısı iletkenlik testleri, TA Instruments markalı, Lasercomp Fox 314 modeli cihazda gerçekleştirilmiştir. Test numuneleri 30 x 30 x 2 cm ebatlarında hazırlanmış olup, TS ISO 8301 [23] standardına uygun olarak ısı iletkenlik testleri gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4'te ısı iletkenlik ölçüm cihazı ve cihazın çalışma prensibi verilmektedir. Buna göre, ölçüm yapılırken, numune farklı peltier etki ile sabit bir sıcaklık değerinde tutulmaktadır. Bu esnada alt ve üst plakalarında bulunan ısı akış ölçer ile ısı akışı ve ısı çiftleri ile numune sıcaklıkları ölçülmektedir [24]. Test sırasında, alt plaka sıcaklığı 10 °C, üst plaka sıcaklığı 30 °C olarak ayarlanarak 10 farklı noktadan yapılan ölçümlerin ortalama değeri alınmakta ve ısı iletkenlik katsayısı λ (W/m.K) belirlenmektedir. Isıl iletkenlik katsayısının belirlenmesinde ise Fourier ısı iletim denklemi kullanılmaktadır [25].



Şekil 4. Isıl iletkenlik ölçüm cihazı ve cihazın çalışma prensibi [24]

$$Q = kA \frac{(T_2 - T_1)}{L} \quad (2)$$

Bu denklemde, Q malzemeden geçen ısı enerjisini (ısı akışı), k (W/mK) ısı iletkenlik katsayısı, A (m²) alan, (T₂-T₁) sıcaklık farkı (K), L (m) numune kalınlığını, Q ise malzemeden geçen ısı enerjisini ifade etmektedir.

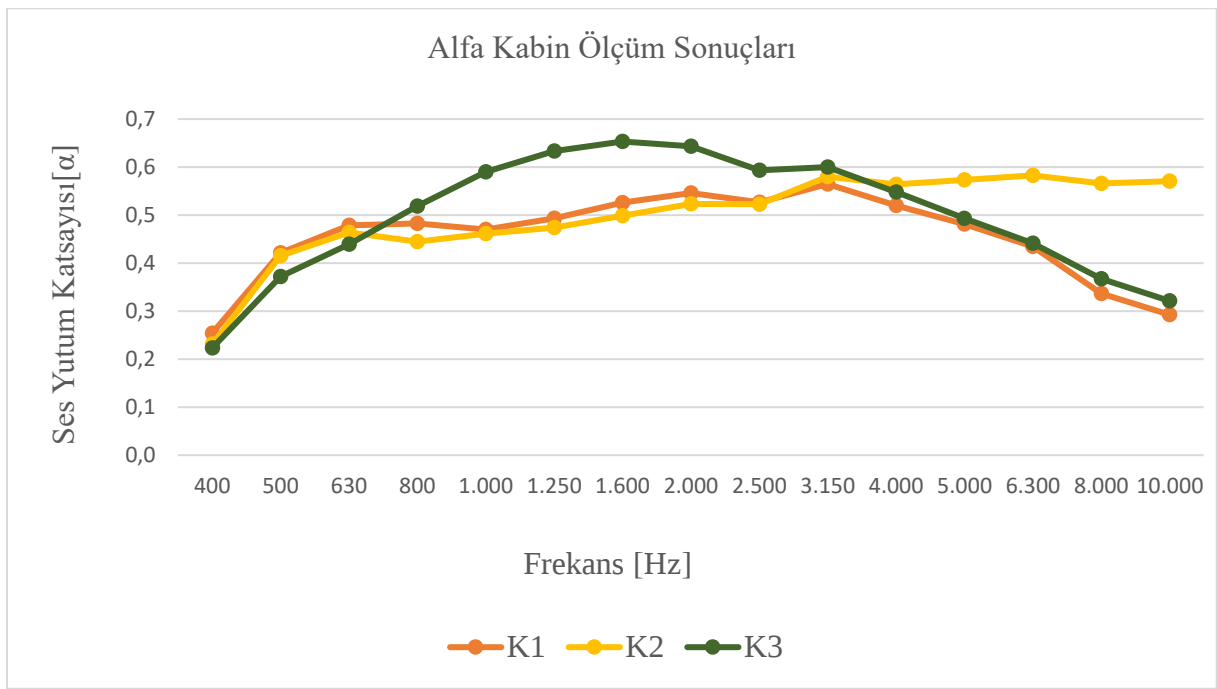
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, akustik ve termal performans test sonuçları incelenmiştir.

3.1. Ses Yutum Katsayısı Test Sonuçları

Akustik konfor, günümüzde hem endüstriyel hem de günlük yaşamda ön plana çıkan bir gereklilik haline gelmiştir. Gürültünün kontrol altına alınmasında kullanılan ses yalıtım malzemeleri, yalnızca tasarım olarak değil, aynı zamanda malzeme bileşimleri açısından da büyük bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, belirli oranlarda tela, fenolik keçe ve özel kaplamalı kumaşlar ile hazırlanan akustik panel kombinasyonlarının ses yutum performansları analiz edilmiştir. Sonuçlar, her bir malzeme türünün ve oranının akustik özelliklere olan etkisini ortaya koymuştur.

Şekil 5'te tek ara katmana sahip numunelere ait ses yutum katsayısı-frekans grafiği, verilmiştir. X ekseninde verilen frekans değerleri, sesin titreşim hızını ifade etmektedir. Bu ekseninde, sesin düşük frekanslardan (400 Hz) yüksek frekanslara (10.000 Hz) kadar nasıl davrandığı analiz edilmektedir. Y ekseninde verilen ses yutum katsayısı, bir malzemenin ses enerjisini ne kadar iyi emdiğini göstermektedir. Ses yutum katsayısı, 0 ile 1 arasında değişmekte olup, 0, sesin tamamen yansıtıldığını, 1 ise tamamen yutulduğunu ifade etmektedir [22]. Buna ek olarak bir ses enerjisinin %55'inin yutulması durumunda ses yutma katsayısının, bahsedilen frekanslar için 0,55, sesin %100'ünün yutulması durumunda α değerinin 1, sesin %100 yansıtılması durumunda ise α değerinin 0 olduğu ifade edilmektedir [26].

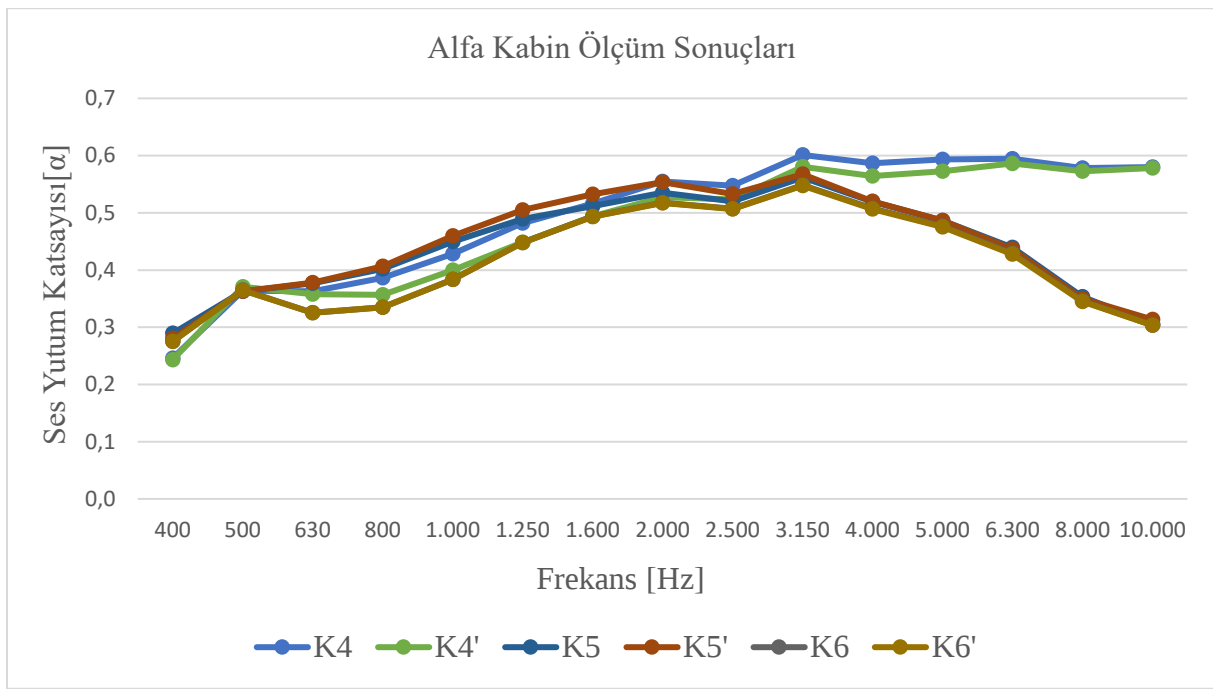


Şekil 5. Tek ara katmana sahip numunelerin ses yutum katsayısı-frekans grafiği

Tüm kombinasyonlar 400-800 Hz aralığında benzer performans sergilemiştir. Bu frekans aralığındaki ses dalgalarının dalga boyları oldukça uzundur. Bu dalgalar, genellikle malzemenin yüzeyinden geçip daha derin katmanlara ulaşır. Tüm kombinasyonların ses dalgalarının geçişini sağlayacak şekilde çok katmanlı bir yapıya sahip olmaları, sesin malzeme türünden bağımsız olarak benzer şekilde emilmesine yol açar. Kombinasyonlar arasında farklılık yaratan kaplamalı kumaşlar, düşük frekanslarda belirgin bir etki yaratmaz. Çünkü düşük frekansta ses dalgaları bu malzemeleri kolayca geçerek alt katmanlara ulaşabilir.

800-3500 Hz frekans aralığında, tüm kombinasyonlarda performans artışı gözlenmekte olup, özellikle vermikülit kaplı silika kumaş katkılı K3 numunesi, diğer numunelere göre yaklaşık %17 daha iyi bir performans göstermiştir. Alüminyum folyo ve silikon kaplamalı cam elyaf kumaşlardan oluşan K1 ve K2 numuneleri benzer ses yutum performansı göstermiştir. Üç numune arasındaki temel farklılık, kaplamalardan bağımsız olarak K3'ün silika kumaş, K1 ve K2'nin ise cam elyaf kumaş içermesidir. Cam elyaf kumaş, çok ince cam ipliklerinden yapılmakta olup, sert ve hafif bir yapıya sahiptir. Camın doğal yapısı ise ses dalgalarını yansıtmaya eğilimi göstermektedir. Yansıma, sesin malzeme tarafından geri gönderilmesi anlamına gelir, bu da sesin verimli bir şekilde emilmediğini göstermektedir. Bununla birlikte cam elyaf kumaşın gözenekliliği düşük bir malzeme olması sebebiyle, ses yutumu daha düşüktür. Silika kumaş ise, yüksek gözenekliliğe sahip, elastik ve daha pürüzlü bir yapıdadır. Pürüzlü yüzeylerde, ses dalgaları malzeme ile etkileşime girmektedir. Bu da ses dalgalarının daha iyi absorbe edilmesini sağlamaktadır. Örneğin, motor bölgesinde meydana gelen gürültülerin absorpsiyonunu sağlamak üzere, 1000-4000 Hz aralığında yüksek ses yutum performansı beklenmektedir. Bu durumda motor bölgesinde kullanılacak bir izolasyon parçası için K3 kompozisyonu iyi bir tercih olabilir. 3500-10000 Hz aralığında ise, silikon kaplı cam elyaf kumaş katkılı K2 numunesinin, diğerlerine oranla %28 daha iyi bir akustik performans gösterdiği görülmektedir.

Şekil 6'da çift ara katmana sahip numunelerin ses yutum katsayısı-frekans grafiği verilmiştir. Bu kısımda K' şeklinde verilen ölçüm sonuçları, numune plakanın ters çevrilerek ölçülmesi sonucu elde edilmiştir. Plakanın ters çevrilmesi, katman sıralamasını ve bağlantılı olarak ses dalgalarının ilk temas ettiği yüzeyi değiştirmektedir. Ses dalgalarının kompozisyonun farklı katmanlarına çarpması ile yansıma ve emilim gerçekleşir. Kompozisyonun ters çevrilmesi durumunda ilk karşılaşılan yüzey, ses dalgasının geçiş direncini etkileyerek ses yutum performansını değiştirebilir.



Şekil 6. Çift ara katmana sahip numunelerin ses yutum katsayısı-frekans grafiği

2000 Hz'e kadar olan düşük ve orta frekanslarda, vermikülit kaplı silika kumaş ve silikon kaplı cam elyaf kumaşın kombine kullanıldığı K5' numunesi en iyi akustik performansı göstermektedir. Silikon kaplama, ses dalgalarını geri yansıtarak silika kumaşın daha fazla enerji absorbe etmesine olanak tanır. Ses dalgaları iki katman arasında çoklu yansıma ve kırılma hareketi gerçekleştirerek enerjilerini kaybeder. Bu kombinasyon, düşük ve orta frekanslarda yüksek verimli bir akustik izolasyon çözümü sunmaktadır.

2000 Hz ve üzeri yüksek frekanslarda, vermikülit kaplı silika kumaş ve alüminyum folyo kaplı cam elyaf kumaşın kombine kullanıldığı K4 ve K4' numunesi en iyi akustik performansı sergilemiştir. Vermikülit kaplı silika kumaşın yüksek gözenekli yapısı ile alüminyum folyo kaplı cam elyaf kumaşın yoğun ve yansıtıcı özellikleri, birlikte kullanıldığında sinerjik etki oluşturarak yüksek frekansta ses yutum katsayısını artırır. Alüminyum folyo, ses dalgalarını yansıtarak silika kumaş içinde çoklu geçiş sağlar ve enerji kayıplarını maksimize eder. Bu sayede, yüksek frekanslı ses dalgalarının etkili bir şekilde absorbe edilmesi sağlanmaktadır.

3.2. Termal İletkenlik Katsayısı Test Sonuçları

Çalışma kapsamında üretilen, prototip numunelere uygulanan termal iletkenlik katsayısı ölçüm sonuçları Tablo 2'de verilmektedir. Kompozisyonların tamamında alt ve üst katman olarak kullanılan ve iyi bir yalıtkan malzeme olan fenolik keçenin termal iletkenlik katsayısı 0,040 W/m.K şeklindedir. Termal iletkenlik katsayısını düşürmek üzere ara katmanda kullanılan kaplamalı kumaşların etkisi incelenmiştir.

Sonuçlara göre K1 numunesi en düşük ısı iletkenlik değerine sahiptir. Alüminyum folyo kaplı cam elyaf kumaşın varlığının yansıtıcı yüzeye sahip olması ile ek termal direnç sağladığı düşünülmektedir. Cam liflerinin sahip olduğu gözenekli ve hafif yapı, K1 numunesinin, ısıyı etkin bir şekilde emerek dağıtmasına ve buna bağlı olarak ısı iletkenliği minimize etmesine katkı sağladığı düşünülmektedir.

K2 numunesi ısı iletkenlik performansı bakımında K1 numunesine benzer özellik göstermektedir. Silikon kaplama alüminyum folyo kaplamaya oranla daha düşük performans göstermesi beklenmektedir ancak elde edilen termal iletkenlik katsayısı sonuçlarına göre yapısında bulunan cam elyaf sayesinde benzer performans sağladığı görülmüştür.

K3 numunesinin ara katmanında bulunan vermikülit kaplı silika kumaşın termal iletkenlik katsayısının, vermikülitin yüksek sıcaklıklara dayanıklılık gerektiren uygulamalarda kullanımının bilinmesinden

dolayı, K1 ve K2 numunelerine oranla daha düşük çıkması beklenmektedir. Ancak elde edilen sonuçlar bu beklentiye doğrulamamaktadır. Bunun nedeninin, vermikülitin ısıya dayanıklı bir malzeme olmasına rağmen, ısı enerjisini yansıtmak yerine bir miktar absorbe etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Dolayısıyla termal iletkenlik katsayısı K1 ve K2'ye oranla yüksektir.

Tablo 2. Termal iletkenlik katsayısı ölçüm sonuçları

Ölçüm Sayısı	K1	K2	K3	K4	K5	K6
1	0,03542	0,03494	0,03543	0,03605	0,03624	0,03553
2	0,03562	0,03497	0,03536	0,03580	0,03633	0,03549
3	0,03497	0,03492	0,03536	0,03590	0,03597	0,03540
4	0,03481	0,03490	0,03533	0,03573	0,03608	0,03533
5	0,03464	0,03486	0,03528	0,03580	0,03628	0,03569
6	0,03469	0,03486	0,03530	0,03569	0,03651	0,03542
7	0,03487	0,03486	0,03529	0,03589	0,03608	0,03533
8	0,03463	0,03483	0,03525	0,03604	0,03602	0,03533
9	0,03455	0,03485	0,03525	0,03584	0,03603	0,03531
10	0,03395	0,03482	0,03525	0,03576	0,03602	0,03532
Ortalama Değer	0,03482	0,03488	0,03531	0,03585	0,03616	0,03542

Kaplamalı kumaşların ikili kombinasyon şeklinde kullanıldığı K4, K5 ve K6 numunelerinin termal iletkenlik katsayısının K1, K2 ve K3'e oranla daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir. Çift katmanlı yapılar, katmanlar arası ara yüzeyde ısı geçişi sırasında ek direnç yaratmaktadır. Buna karşılık, bu direnç düzgün dağıtılmadığında veya uyumsuz malzemeler birlikte kullanıldığında, toplam sistemin termal iletkenliği yüksekselebilmektedir.

Farklı termal iletkenlik katsayılarına sahip malzemeler birlikte kullanıldığında, toplam sistemin yalıtım performansı en düşük yalıtım sağlayan malzeme tarafından belirlenir. Buna uyumlu olarak, ikili kombinasyonlarda silikon kaplı cam elyaf kumaş ve alüminyum folyo kaplı cam elyaf kumaştan oluşan K6 numunesinin en iyi termal performansı sağlaması bunu doğrular niteliktedir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, otobüs, kamyon, tır veya binek araç gibi farklı motorlu taşıtların iç kabininde, termal ve akustik izolasyon sağlayarak, sürüş konforunu artırmaya yönelik olarak alt ve üst katmanda kaplama telası ve fenolik keçe kombinasyonu, ara katmanlarda ise özellikle termal izolasyon özellikleri ile ön plana çıkan alüminyum folyo kaplı cam elyaf kumaş, silikon kaplı cam elyaf kumaş ve vermikülit kaplı silika kumaş gibi kaplamalı kumaşların tekli ve ikili kombinasyonları kullanılarak akustik ve termal performansı yüksek bir yapı oluşturulmuştur. Söz konusu katmanlar ile düz bir kalıpta, 185 °C sıcaklık, 170 bar basınç ve 120 saniye süre ile yenilikçi sandviç kompozit plakalar elde edilmiştir. Elde edilen kompozit plakaların alfa kabin test cihazında ses yutum katsayıları, termal iletkenlik ölçüm cihazında ise termal iletkenlik katsayıları ölçülerek birbiri ile karşılaştırılmıştır. Akustik performans test sonuçları incelendiğinde, motor bölgesinde meydana gelen gürültülerin absorpsiyonunu sağlamak üzere, 1000-4000 Hz aralığında kararlı bir ses yutum performansı gösteren sandviç kompozit yapının, iki kaplama telası arası, fenolik keçe, vermikülit kaplı silika kumaş ve fenolik keçe içeren K3 kompozisyonu olduğu tespit edilmiştir. Ara katmanda kaplamalı kumaşların ikili kombinasyonlarının kullanıldığı sandviç plakalarda ise ısı ve ses üreten yapıya bakacak yönde iki kaplama telası arası fenolik keçe vermikülit kaplı silika kumaş, alüminyum folyo kaplı cam elyaf kumaş ve fenolik keçe içeren K4 kompozisyonu olduğu tespit edilmiştir. Termal iletkenlik katsayısı sonuçları değerlendirildiğinde ise elde edilen sandviç plakaların termal izolasyon performansı $K1 > K2 > K3 > K6 > K4 > K5$ şeklinde sıralanmaktadır. Elde

edilen veriler göz önüne alındığında hem akustik hem de termal izolasyon performansını bir arada sunabilecek sandviç kompozit yapı K3 numunesi ile sağlanmaktadır.

Yapılan bu çalışmada, motorlu taşıtların ısı ve ses üreten motor bölgesinde akustik ve termal izolasyon sağlamaya yönelik kompozit yapılarının geliştirilmesinde, özellikle ara katmanda kaplamalı kumaş kullanımı konusunda uzmanlara destek olacak malzeme kompozisyonları ortaya koyulmuştur. Bu çalışmanın, gelecekte farklı malzeme kombinasyonlarını kullanarak NVH (Gürültü, Titreşim ve Sertlik) alanında uzmanlaşmak isteyenler için rehber niteliğinde bir kaynak oluşturabileceği öngörülmektedir.

TEŞEKKÜRLER

Bu çalışma, Formfleks Otomotiv A.Ş.- Ar-Ge Merkezi bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Yazarlar değerli katkılarından dolayı Ar-Ge Lideri Sn. İbrahim AYDIN'a teşekkür eder.

REFERANSLAR

- [1] Szczurek and M. Maciejewska, Categorisation for Air Quality Assessment in Car Cabin, Transportation Research Part D: Transport and Environment. 48, 161-170, 2016.
- [2] S.P. Mavuri, S. Watkins, X. Wang, S.S. Hill and D. Weymouth, An Investigation of Vehicle HVAC Cabin Noise, SAE Technical Paper. 2008-01-0836, 2008.
- [3] D. V. Rosato, Designing with reinforced composites: Hanser Gardner Publications, 1997.
- [4] M. Ağırhan, Otomotiv Endüstrisinde Kompozit Malzeme Kullanımı, Ejovoc (Electronic Journal of Vocational Colleges). 13(2), 51-64, 2023.
- [5] K. S. Suslick, Encyclopedia of physical science and technology. Sonoluminescence and sonochemistry, 3rd edn. Elsevier Science Ltd, Massachusetts, 2001.
- [6] Automotive Composites - Global Strategic Business Report, <https://www.globenewswire.com/news-release/2024/02/27/2835828/28124/en/Global-Automotive-Composites-Strategic-Industry-Report-2024-Market-to-Reach-58-5-Billion-by-2030-Focus-on-Automotive-Lightweighting-Drives-Demand.html> [accessed 27 February 2024].
- [7] F. Khan, N. Hossain, J.J. Mim, S.M.M. Rahman, M.J. Iqbal, M. Billah and M.A. Chowdhury, Advances of Composite Materials in Automobile Applications– A Review. Journal of Engineering Research, 2024.
- [8] A. Ayvaz, Binek bir aracın gövde panellerinin yol gürültüsü performansına olan katkısının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa, 2019.
- [9] S. Mezarcıöz, Değişik Sürüş Şartları Altında Bir Yolcu Otobüsünün Motor Odası Sıcaklık Dağılımının Belirlenmesi, Mühendis ve Makina, 2018.
- [10] İ. Aydın, S. Arslan, M. Çalışkan Akduman, D. Çay ve Ö. İskender, Ağır Hizmet Araçlarının Gürültü Kalkanı Parçasının Akustik ve Mekanik Dayanım Performansının İncelenmesi, Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences. 10(2), 300-311, 2024.
- [11] R. M. Gabor, P. Blaga, and B. M. Caseriu, Quantitative analysis of predictors of acoustic materials for noise reduction as sustainable strategies for materials in the automotive industry, 2024.
- [12] S. Hu, D. Wang, J. Večerník, D. Křemenáková and J. Militký, Electromagnetic Interference (EMI) Shielding and Thermal Management of Sandwich-Structured Carbon Fiber-Reinforced Composite (CFRC) for Electric Vehicle Battery Casings, Polymers. 16(16), 2291, 2024.
- [13] H. M. Buluklu, Farklı organik malzemelerin ses geçiş kaybı kapasitelerindeki etki ve verimliliğin araştırılması, Doktora Tezi, Tarsus Üniversitesi, Mersin, 2023.
- [14] M.H. Choi, H.Y. Byun and I.J. Chung, The Effect of Chain Length of Flexible Diacid on Morphology and Mechanical Property of Modified Phenolic Resin, Polymer. 43(16), 4437-4444, 2002.

-
- [15] D. Asi, Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin aşınma performansının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, 2008.
- [16] M. Demirel, Cam elyaf takviyeli poliestere kompozitlere yanmazlık özelliği kazandırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2007.
- [17] H. Weill, R. Jones, W. Parkes, Silicosis and related diseases. Occupational lung disorders. Butterworth-Heinemann Ltd; London, England, 1994.
- [18] H.G. Anlar, M. Bacanlı ve N. Başaran, Silikanın Kullanım Alanları ve Silika Maruziyetine Bağlı Olası Toksik Etkiler. Hacettepe University Journal of the Faculty of Pharmacy. 39(1), 17-29, 2019.
- [19] F. Ali, L. Reinert, J.M. Lévêque, L. Duclaux, F. Muller, S. Saeed ve S.S Shah, Effect of Sonication Conditions: Solvent, Time, Temperature and Reactor Type on the Preparation of Micron Sized Vermiculite Particles. Ultrasonics Sonochemistry, 21(3), 1002-1009, 2014.
- [20] S. Kumar and B. Prashanth, Design and Fabrication of Hydraulic Press, Int. J. Sci. Develop. Res. 2(7), 227-230, 2017.
- [21] TS EN ISO 354 Akustik-Ses absorpsiyonun çınlama odasında ölçülmesi, 2006.
- [22] M. Gelen, Otomotiv endüstrisinde kullanılan akustik malzemeler ve malzeme özelliklerinin akustik parametrelere etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2016.
- [23] TS ISO 8301 Isı yalıtımı- Kararlı halde ısı direncin ve ilgili özelliklerin tayini- Isı akış tayini için metotlar, 2002.
- [24] M. Kuru ve C. Kaya, Isı Akış Ölçer ve Geçici Düzlem Kaynak Tekniği ile Klasik Yalıtım Malzemelerinin Isıl İletkenlik Katsayılarının Belirlenmesi, Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi. 10(1), 1-18, 2018.
- [25] R. Kalkan, Kompozit yapı malzemelerinde ısı özellik ölçümü, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, 2008.
- [26] F. A Everest, K. C. Pohlmann, Master Handbook of Acoustics, 2022.