



# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

## Elyaf Takviyeli Çimentolu Levhaların Derzli-Delikli Akustik Panel Olarak Kullanımında Perforasyon Özelliklerinin Etkisi

 Lütfullah GÜNDÜZ<sup>a</sup>,  Şevket Onur KALKAN<sup>b,\*</sup>

<sup>a,b</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, İzmir, TÜRKİYE

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: [sevketonur.kalkan@ikcu.edu.tr](mailto:sevketonur.kalkan@ikcu.edu.tr)

DOI: 10.29130/dubited.1076395

### Öz

Perforeli çimentolu levhalar özellikle iç mekân gürültü kontrolünde bir ses emici malzeme olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, plakaların bir yüzeyinden ortalama 4 mm genişliğinde ve 6 mm derinliğinde oluklar (yarıklar) açılarak bir yüzü oluklu ve derzli form kazandırılmıştır. Çalışma kapsamında akustik performans irdelemesi için üç ayrı perforasyon oranı tasarlanmış olup sırasıyla %5.5, %8.0 ve %12.6 oranları elde edilecek şekilde levha örneklerinin diğer yüzeyinde ortalama 10 mm derinliğinde delikler açılarak perforeli test örnekleri hazırlanmıştır. Bu forma dönüştürülen levhaların ses yutma özellikleri irdelenmiştir. Delikli perforeli test örnekleri için uygulanabilirlik kesitine bağlı olarak 3 ayrı grup numune hazırlanmıştır. Bunlar; tek bileşenli yalın formda derzli perforeli çimento bağlayıcılı akustik levha (Yalın-I levhası), geotekstil katmanlı iki bileşenli derzli perforeli çimento bağlayıcılı kompozit akustik levha (Geo-II levhası) ve polietilen esaslı kauçuk katmanlı iki bileşenli derzli perforeli çimento bağlayıcılı kompozit akustik levha (PE-II levhası). Her üç grubun ses yutma özelliği referans örneği olarak test edilen düz-dolu yüzey formunda herhangi bir derz ve perfore işlemi yapılmamış elyaf takviyeli çimentolu yalın levha örneği (kontrol levhası) ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, derzli perforeli form kazandırılmış levha örneklerinin perforesiz düz levha formu performansları ile karşılaştırıldığında görüldüğü üzere düz levhanın absorpsiyon özelliği yüksek frekans band değişiminde artış gösterirken, derzli perforeli levhaların absorpsiyon özelliğinin ise düşük frekans bölgelerinde daha etkin absorpsiyon özelliği göstermektedir. Ayrıca, polietilen esaslı kauçuk malzemenin yalıtım katmanı olarak kullanımı, derzli ve perforeli kompozit formda çimento bağlayıcılı akustik levhaların ses azaltma karakteristiğine perforasyon oranına bağlı olarak yüksek emici ve/veya mükemmel emici birer nitelik kazandırmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Çimentolu levha, Derz, Delik, Perforasyon, Akustik, Ses yutma

## The Effect of Perforation Properties on the Use of Fiber Reinforced Cementitious Panels as Grooved Acoustic Panels

### ABSTRACT

Perforated cement boards are used as a sound absorbing material, especially in indoor noise control. In this study, grooves with an average width of 4 mm and a depth of 6 mm were applied from one surface of the panels. Within the scope of the study, three different perforation rates were designed for acoustic performance analysis, and perforated test specimens were prepared by drilling holes with an average depth of 10 mm on the other surface of the plate samples to obtain rates of 5.5%, 8.0% and 12.6%, respectively. The sound absorption properties of the plates converted into this form have been examined. For perforated test specimens, 3 different groups were

prepared depending on the applicability section. These; one-component perforated cement-bonded acoustic sheet in plain form (Yalın-I plate), two-component jointed perforated cement-bonded composite acoustic plate with geotextile (Geo-II plate) and polyethylene-based rubber layered two-component jointed perforated cement-bonded composite acoustic plate (PE-II plate). The sound absorption properties of all three groups were compared with the fiber-reinforced cementitious plain plate specimen (reference plate), which was tested as a reference specimen in the form of a flat-filled surface without any grooves and perforations. According to the results of the study, when the perforated plate performances are compared with the non-perforated flat plate performances, the absorption property of the flat plate shows an increase in the high frequency band change, while the absorption property of the grooved-perforated sheets shows more effective absorption in the low frequency regions. In addition, the use of polyethylene-based rubber material as an insulation layer provides a highly absorbent and/or excellent absorbent quality depending on the perforation rate to the sound reduction characteristics of cement-bonded acoustic plates in grooved and perforated composite form.

*Keywords: Cementitious panel, Groove, Hole, Perforation, Acoustic, Sound absorption*

## **I. GİRİŞ**

Son yıllarda, iç ve dış mekân gürültü kirliliği, özellikle gelişmekte olan ülkelerde küresel bir endişe haline gelmektedir. İnşaat faaliyetleri, trafik ve endüstriyel alanlardan kaynaklanan gürültülerin bu sorunun başlıca nedeni olduğu bilinmektedir. Bu gürültü kirliliğini azaltmak ve/veya önlemek amacıyla birçok araştırma, yöntem, yönetmelik ve farkındalık çalışmaları yapılmaktadır [1],[2]. Kapalı ortamlarda gürültü kontrolünün sağlanması; gürültü kaynağında sesin azaltılması, mekân yüzeylerinin ses yutucu malzemelerle kaplanması ve ses kaynağıyla alıcı arasında belirli bir ses geçirmezlik sağlayan panellerin kullanılmasıyla yapılabilir. İç mekânlarda gürültü düzeyinin azaltılması amacıyla genellikle ses emici malzeme ve elemanlar kullanılmaktadır [3]. Ses emiciler, ses enerjisini ısı enerjisine dönüştürerek yansıyan gürültünün gücünü etkili bir şekilde önleyebilme ve azaltabilme kabiliyetine sahiptirler [4],[5].

Ses kalitesinin ve iç mekândaki ses kaybının önemsendiği ortamlarda duvar, tavan ve tabanda farklı malzemelerden ve farklı tasarımlarda üretilen akustik paneller, bir tür dekorasyon ürünü olarak da kullanılmaktadır. İç mekânlarda kaplama elemanı olarak kullanılan düz yüzeyli levhalar ve/veya sıva yüzeyleri genellikle düşük ve orta frekans düzeylerinde ses soğuruculuk performanslarının oldukça düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Bu tür malzemelerin ses soğurganlık değerlerinin genelde yüksek frekans bölgelerinde etkin olduğu bilinmektedir. İç mekânın akustik niteliğini iyileştirmek için iç mekânı çevreleyen yüzeylerin düşük ve orta frekans düzeylerinde ses yutma özelliklerinin yüksek seviyelerde olmasına da bağlıdır. Bu amaçla, düz yüzeyli bir levhanın ön yüzünden derz açılarak, arka yüzüne de delikler delinerek akustik panel haline getirilir. Bu paneller günümüzde gürültü bariyerleri ve rezonans emiciler gibi birçok gürültü kontrol sisteminde kullanılmaktadır. Düz yüzeyli panelin arka tarafına belirli aks aralıklarıyla deliklerin açılması, ön tarafına da deliklere uygun akslarla derzlerin açılmasıyla panele akustiklik özellik kazandırılabilir. Bu paneller üzerindeki derzlerin sıklığı ve delik sayısı, panelin perforasyon oranını diğer bir deyişle akustiklik özelliğini belirleyen temel faktörlerdendir [6]-[9]. Tipik olarak incelenen konfigürasyonlar, periyodik olarak düzenlenmiş dairesel delikler veya yarıklar ile düz ve sert bir yüzey üzerinde oluşur, ses esas olarak gözeneklerindeki viskoz sürtünme nedeniyle azaltılır. Bir hava boşluğu ve sert bir duvarla desteklendiğinde delikli paneller, ses emilimi açısından rezonans emici ürünleri oluştururlar [4]-[6]. Özellikle bu panellerin arka kısmına uygun kalınlık ve formda ses emici özelliğiyle öne çıkan alternatif malzemelerle katmanlı kompozit bir form kazandırılarak, orta ve yüksek frekans bölgelerinde ses emilim özellikleri iyileştirebilmektedir. Sesin duvara çarptığında rezonansa uğramamasını sağlayan bu dekorasyon ürünleri iç mekânlarda tasarım ürünü olarak da tercihen kullanılmaktadır. Rezonatör ses emici sistemler içerisinde yer alan ve delikli plakların temelini oluşturan Helmholtz rezonatörü en yüksek ses yutma değerini rezonans frekansa yakın frekanslarda oluşturmaktadır. Basit rezonatörlerin boyun kısmına gözenekli veya lifli malzemenin serbest bir şekilde yerleştirilmesi düşük frekanslardaki ses emiliminin geniş bir frekans alanına yayılmasını sağlar. Bunun yanı sıra, rezonans frekansta yutulma etkisinin azalmasına da neden olmaktadır [10],[11]. Sesin kalitesinin önemli olduğu çalışma alanlarında, spor salonlarında,

oditoryumlarda, sinema salonları, toplantı odaları ya da sinema seti kurulmuş evin küçük bir odası bu tür akustik panel kullanım alanları içerisinde sayılabilir. Günümüzde bu amaçla akustik düzenlemelerde en yaygın şekilde ahşap akustik panel kullanımları görülebilmektedir. Ahşap akustik panel alternatifler arasında derzli, delikli, MDFLam, ahşap veya lake boyalı formları görülebilmektedir [12]-[15]. Ancak, elyaf takviyeli çimentolu levhaların günümüzde sıkça kullanılan bir yapı malzemesi olma potansiyeliyle birlikte, akustik özellikleri araştırmacılar tarafından irdelenmeye başlayan yeni bir inceleme konusudur. Bununla birlikte çimentolu levhaların mekanik ve durabilite özelliklerinin yanında ısı ve ses yalıtımı özelliklerinin de irdelenmesi konu üzerinde çalışmalar yapan araştırmacılar tarafından da önerilmektedir [16]. Ayrıca, ahşap levhalara kıyasla elyaf takviyeli çimentolu levhaların darbeye, yanmaya, kötü atmosfer koşullarına, UV ışınlarına ve asidik etkilere karşı daha dayanıklı olması, bu yapı malzemesinin bu tip özelliklerinden de faydalanmak amacıyla ahşap ses yutucu plakalara alternatif olabileceği potansiyeli araştırılma değeridir.

Derzli ve perforeli akustik levhalar, tasarımları itibariyle rezonans soğurucu özellikler taşımaktadır. Pratikte akustik levha tasarımlarında gözenekli soğurucuların kullanıldığı ürünlerde, düşük ila orta frekanslarda büyük ses emilimi değerlerini sağlamak genellikle zordur. Çünkü malzemenin ses emilimi için gerekli olan uygulama kalınlığı büyüktür. Akustik levhanın bu özelliğini geliştirmek amacıyla, ürün formunda rezonans yutucu bir tasarımın oluşturulması ile sağlanabilmektedir. Bu tür uygulamalarda rezonans emicilik amacıyla genellikle Helmholtz emicinin tasarım olarak oluşturulması önem kazanmaktadır. Rezonans emiciler, akustik enerjiyi yapı titreşimi ile dağıtma prensibi ile çalışır ve genellikle yalnızca dar ayarlanabilir düşük frekans bandında etkili olmaktadır [17]-[20]. Diğer tür alternatif ses emicilerden örneğin gözenekli emiciler ise, orta ila yüksek frekans arasındaki geniş bant için etkili oldukları bilinmektedir.

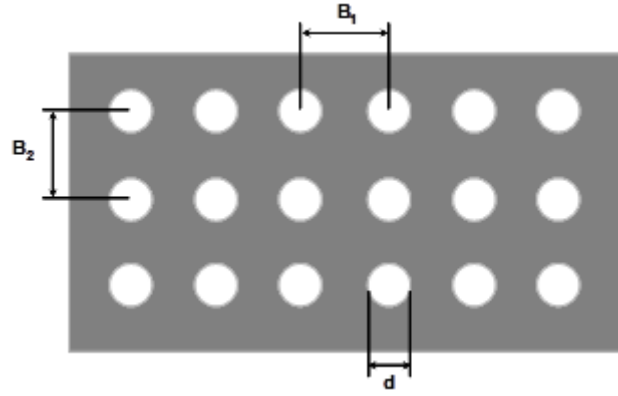
Bu makale, derzli ve perforeli tasarıma sahip elyaf takviyeli çimentolu levhaların akustik özelliklerini tecrübe etmek amacıyla basitleştirilmiş alternatif model örnekler üzerinde yapılan incelemeler ile irdelenmiştir. Özellikle akustik levha tasarımında üç ayrı perforasyon oranında oluşturulmuş elyaf takviyeli çimentolu akustik levha örneklerinin geotekstil keçe ve polietilen esaslı kauçuk ses emici alternatif malzemeler ile desteklenmesi sonucu elde edilen akustik performansları analiz edilmiş ve teknik bulgular karşılaştırmalı tartışılmıştır.

## **II. MATERYAL VE METOT**

Bu çalışma kapsamında delikli akustik panel örneği elde etmek amacıyla 16 mm kalınlıkta ve 1340 kg/m<sup>3</sup> birim hacim kütle değerinde düz levha formatında elyaf takviyeli çimentolu levhalar normal piyasa koşullarından tedarik edilmiştir. Düz levha formatındaki levha örneklerinden dikdörtgen geometrik kesitli 5 adet levha örneği, akustik performansın ölçümü için kontrol örnekleri olarak hazırlanmıştır. Bununla birlikte kontrol paneli örneğine eşdeğer boyutlarda her bir perforasyon oranında 15 adet olmak üzere toplamda 45 ayrı plaka örneği de perforasyon işlemleri için hazırlanmıştır. Düz levha örneklerinin delikli akustik panel örneği formuna dönüşümü için öncelikle plakaların bir yüzeyinden ortalama 4 mm genişliğinde ve 6 mm derinliğinde oluklar (yarıklar) açılarak bir yüzü oluklu ve derzli form kazandırılmıştır. Çalışma kapsamında akustik performans irdelenmesi için üç ayrı perforasyon oranı tasarlanmış olup sırasıyla %5.5, %8.0 ve %12.6 oranları elde edilecek şekilde levha örneklerinin diğer yüzeyinde ortalama 10 mm derinliğinde delikler açılarak perforeli test örnekleri hazırlanmıştır. Perforasyon oranı (Pr) Eşitlik 1'de belirtilen hesaplama ile tanımlanmış olup [8],[11],[21], geometrik uygulama prensibi ise sembolik olarak Şekil 1'de gösterilmiştir.

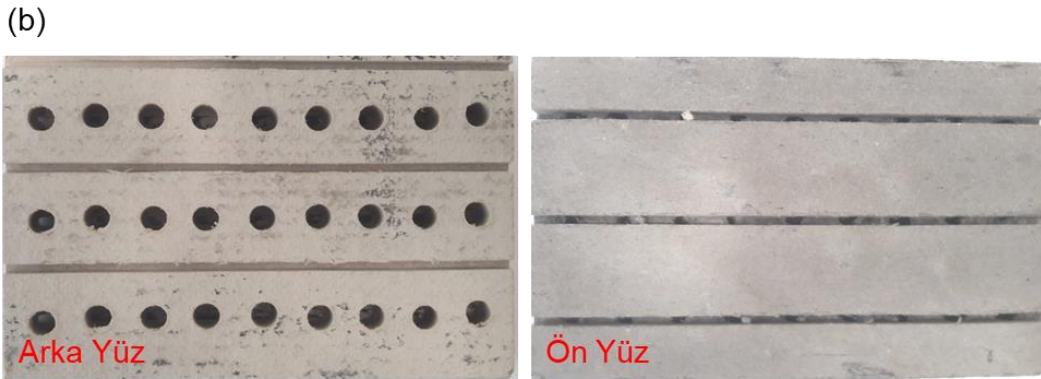
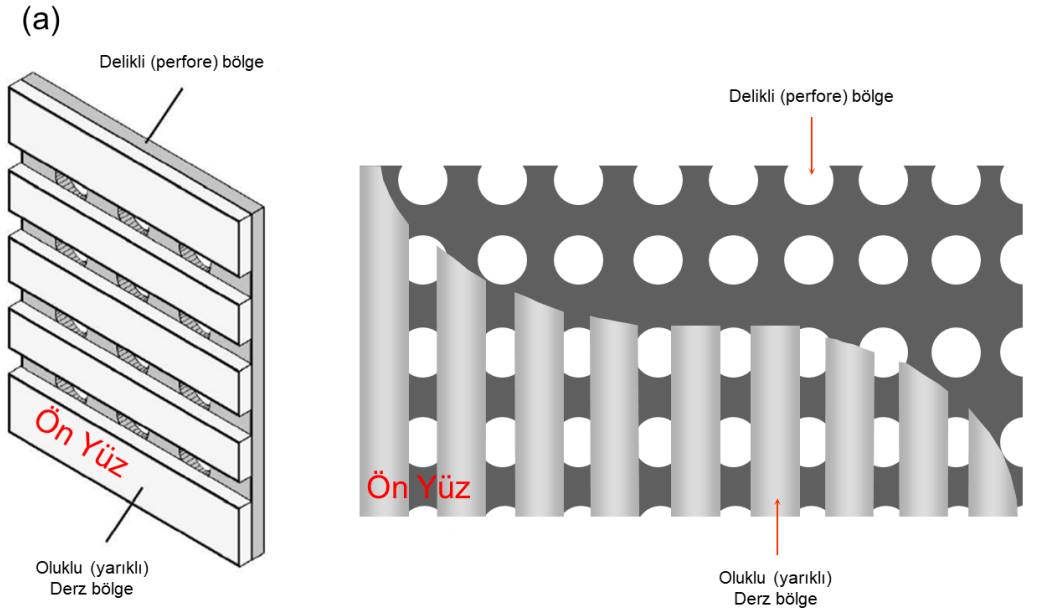
$$Pr = \frac{\pi}{4} \times \frac{d^2}{B_1 \times B_2} \times 100 \quad (1)$$

Burada; Pr, yüzde perforasyon oranı; B<sub>1</sub>, delik merkezleri arası yatay mesafe (mm); B<sub>2</sub>, delik merkezleri arası düşey mesafe (mm); d, delik çapı (mm) olarak gösterilmektedir.



Şekil 1. Perforasyon işleminde delik formu genel görünümü.

Levha örneklerinin her iki yüzünden delik delme ve derz oluşturma işlemleri sonrasında test örnekleri başlıca 2 ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar: Delikli (perfore) bölge ve Oluklu-Derz (yarıklı) bölge. Perforasyon ve oluk açma işlemleri sonrası levha formu ve genel görünümü Şekil 2’de gösterilmiştir. Ayrıca, kontrol levhasının görünümü de Şekil 3’de verilmiştir.

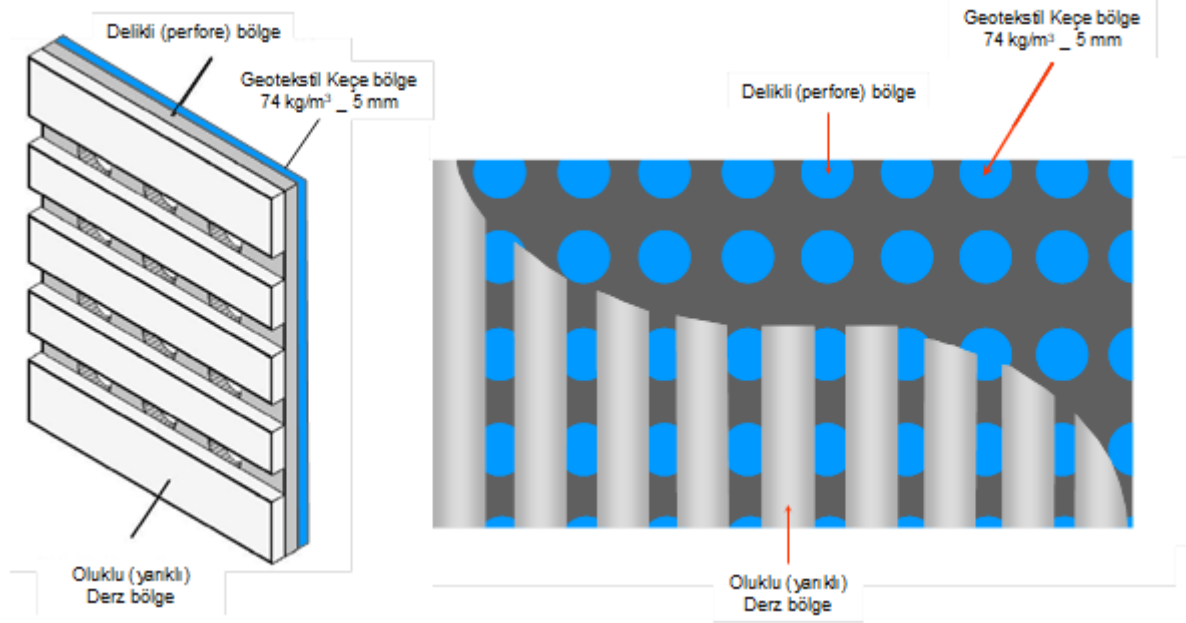


**Şekil 2.** Derzli-delikli akustik levha örneklerinin perforasyon formu genel görünümü (a), elyaf takviyeli çimentolu akustik levha örneklerinin genel görünümü (b).



**Şekil 3.** Kontrol levhansın genel yüzey görünümü..

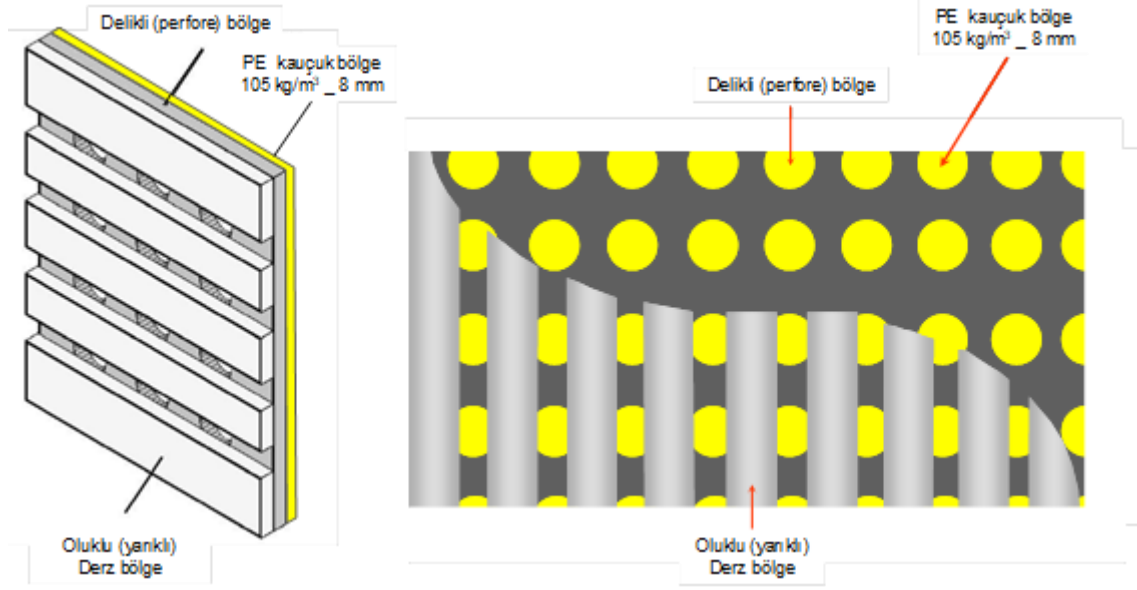
Delikli perforeli test örnekleri için uygulanabilirlik kesitine bağlı olarak 3 ayrı grup numune hazırlanmıştır. Bunlar; a) Tek bileşenli yalın formda derzli perforeli çimento bağlayıcılı akustik levha. b) Geotekstil katmanlı iki bileşenli derzli perforeli çimento bağlayıcılı kompozit akustik levha. c) Polietilen esaslı kauçuk katmanlı iki bileşenli derzli perforeli çimento bağlayıcılı kompozit akustik levha. Geotekstil katman olarak ortalama birim hacim kütlesi  $74 \text{ kg/m}^3$  ve 5 mm kalınlıkta geotekstil keçe normal piyasa koşullarından tedarik edilerek kullanılmıştır. Geotekstil keçe, sentetik elyafların iğneleme yöntemi ile mekanik olarak bağlanması sonucu oluşan, dayanıklı, esnek, kolay uygulanabilir dokumasız kumaş (nonwoven) yapısıdır. Geotekstil keçenin matris yapısında yer alan elyaflar, örgü şeklinde işlenmemiş formdadır. Bu keçeler inşaat uygulamalarında yalıtım amaçlı sıklıkla kullanılmakta olup, sentetik elyaflardan oluştuğu için çürümeye karşı da yüksek dayanım özelliği göstermektedir. Geo-II levha örneklerinin formu ve genel görünümü Şekil 4'te sembolik olarak gösterilmiştir.



**Şekil 4.** Geotekstil katmanlı derzli perforeli akustik levha perforasyon formu genel görünümü.

Bir diğer grup PE-II levha örneklerinde ise, ortalama birim hacim kütlesi  $105 \text{ kg/m}^3$  ve 8 mm kalınlıkta PE esaslı kauçuk malzeme normal piyasa koşullarından tedarik edilerek kullanılmıştır. Bu katman, PE esaslı kauçuk formunda imal edilen, çapraz bağlı kapalı amorf formda iç hücelere ve çapraz bağlı açık ve amorf formda yüzey hücelere sahip olan, su ve nemden etkilenmeyen ses yalıtımı amaçlı kullanılan

bir malzemedir. PE-II levha örneklerinin formu ve genel görünümü Şekil 5'te sembolik olarak gösterilmiştir.



**Şekil 5.** PE esaslı kauçuk katmanlı derzli perforeli akustik levha perforasyon formu genel görünümü.

Bir oktav bandı, bir oktavı kapsayan bir frekans bandıdır. Tüm frekans aralığı, bant adı verilen frekans kümelerine bölünmüştür. Her bant belirli bir frekans aralığını kapsar. Bu nedenle, oktav bantları ve üçte bir oktav bantları ölçeği geliştirilmiştir. Üst bant frekansı, alt bant frekansının iki katı olduğunda, bir bantın genişliğinin bir oktav olduğu söylenir. İnsan işitme oktav bantları aynı şekilde gelişmiştir: İnsanların sesleri işitme aralığı 20 – 20,000 Hz aralığında 11 oktav bandına bölünmüştür. Her bir bant bir önceki bantın frekans aralığını 2 katına çıkarır. Bunlara 1/1 oktav bandı denir. İnsanların frekansları ayırt etme şeklini daha da iyi anlamak için, her 1/1 oktav bandı üç alt banda ayrılmıştır. Bunlara 1/3 oktav bant denir. Bu daha küçük oktav bantları, insanların frekanslar arasındaki farkı nasıl ayırt ettiğini daha yakından temsil eder. Akustik çimentolu levha örneklerinin ses yutma performanslarının belirlenmesi amacıyla 1/3 oktav bandında 63 Hz – 6300 Hz aralığında ses yutma katsayısı “ $\alpha$ ” değerlerinin belirlenmesi üzerine bir dizi analizler yapılmıştır. Öz ve Köse [22] gürültü önleyici akustik malzemelerin performanslarının incelemesinde, malzemelerin ses absorbe etme yeteneğinin minimum frekansta 100 Hz, maksimum frekansta ise 6300 Hz’de etkili olduğu belirlemiştir. Keskin ve Yılmaz [23] kompozitlerin ses yutma performanslarını inceledikleri çalışmada da 1/3 oktav bandını kullanmışlardır. Ayrıca, elde edilen ses yutma katsayısı değerlerinden ASTM C423 standardında öngörülen Gürültü Azaltma Katsayısı (NRC) değeri 250, 500, 1000 ve 2000 Hz frekanslarındaki ses yutma katsayılarının ortalaması olarak hesaplanmıştır (Eşitlik 2) [24].

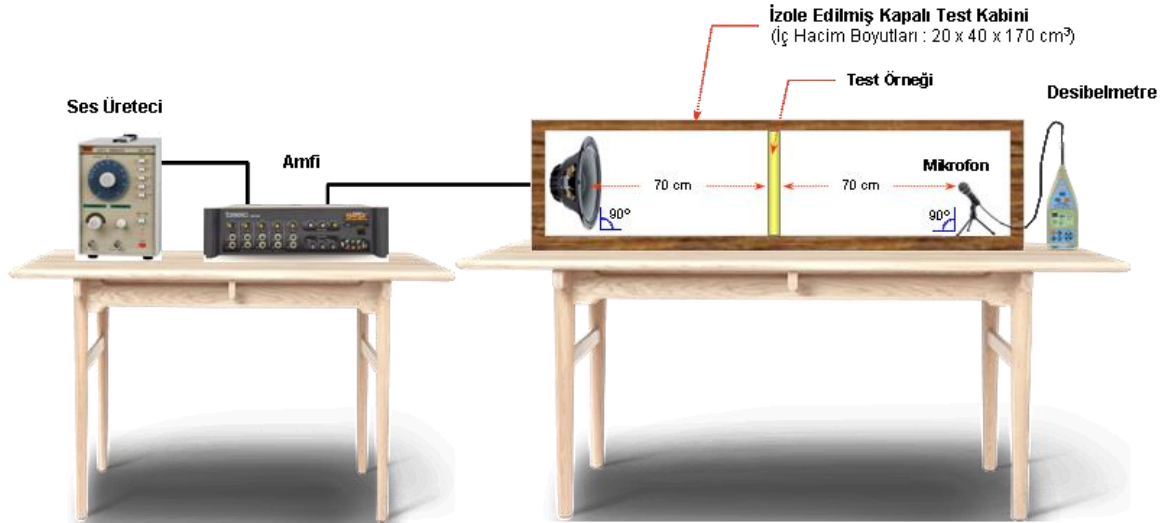
$$NRC = \frac{\alpha_{250\text{ Hz}} + \alpha_{500\text{ Hz}} + \alpha_{1000\text{ Hz}} + \alpha_{2000\text{ Hz}}}{4} \quad (2)$$

NRC derecelendirmeleri 0 ila 1 arasında değişen bir büyüklüğe sahiptir. NRC=0 değeri, mükemmel yansıtıcı malzeme özelliğini temsil eder. NRC=1 değeri ise mükemmel emici malzeme özelliğini temsil eder. NRC derecelendirmeleri, ses yutucu bir malzemeyle temas eden ve iç mekâna geri yansıtılmayan sesin yüzdesi olarak yorumlanabilmektedir. Örneğin, NRC=0.70’lik bir Gürültü Azaltma Katsayısı, ses dalgalarının %70’inin malzeme tarafından emildiğini, %30’lük kısmının ise yansıtıldığını gösterir. Malzemeler absorpsiyon davranışlarına göre sınıflandırılabilir. DIN EN ISO 11654 [25] standardında göre malzemelerin ses yutma katsayısı ( $\alpha$ ) ve NRC değerleri için altı farklı emicilik sınıfı belirlenmiştir (Tablo 1).

**Tablo 1.** TS EN ISO 11654'e göre ses emicilik sınıfları.

Ses emicilik kategorisi	$\alpha$	Ses emicilik sınıfı	NRC
A	0.90; 0.95; 1.00	Son derece emici	$NRC \geq 0.75$
B	0.80; 0.85	Son derece emici	$NRC \geq 0.75$
C	0.60; 0.65; 0.70; 0.75	Yüksek emici	$0.5 \leq NRC \leq 0.75$
D	0.30; 0.35; 0.40; 0.45; 0.50; 0.55	Emici	$0.5 \leq NRC \leq 0.75$
E	0.15; 0.20; 0.25	Düşük emici	$0.25 \leq NRC \leq 0.5$
Sınıflandırılmamış	0.05; 0.10	Yansıtıcı	$NRC \leq 0.25$

Örneklerin ses yutma katsayısı “desibel düşüşü” yöntemi ile hesaplanmıştır [26,27]. Bu yaklaşımda, iç hacim boyutu  $20 \times 40 \times 170 \text{ cm}^3$  (genişlik x yükseklik x uzunluk) olan izole edilmiş bir ses kabini oluşturulmuştur. Bu test kabini içerisinde kabini iki eşit hacim oluşacak şekilde ayıran bir bölme birimi yer almaktadır. Bu bölme birimi üzerinde ses ölçümü yapılacak malzemenin yerleştirilmesi için uygun açıklıkta bir boş alan yer almaktadır. Kabinin bir tarafında ses kaynağı (hoparlör), diğer tarafında ise ses analizörü bulunmaktadır. Hoparlör ve mikrofon, test numunesi yüzeyine 70'şer cm mesafede ve pozisyonları numune yüzeyine 90 derece açıda olacak şekilde test kabini içerisinde konumlandırılmıştır. Testlerin uygulanmasında hoparlör ve mikrofonun konum ve açıları bozulmadan bölme biriminde yalnızca test numunesi değiştirilerek ölçümler yapılmıştır. Ses ölçümü için uygulanan ölçüm düzeneğinin sembolik görünümü Şekil 6'da gösterilmiştir.



**Şekil 6.** Ses ölçüm düzeneğinin sembolik görünümü.

Şekil 6'da gösterilen test düzeneği ASTM C423 standardında öngörülen ve en az  $125 \text{ m}^3$  hacme sahip bir yankı odası gerekliliğinden farklı bir tasarıma sahiptir. Bu çalışmada, ASTM C423 ve TS EN ISO 11654 standartlarında öngörülen bazı formülasyonlar ve kriterler kullanılarak ilk defa yeni ve pratik bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Tablo 1'de TS EN ISO 11654 standartlarında öngörülen bazı limit değerleri verilmektedir. Çalışmada kullanılan yeni tasarım ses ölçüm düzeneği ile elde edilen bulguların ölçüm düzeneğinin farklı olması sebebiyle Tablo 1'deki limit değerlerle ifade edilmesinin tam olarak doğru sonucu ifade edememe olasılığı ile birlikte, sonuçların yorumlanmasında kolaylık sağlayacağı ve üretilen örnekler arasında daha doğru karşılaştırma yapılabilmesi açısından değerlendirilmektedir.

Bu ölçüm düzeneğinde gerçekleştirilen tüm ölçümler, dış cidarları tamamıyla ses soğurucu bir malzeme ile kaplanmış olan kapalı bir test kabini ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde genellikle şu temel ölçüm parametrelerinden oluşmaktadır:

- Bir adet Fonksiyon (sinyal) Üretici,

Ses – sinyal üretici olarak GAG-809/810 model “Ses Sinyal Üretici” cihazı kullanılmıştır. Cihaz, 10 Hz’den 1 MHz değerine kadar sinyal üretebilme kabiliyetine sahiptir. Ölçümler, 0.5 dB hassasiyette, gürültü faktörü maksimum %5 olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. GAG-809/810 model “Ses Sinyal Üretici” cihazı ile sinüs dalga formu işaret olarak kullanılmıştır. Bu bağlamda, amfi ve hoparlör sistemi de, sinüs dalga için gerekli olan çıkış değerini sağlayacak şekilde optimize edilmiştir. Cihazın çıkış empedansı 600  $\Omega$ ’dur.

- Giriş sinyal genliklerinin daha büyük genlikli sinyallere yükseltilmesini sağlayan bir amplifikatör (amfi),

Ses yükselteci olarak, SONORA Marka mono amfi kullanılmıştır. Amfi 600  $\Omega$ ’luk mikrofon girişinin 5V rms sinüs ile sürülmesiyle, 4 $\Omega$  empedanslı hoparlöre maksimum 60W ses gücü verebilmektedir. Deney esnasında kullanılan genlik seviyesi maksimum 30W büyüklüğünde tutulmuştur.

- Amfiden alınan enerjiyi ses enerjisine dönüştüren transdüser olarak ölçüm odasının ilk bölme tarafına yerleştirilen bir adet hoparlör.

16cm çapında ve 4 $\Omega$  empedanslı “Two-way PW-1615 TW PROWEST” hoparlör kullanılmıştır. Kullanılan hoparlörün maksimum çıkış gücü 150 Watt/4  $\Omega$ ’dur. Hoparlör irtibatı için 2x2,5 mm<sup>2</sup> TTR özellikli kablo kullanılmıştır.

- Numuneden iletilen sesin seviyesini belirlemek amacıyla bir mikrofon+ kabin dışında yerleştirilen bir ses seviyesi ölçer (desibel metre).

Mikrofon kullanabilme özelliğine sahip ses seviyesi ölçer olarak 8921 model dijital dB metre kullanılmıştır. Cihaz portatif kullanıma uygun olarak tasarlanmış bir cihazdır. Cihaz üzerinden değerlerin okunması LCD ekrandan sayısal olarak yapılmaktadır. Kullanılan cihaz ile 30 – 130 dB ses şiddeti seviyesi aralığında, 0.1 dB çözünürlük ile ölçüm yapılabilmektedir. Ölçüm esnasında, özel kondanser mikrofon ses kaynağına doğru yönlendirilmektedir.

Ses ölçümlerinde, öncelikle ses kaynağı ölçümü yapılacak önceden belirlenmiş bir frekansa ayarlanarak aktif hale getirilir. Daha sonra kabinin diğer bölümündeki ses analizörü ile açıklıktan gelen ses basınç seviyesi (SBS) desibel (dB) cinsinden bu frekans değerindeki referans fon ölçüm değeri ( $R_{i,ref}$ ) olarak kaydedilir. Çalışma kapsamında frekans değişimlerine bağlı referans fon ölçüm değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Sonrasında, hazırlanmış test örneği ara bölmede oluşturulmuş boşluk alana ses sızdırmaz bir konumda yerleştirilir ve ses kaynağı fon ölçümünde kullanılmış eşdeğer frekans değerinde tekrar çalıştırılır. Test örneğinin bu frekans değerindeki test fon ölçüm değeri ( $R_{i,test}$ ) olarak kaydedilir. Referans fon ölçüm değeri ile test fon ölçüm değeri arasındaki ses basınç seviyesi farkı, ölçümü yapılan bu frekans değeri için Desibel Düşüşü ( $\Delta R$ ) olarak tanımlanır. Desibel düşüşü ( $\Delta R = R_{i,ref} - R_{i,test}$ ) dB cinsinden hesaplanır. Belirlenen desibel düşüş değeri, Eşitlik 3 ve 4’de belirtilen [26,27] ampirik formül ile test örneğinin bu frekans değerindeki ses yutma katsayısı olarak hesaplanır. Bu yaklaşıma göre hesaplanan değer, bu çalışma kapsamında test örneğinin ses yutum katsayısı ( $\alpha$ ) olarak tanımlanmıştır.

$$\alpha = 1 - 10^{-\frac{\Delta R}{20}} \quad (3)$$

$$\alpha = 1 - 10^{-\frac{R_{i,ref} - R_{i,test}}{20}} \quad (4)$$

Burada;  $\alpha$ , test örneğinin ses yutum (azaltma) katsayısı;  $\Delta R$ , iki fon ölçümü arasındaki desibel düşüş değerini (dB) göstermektedir.

**Tablo 2.** Frekans değerlerine bağlı referans ölçüm değerleri ( $R_{i,ref}$ ).

Frekans (Hz)	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630
$R_{i,ref}$ (dB)	90.8	90.0	90.6	93.9	98.6	99.4	98.7	95.6	92.2	88.7	86.6

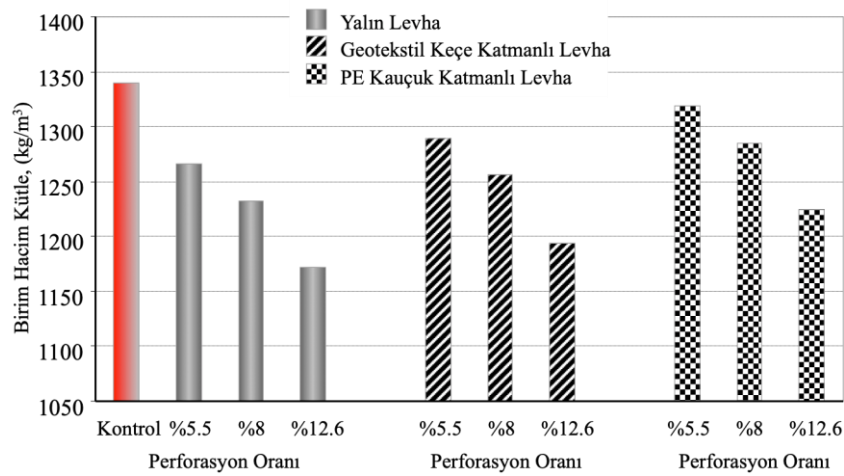


<b>Frekans (Hz)</b>	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
<b>R<sub>i,ref</sub> (dB)</b>	85.3	88.2	87.1	85.5	83.8	83.4	82.6	82.4	81.8	81.3

## **II. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA**

### **A. PERFORASYON ORANININ BİRİM HACİM KÜTLE DEĞERİNE ETKİSİ**

Düz-dolu yüzey formunda herhangi bir derz ve perfore işlemi yapılmamış elyaf takviyeli çimentolu yalın levha örneğinin (kontrol levhası) birim hacim kütle değeri  $1340 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Bu levha örneğine ait teknik bulgular bu çalışma kapsamında referans analiz değerleri olarak irdelenmiştir. Perforasyon ve derz işlemi yapılmış diğer tüm örneklerin birim hacim kütle değerleri Şekil 7'de verilmiştir.



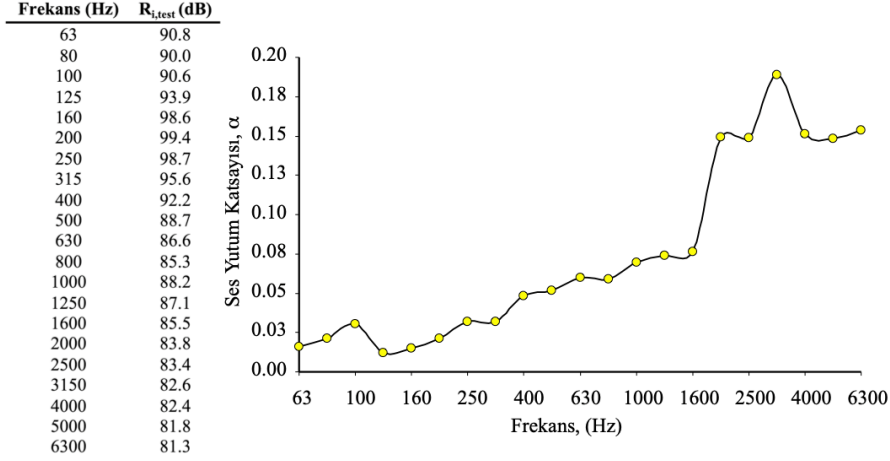
*Şekil 7. Derzli perforeli akustik levha örneklerinin birim hacim kütle değerleri.*

Perforasyon işlemi uygulanmış akustik levha örneklerinin birim hacim kütle değerleri  $1172 \text{ kg/m}^3$ – $1266 \text{ kg/m}^3$  aralığında değişmektedir. Perforasyon oranı arttıkça levha örneğinin birim hacim kütle değeri düşmektedir. Diğer bir değişle levha üzerinde oluşturan derz yarık-oluk boşlukları ve açılan delikler sebebiyle göreceli olarak daha hafif bir form kazanmaktadır. Benzer olgu Geo-II levha örneklerinde de görülmektedir. Levha örneklerinin birim hacim kütle değerleri, perforasyon oranına bağlı olarak  $1194 \text{ kg/m}^3$ – $1289 \text{ kg/m}^3$  aralığında değişmektedir. Yalın formdaki kontrol levha örneğinin değerine kıyasla, %3.8 - %10.9 oranlarında hafiflemektedir. Ses yalıtım katmanı olarak PE esaslı kauçuk malzemenin kullanılmış olduğu örneklerde ise birim hacim kütle değerleri, perforasyon oranına bağlı olarak  $1224 \text{ kg/m}^3$  –  $1319 \text{ kg/m}^3$  aralığında değişmektedir. Yalın formdaki kontrol levha örneğinin değerine kıyasla, %1.6 - %8.7 oranında daha düşük birim hacim kütle değerlerine sahiptir.

### **B. YALITIM KATMANSIZ LEVHALARIN SES YUTUM ÖZELLİKLERİ PERFORASYON**

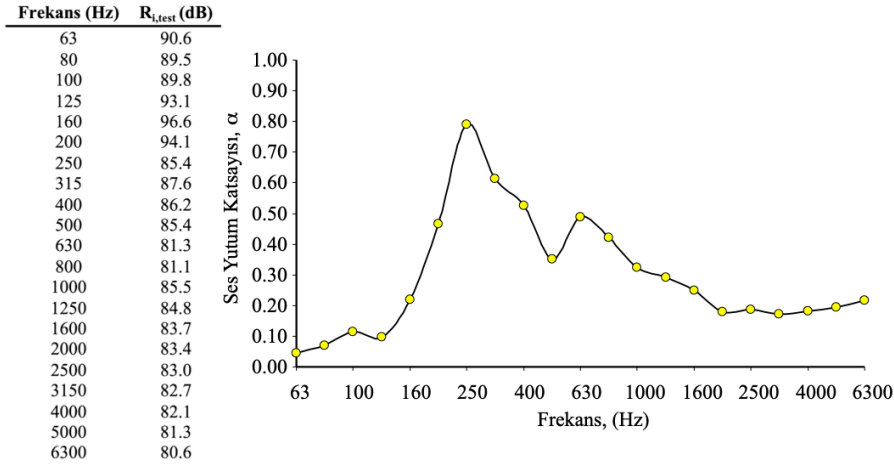
Tek bileşenli yalın düz formda derzsiz perforesiz çimento bağlayıcılı akustik levha örneklerinin (kontrol levhası) 1/3 oktav bandında 63 Hz – 6300 Hz frekans aralığında ses yutum katsayısı (absorpsiyon katsayısı) değişimi Şekil 8'de verilmiştir. Düz yüzeyli perforesiz örneklerin artan frekans değişiminde ses yutum katsayısı değerinin göreceli olarak arttığı görülmektedir. Düşük frekans bölgelerinde ses yutum katsayısı 0.02 – 0.05 aralığında değişmekte, yüksek frekans bölgelerinde ise ses yutum katsayısı 0.08 – 0.19 aralığındadır. Akustik levha örneğinin absorpsiyon katsayısı 2500 Hz ile 4000 Hz frekans aralığında 3150 Hz'de tepe noktasını oluşturmuş olup,  $\alpha=0.19$ 'a ulaşmıştır. Görüldüğü gibi, ses yutma eğilimindeki artış noktaları yüksek frekans bölgesinde yoğunlaşmaktadır. Frekans değeri arttıkça, malzemenin ses yutum özelliğinin geliştiği görülmektedir. Gürültü Azaltma Katsayısı (NRC), ortalama değer bağlamında bir absorpsiyon katsayısını temsil etmektedir. Bu katsayının özellikleri, frekans

değişimine bağlı ses yutma katsayısının tepe değeri ve genişliğinden etkilenir. 1/3 oktav bandı 250, 500, 1000 ve 2000 Hz frekansları baz alınarak ASTM C423 standardında [24] öngörülen Gürültü Azaltma Katsayısı  $NRC=0.08$  olarak hesaplanmıştır. DIN EN ISO 11654 standardında [25] öngörülen ses emici sınıfına göre “sınıflandırılmamış” kategoride yer almaktadır. Diğer taraftan, NRC değerine göre ses soğurma derecelendirmesinde [28]  $NRC<0.25$  olan malzemeler, “yansıtıcı” özellikteki malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Bu bağlamda, tek bileşenli kontrol levhası örnekleri çok düşük NRC değerleri sebebiyle “mükemmel yansıtıcı” nitelikte bir malzeme olarak irdelenebileceği görülmektedir.

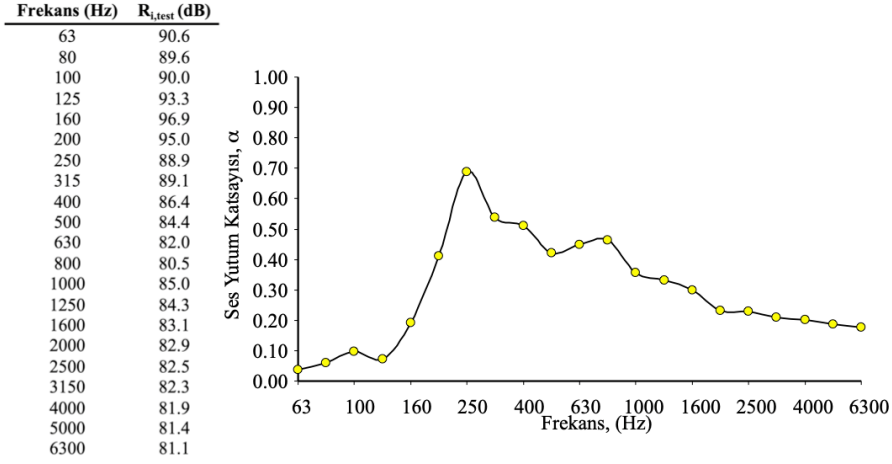


Şekil 8. Kontrol levhası örneklerinin ses yutum katsayısı analizi (derzsiz perforesiz).

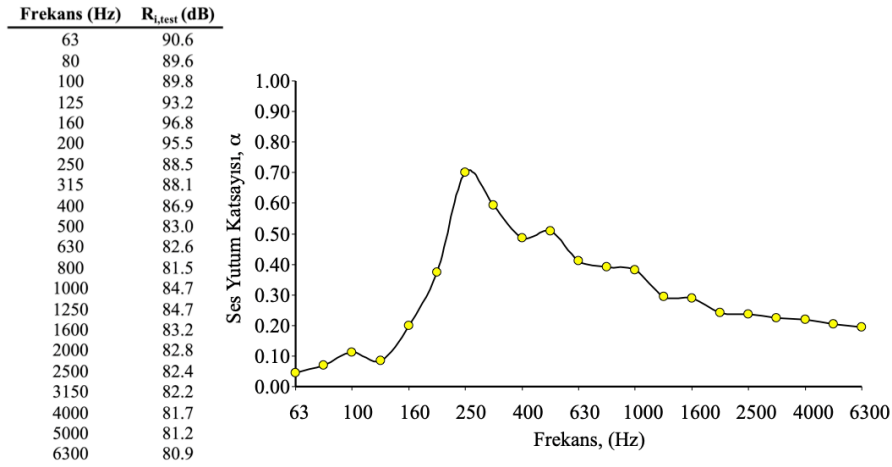
Diğer bir grup örnekte ise, Yalın-I levhası örneklerinin ses yutum katsayısı değerleri 3 ayrı perforasyon oranında hazırlanarak analiz edilmiştir. Oluşturan perforasyon oranları sırasıyla %5.5, %8.0 ve %12.6’dır. Yalın-I levhası örneklerinin 1/3 oktav bandında 63 Hz – 6300 Hz frekans aralığında ses yutum katsayısı değişimi Şekil 9-Şekil 11’de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 9. Derzli perforeli akustik levha örneklerinin frekans- ses yutum katsayısı ilişkisi (Perforasyon: %5.5).



Şekil 10. Derzli perforeli akustik levha örneklerinin frekans- ses yutum katsayısı ilişkisi (Perforasyon: %8).



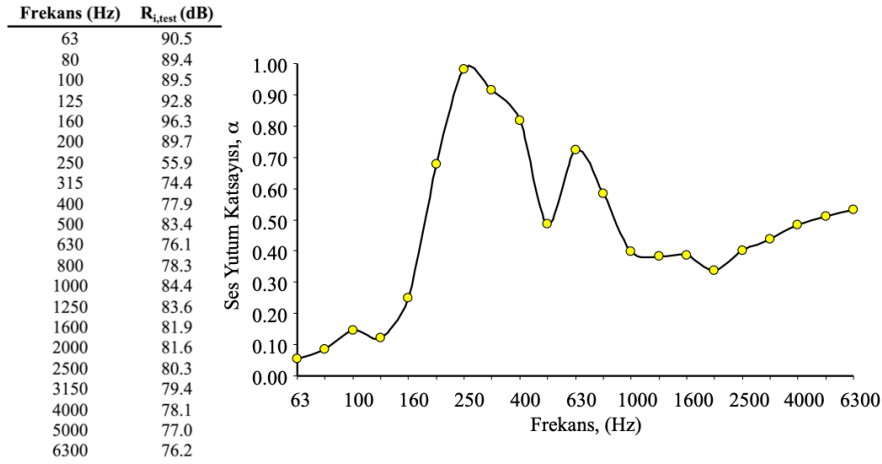
Şekil 11. Derzli perforeli akustik levha örneklerinin frekans- ses yutum katsayısı ilişkisi (Perforasyon: %12.6).

Perforasyon oranlarına göre levhaların 1/3 oktav bandında 63 Hz – 6300 Hz frekans aralığında ses yutum katsayısı değişimindeki eğilimin, bu levha örneklerinin derzsiz, deliksiz ve oluksuz (kontrol levhası) formundan farklı bir karakteristik sergilemektedir. Her bir perforasyon oranında absorpsiyon katsayıları arasındaki ortak eğilim, 63 Hz ile 250 Hz düşük frekans bölgesi aralığında artan frekans değerine göre absorpsiyon katsayısı değeri artmaktadır. %5.5 perforasyon oranında absorpsiyon özelliği 250 Hz’de tepe noktasına ulaşarak  $\alpha = 0.79$ ’dur (Şekil 9). Benzer eğilim, %8 ve %12.6 perforasyon oranlarında absorpsiyon özelliği 250 Hz’de tepe noktasına ulaşarak sırasıyla  $\alpha = 0.69$  ve  $\alpha = 0.70$ ’dir. 250 Hz frekans değerinden sonraki artan tüm frekans değerlerinde tüm perforasyon oranlarında absorpsiyon özelliğinin lineer kabul edilebilecek bir eğilimle azalma göstermektedir. Bu değişim karakteristiği %5.5 perforasyon oranında 315 Hz-6300 Hz geniş band aralığında  $\alpha = 0.61$ ’den  $\alpha = 0.22$  değerine kadar azalmaktadır. Benzer şekilde, %8 perforasyon oranında 315 Hz-6300 Hz geniş band aralığında  $\alpha = 0.54$ ’den  $\alpha = 0.18$ ’e (Şekil 10), %12.6 perforasyon oranında ise eşdeğer band aralığında  $\alpha = 0.59$ ’den  $\alpha = 0.19$  değerine kadar düşmektedir (Şekil 11). Bu düşüş, orta düzey ve yüksek düzey frekans geniş band aralığında akustik levhanın ses soğurganlık özelliğinin azaldığını temsil eder. Derzli perforeli form kazandırılmış levha örneklerinin perforesiz düz levha formu performansları ile karşılaştırıldığında görüldüğü üzere düz levhanın absorpsiyon özelliği yüksek frekans band değişiminde artış gösterirken, derzli perforeli levhaların absorpsiyon özelliğinin ise düşük frekans bölgelerinde daha etkin absorpsiyon özelliği göstermektedir. Diğer bir değişle, derz açma ve perforasyon işlemiyle birlikte düz ve dolu yüzeyli levhalara düşük frekans bölgelerinde daha yüksek ses yutma özelliği kazandırılabilir. Bununla birlikte, yüksek frekans bölgelerinde perforeli levhanın düz formuna göre görece daha yüksek bir  $\alpha$  değerine de sahip olduğu görülmektedir.

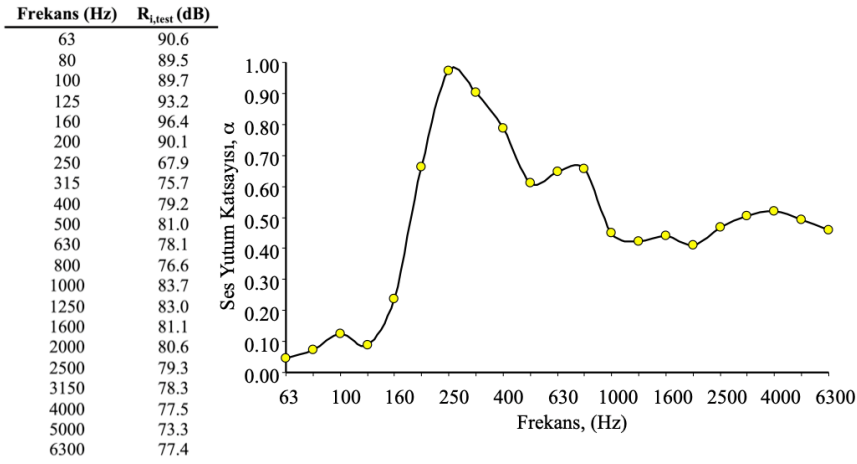
1/3 oktav bandı 250, 500, 1000 ve 2000 Hz frekansları baz alınarak %5.5 perforasyon oranında levhanın gürültü azaltma katsayısı  $NRC=0.41$ 'dir. %5.5 perforasyonlu levha bu frekans bant aralığında %41 ses emilimi özelliğine sahip olup, %59 oranında ise sesi yansıtması anlamını taşır. Diğer bir deyişle, ortamda yer alan bu frekanslardaki sesin yarısından fazlasını iç mekâna yansıtarak yankı oluşumuna sebep olabilir. %8 perforasyon oranında  $NRC=0.42$ 'e yükselmekte olup, %12.6 perforasyon oranında ise  $NRC=0.46$ 'ya ulaşmaktadır. %12.6'lık perforasyon ile en düşük perforasyon oranına göre ancak %5 daha fazla ses emilimi sağlanabilecektir. Görüldüğü gibi, derzli ve perforasyon sonrası akustik levha formunun kontrol levhasına göre önemli bir NRC değeri artışı elde edilmektedir. Ses emisyon sınıfı değerlendirmesine [28] göre "E" kategorisinde yer almaktadır. NRC değerine göre ses soğurma derecelendirmesinde  $0.25 \leq NRC \leq 0.50$  olan malzemeler, "düşük emici" özellikteki malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Bu bağlamda, Yalın-I levhası örnekleri, "düşük emici" özellik kazanmaktadır. Diğer bir deyişle, levhanın derzli ve perforeli formu, kontrol levhasına kıyasla "yansıtıcı" özellikten "düşük emici" özelliğe gelişim göstermiştir.

### C. YALITIM KATMANLI LEVHALARIN SES YUTUM ÖZELLİKLERİ

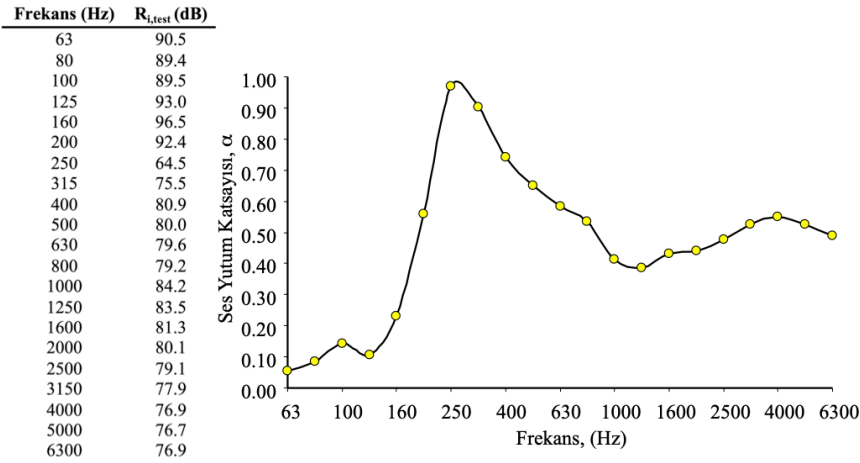
Yalın-I levhası test örneklerinin ses absorpsiyon özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla 2 ayrı malzeme türü (Geotekstil keçe ve PE esaslı kauçuk), alternatif yalıtım katmanları olarak kullanılmış ve iki bileşenli kompozit formda çimento bağlayıcılı akustik levha örnekleri elde edilmiştir. Yalıtım amaçlı uygulanan ilk alternatif malzeme birim hacim kütlesi  $74 \text{ kg/m}^3$  ve 5 mm kalınlıkta geotekstil keçedir. Geo-II levhası örneklerinin ses yutum katsayısı değerleri sırasıyla %5.5, %8.0 ve %12.6 olan 3 ayrı perforasyon oranında analiz edilmiştir. 1/3 oktav bandında 63 Hz – 6300 Hz frekans aralığında ses yutum katsayısı değişimi Şekil 12-Şekil 14'te sırasıyla verilmiştir.



Şekil 12. Geotekstil keçe katmanlı örneklerin frekans - ses yutum katsayısı ilişkisi (Perforasyon oranı:%5.5).



Şekil 13. Geotekstil keçe katmanlı örneklerin frekans - ses yutum katsayı ilişkisi (Perforasyon oranı:%8).



Şekil 14. Geotekstil keçe katmanlı örneklerin frekans - ses yutum katsayı ilişkisi (Perforasyon oranı:%12.6).

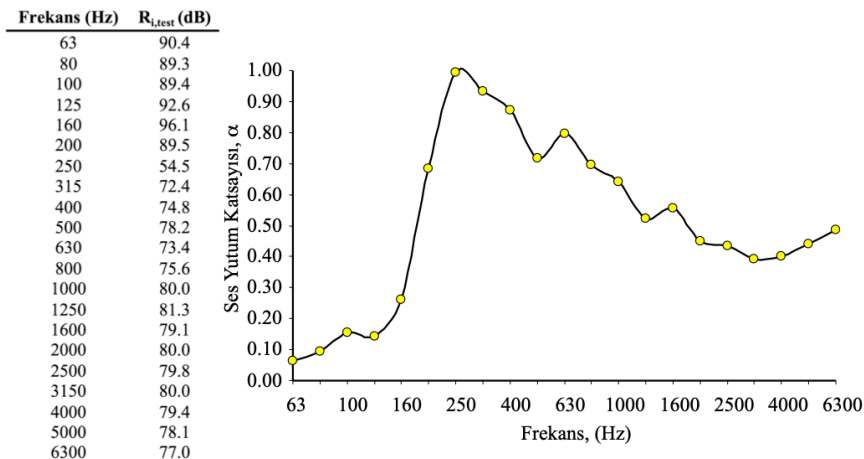
Geotekstil yalıtım katmanı, derzli ve perforeli levha örneklerinin ses yutma özelliklerinin genel karakteristik formunu değiştirmemekle birlikte, yalıtım katmanı kompozit formdaki levhanın ses yutma katsayı değerlerini artırmıştır. Yalın-I levha örneğinin ses yutma performans değişimine benzer şekilde, Geo-II levha örneklerinde de düşük frekans bölgesi 63 Hz ile 250 Hz aralığında frekansa bağlı absorpsiyon katsayı değeri artmaktadır. Ancak, Geo-II levha örneklerinin frekans değişimine bağlı fon ölçüm değerlerinde özellikle 160 Hz ile 315 Hz aralığında rezonans bölgesinin etkinlik kazanması sebebiyle fon ölçüm verilerinde bazı sapmaların olabildiği gözlenmiştir. Bu sapmaların oluşumunda deney örneğinin geometrik formu ve kompozit kesitli karakteristiğinin yanı sıra, deney sırasında ortamda meydana gelen gürültü veya deney düzeneğini oluşturan materyallerin de ses yutumuna kısmi de olsa katkısı meydana gelmiş olabileceği düşünülmektedir. Bu frekans aralığında deney örneğinin ses yutma performansında teorik olarak beklenenin bir miktar üzerinde değerler oluşabildiği tecrübe edilmiştir. Bu sebeple Geo-II levha örneklerinin 160 Hz ile 315 Hz aralığındaki fon ölçümleri için ortam gürültüsünün daha düşük düzeyde olduğu bir zaman diliminde ve ayrıca fon ölçüm periyodunun daha uzun sürede tutulması suretiyle, bu hassasiyet minimize edilmeye çalışılarak, teorik yaklaşımlara daha yakınsak ses yutma performans değerleri elde edilebildiği gözlenmiştir. Fon ölçümleri sırasında bu hassasiyet dikkate alınarak rezonans frekans bölgesinde fon ölçümleri tekrarlamalı olarak yapılmıştır. Teorik olarak  $\alpha$  ses yutma katsayısı değerinin 1'in üzerinde olmaması gerekir. Negro ve ark. [29] perforeli plywoodun ses yutma katsayısının tayini için yaptıkları deneysel çalışmada uyguladıkları test yöntemine bağlı olarak bazı test örneklerinde  $\alpha$ 'nın 1 değerini aştığını tecrübe edinmişler, ancak, bu değerini deneysel ölçüm yönteminden kaynakladığını düşünerek  $\alpha$  değerini 1 olarak kabul etmişlerdir. Tekrarlamalı fon ölçümleri bulgularına göre, Geo-II levha örneklerinde 63 Hz ile 250 Hz aralığında

%5.5 perforasyon oranında  $\alpha = 0.05$ 'den  $\alpha = 0.68$  değerine kadar gelişmektedir (Şekil 12). Benzer şekilde, %8 perforasyon oranında  $\alpha = 0.04$ 'den  $\alpha = 0.66$ 'a (Şekil 13), %12.6 perforasyon oranında ise  $\alpha = 0.05$ 'den  $\alpha = 0.56$  değerine kadar gelişmektedir (Şekil 14). %5.5 perforasyon oranında absorpsiyon özelliği 250 Hz'de tepe noktasına ulaşarak  $\alpha = 0.99$  olarak hesaplanmıştır.  $\alpha$  değerindeki bu artış, yalıtım katmanı olmayan formuna göre yaklaşık %25 daha gelişerek bu tepe noktasında sesi hemen hemen bütünüyle absorbe eden bir özellik kazandığı düşünülmektedir. Benzer eğilim, %8 ve %12.6 perforasyon oranlarında absorpsiyon özelliği 250 Hz'de tepe noktasına ulaşarak sırasıyla  $\alpha = 0.97$  ve  $\alpha = 0.98$  olup, geotekstil keçenin  $\alpha$  değerinde oluşturduğu iyileştirme ise sırasıyla %41 ve %40'dir. Akustik levhadaki perforasyon oranı arttıkça, eşdeğer kalınlıkta uygulanmış geotekstil keçe kompozit formda akustik levhanın ses yutma özelliğini daha etkin hale getirmektedir.

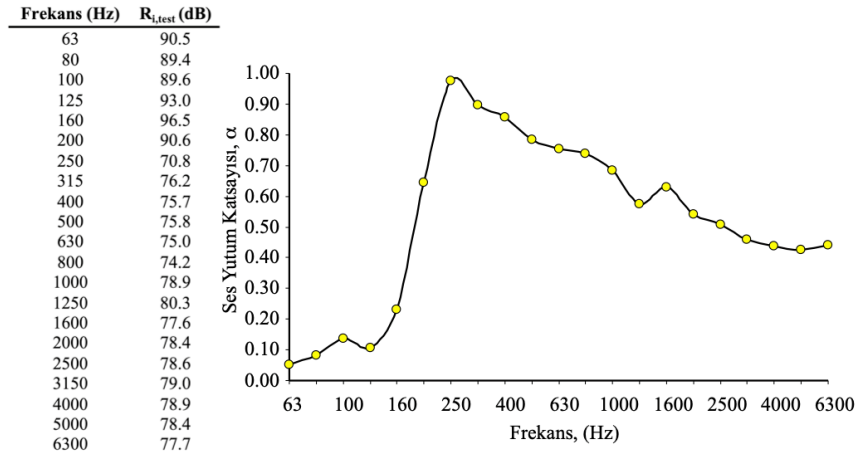
250 Hz frekans değerinden sonraki frekanslarda özellikle 315 Hz-2000 Hz aralığında levhanın yalıtım katmansız formuna benzer eğilimle tüm perforasyon oranlarında absorpsiyon özelliğinin lineer kabul edilebilecek bir azalma göstermektedir. Bu eğilim %5.5 perforasyon oranında 315 Hz-2000 Hz geniş band aralığında  $\alpha = 0.92$ 'den  $\alpha = 0.34$  değerine kadar azalmaktadır. Benzer şekilde, %8 perforasyon oranında 315 Hz-2000 Hz geniş band aralığında  $\alpha = 0.90$ 'dan  $\alpha = 0.44$  değerine ve %12.6 perforasyon oranında ise eşdeğer band aralığında  $\alpha = 0.90$ 'dan  $\alpha = 0.41$  değerine kadar azalmaktadır. Yüksek frekans bölgesinde 2000 Hz değerinden sonra  $\alpha$  değerlerinde tekrar bir artış eğilimi görülmektedir. Bu artış %5.5 perforasyon oranında  $\alpha = 0.40$  -  $\alpha = 0.53$  aralığında değişmekte olup, %8 perforasyon oranında  $\alpha = 0.41$  -  $\alpha = 0.46$  ve %12.6 perforasyon oranında ise  $\alpha = 0.48$  -  $\alpha = 0.53$  değerleri arasında gelişmektedir. Geo-II levha örneklerinin yalıtım katmanı olmayan levha formu performanslarına kıyasla, 2000 Hz'in üzerinde levhanın absorpsiyon özelliğine daha ses soğurucu bir nitelik kazandırmıştır.

Geotekstil katmanlı levhanın 1/3 oktav bandı 250, 500, 1000 ve 2000 Hz frekansları baz alınarak %5.5 perforasyon oranında gürültü azaltma katsayısı  $NRC=0.55$ 'dir. Levha örneği, bu perforasyon ve frekans band aralığında %55 ses emilimi özelliğine sahip olup, %45 oranında ise sesi yansıtacaktır. Diğer bir deyişle, ortamda yer alan bu frekanslardaki sesin iç mekâna yansıma miktarı azalarak, geotekstil keçe yalıtım katmansız levha formuna göre daha az yankılanma olacaktır. %8 perforasyon oranında  $NRC=0.61$ 'e yükselmekte olup, %12.6 perforasyon oranında ise  $NRC=0.62$ 'ya ulaşmaktadır. Görüldüğü gibi, geotekstil katmanlı levhanın  $NRC$  değerini artırmış olup, ses emisyon sınıfı değerlendirmesine göre "D" kategorisinde yer almaktadır.  $NRC$  değerine göre ses soğurma derecelendirmesinde [28]  $0.50 \leq NRC \leq 0.75$  olan malzemeler, "emici" özellikteki malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Bu bağlamda, geotekstil yalıtım katmanlı çimento bağlayıcılı akustik levhaya "emici" nitelik taşıyan bir özellik kazandırmıştır. Diğer bir deyişle, "düşük emici" nitelikteki levhanın yalıtım katmansız formuna göre "emici" bir özellik kazanmasını sağlamıştır.

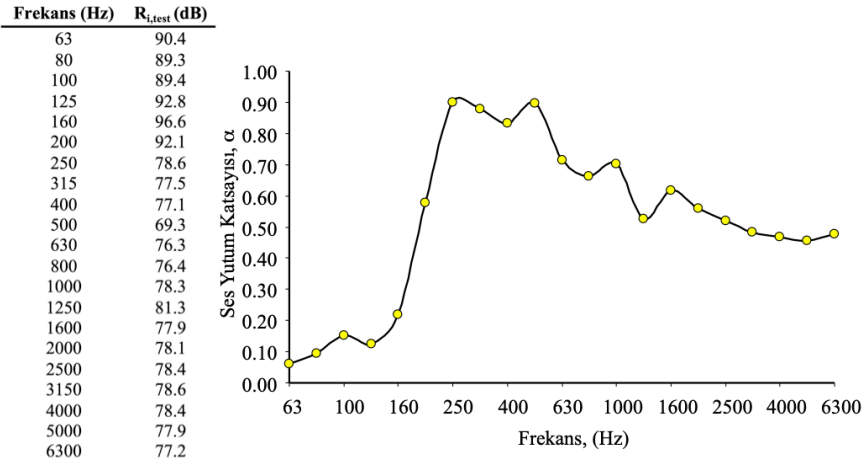
Yalıtım amaçlı uygulanan ikinci alternatif malzeme ise ortalama birim hacim kütlesi  $105 \text{ kg/m}^3$  ve 8 mm kalınlıktaki PE esaslı kauçuktur. PE-II levha örneklerinin ses yutum katsayı değerleri sırasıyla %5.5, %8.0 ve %12.6 olan 3 ayrı perforasyon oranında analiz edilmiştir. 1/3 oktav bandında 63 Hz – 6300 Hz frekans aralığında ses yutum katsayısı değişimi Şekil 15-Şekil 17'de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 15. PE kauçuk katmanlı örneklerin frekans - ses yutum katsayı ilişkisi (Perforasyon oranı:%5).



Şekil 16. PE kauçuk katmanlı örneklerin frekans - ses yutum katsayı ilişkisi (Perforasyon oranı:%8).



Şekil 17. PE kauçuk katmanlı örneklerin frekans - ses yutum katsayı ilişkisi (Perforasyon oranı:%12.6).

Perforasyon oranı %5.5 olan PE-II levha örneklerinin ses yutma özellikleri eşdeğer formdaki geotekstil keçe yalıtımlı levhaların özelliklerine benzer bir karakteristik göstermiştir. 63 Hz- 6300 Hz frekans aralığında maksimum ses yutma katsayısı, diğer örneklerde olduğu gibi 250 Hz değerinde görülmüş olup,  $\alpha = 0.99$ 'dur. Yukarıda Geo-II levha örneklerinin frekans değişimine bağlı ölçümlerinde özellikle 160 Hz ile 315 Hz aralığında rezonans bölgesinin etkinlik kazanması sebebiyle ölçüm verilerinde sapmaların olabildiği PE-II levha örneklerinin ölçümlerinde de benzer durum gözlenmiştir. Geo-II levha örneklerinin ölçümlerinde uygulandığı prensip PE-II levha örnekleri için de uygulanarak bu frekans aralığında tekrarlamalı ölçümler yapılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, 63 Hz – 250 Hz arasında  $\alpha$  değeri 0.06 – 0.69 aralığında frekansa bağlı olarak artarak değişim göstermiştir (Şekil 15).250 Hz frekans değerinden sonra  $\alpha$  değeri lineer bir eğilimle 3150 Hz yüksek frekans bölgesi seviyesine kadar azalarak değişmektedir. Ancak, 3150 Hz frekans değerinden daha büyük frekanslarda  $\alpha$  0.40 – 0.49 aralığında artarak ses yutumu açısından değer kazanmıştır. Ancak, PE-II levha örneklerinin %8 ve %12.6 perforasyon oranlı tasarımı, %5.5 perforasyon tasarımıdaki değerlerinden özellikle frekans bölgeleri bağlamında farklılık göstermektedir.

Perforasyon oranı %8'lik tasarımın maksimum ses yutma katsayısı 250 Hz frekans değerinde oluşmakta olup, tepe noktada  $\alpha$  değeri 0.96'dır (Şekil 16). Ancak, perforasyon oranı %12.6'lık tasarımın  $\alpha$  değeri tepe noktasında 0.90 olup, bu değer üç ayrı frekans değerinde eşdeğer büyüklük olarak oluştuğu tespit

edilmiştir. Bu frekans değerleri sırasıyla 250 Hz, 315 Hz ve 500 Hz'dir (Şekil 17). Bu bulgu, %12.6 perforasyon oranında PE-II levha tasarımının ses absorpsiyon kabiliyetinin diğer tasarımlara göre daha yüksek performans gösterdiğini de temsil etmektedir. Özellikle düşük frekans bölgesi olarak nitelenen ve geniş bir bant alığında daha etkin bir ses yutma özelliği taşımaktadır. 63 Hz – 250 Hz frekans aralığında %8 perforasyon oranlı tasarımda  $\alpha = 0.05$ 'den 0.64 değerine kadar artan bir eğilim göstermiştir. Benzer şekilde aynı frekans aralığında %12.6 perforasyon oranlı tasarımda ise  $\alpha = 0.06$ 'dan 0.58 değerine kadar artan bir eğilim göstermiştir. Perforasyon oranları %8 ve %12.6 olan PE esaslı kauçuk yalıtım katmanlı tasarımların frekans değişimine bağlı ses yutma karakteristiğinin tepe noktasından sonra giderek azalan bir değer oluşturduğu belirlenmiştir. %8 perforasyon oranlı levha örneklerinin bu eğilimi 315 Hz-6300 Hz aralığında görülmüş olup,  $\alpha$  değeri değişimi 0.86'dan 0.44'e kadar azalarak gelişmiştir. Ancak, %12.6 perforasyon oranlı levha örnekleri için bu eğilimin 500 Hz-6300 Hz aralığında oluştuğu belirlenmiş olup,  $\alpha$  değeri değişimi de 0.71'den 0.48'e kadar azalarak gelişmiştir.

Akustik levha tasarımında yalıtım katmanı malzeme kullanımının karşılaştırılması bağlamında eşdeğer perforasyon oranlarında hazırlanan levha örneklerinde geotekstil keçenin 1/3 oktav bandı 63 Hz-6300 Hz frekans aralığında oluşan  $\alpha$  tepe nokta değerleri PE esaslı kauçuk kullanıma göre daha yüksek değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Ancak, eşdeğer perforasyon oranlarındaki levhalara ait gürültü azaltma katsayısı NRC değerinin PE esaslı kauçuk kullanımda daha etkin olduğu belirlenmiştir. Perforasyon oranları %5.5, %8 ve %12.6 olan PE kauçuk yalıtımlı akustik levha örneklerinin NRC değerleri sırasıyla 0.70, 0.74 ve 0.76'dır. Görüldüğü gibi, levha tasarımındaki perforasyon oranı arttıkça NRC değeri de artmaktadır. Avrupa'da tecrübe edinilen ses emisyon sınıfı değerlendirmesine göre %5.5 ve %8 perforasyon oranlı PE kauçuk yalıtımlı akustik levhalar "C" kategorisinde yer almakta olup,  $0.50 \leq NRC \leq 0.75$  ses soğurma derecelendirmesine göre "yüksek emici" özellikteki levhalar olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte %12.6 perforasyon oranlı PE kauçuk yalıtımlı akustik levhalar ise "B" kategorisinde yer almakta olup,  $NRC \geq 0.75$  ses soğurma derecelendirmesine göre "mükemmel emici" özellikteki levhalar olarak tanımlanmaktadır. Bu değerlendirmeden de görüleceği üzere, PE esaslı kauçuk malzemenin yalıtım katmanı olarak kullanımı, derzli ve perforeli kompozit formda çimento bağlayıcılı akustik levhaların ses azaltma karakteristiğine perforasyon oranına bağlı olarak yüksek emici ve/veya mükemmel emici birer nitelik kazandırmaktadır.

## IV. SONUÇ

Bu çalışmada, derzli ve perforeli tasarıma sahip elyaf takviyeli çimentolu levhaların akustik özelliklerini farklı modeller üzerinde incelenmiştir. Bu modellerde üç ayrı perforasyon oranı irdelenmiştir. Ayrıca, çimento bağlayıcılı perforeli akustik levhaların ses yutma kapasitesini artırmak için geotekstil keçe ve polietilen esaslı kauçuk ses emici malzemeler ile çimentolu levhalar desteklenmiş ve bunun sonucu elde edilen akustik performansları analiz edilmiş, teknik bulgular karşılaştırmalı sunulmuştur. Çalışma bulgularına göre:

1. Beklendiği üzere, tek katmanlı plakalarda perforasyon oranı arttıkça levha örneklerinin birim hacim kütle değeri düşmektedir.
2. Referans örnek olarak değerlendirilen, Yalın-I levha örneğinin analizleri sonucu bu özellikteki levhanın ses yutucudan ziyade ses yansıtıcı bir yapı malzemesi olduğu tespit edilmiştir.
3. Derzli perforeli form kazandırılmış levha örneklerinin perforesiz düz referans örneğinin performansı ile karşılaştırıldığında, referans örneğinin absorpsiyon özelliği yüksek frekans band değişiminde artış gösterirken, derzli perforeli levhaların absorpsiyon özelliğinin ise düşük frekans bölgelerinde daha etkin absorpsiyon özelliği göstermektedir.
4. 1/3 oktav bandı 250, 500, 1000 ve 2000 Hz frekansları baz alınarak %0, %5.5, %8 ve %12.6 perforasyon oranında levhanın gürültü azaltma katsayıları (NRC) sırasıyla 0.08, 0.41, 0.42 ve 0.46'dır. Görüldüğü gibi, derzli ve perforasyon sonrası akustik levha formunun kontrol levhasına göre önemli bir NRC değeri artışı elde edilmektedir.



5. NRC değerine göre ses soğurma derecelendirmesinde  $0.25 \leq NRC \leq 0.50$  olan malzemeler, “düşük emici” özellikteki malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Bu bağlamda, Yalın-I levhaları, “düşük emici” özellik kazanmaktadır.
6. Geotekstil yalıtım katmanı, derzli ve perforeli levha örneklerinin ses yutma özelliklerinin genel karakteristik formunu değiştirmemekle birlikte, yalıtım katmanı kompozit formdaki levhanın ses yutma katsayı değerlerini artırmıştır.
7. Geotekstil katmanlı levhaların 1/3 oktav bandı 250, 500, 1000 ve 2000 Hz frekansları baz alınarak %5.5, %8 ve %12.6 perforasyon oranında gürültü azaltma katsayıları sırasıyla 0.55, 0.61 ve 0.62’dir.
8. NRC değerine göre ses soğurma derecelendirmesinde geotekstil yalıtım katmanı çimento bağlayıcılı akustik levhaya “emici” nitelik taşıyan bir özellik kazandırmıştır.
9. Polietilen katmanlı levhaların 1/3 oktav bandı 250, 500, 1000 ve 2000 Hz frekansları baz alınarak %5.5, %8 ve %12.6 perforasyon oranında gürültü azaltma katsayıları sırasıyla 0.70, 0.74 ve 0.76’dır.
10. NRC değerine göre ses soğurma derecelendirmesinde polietilen yalıtım katmanı çimento bağlayıcılı akustik levhaya “yüksek emici” nitelik taşıyan bir özellik kazandırmıştır. Bununla birlikte %12.6 perforasyon oranlı PE kauçuk yalıtımlı akustik levhalar ise,  $NRC \geq 0.75$  ses soğurma derecelendirmesine göre “mükemmel emici” özellikteki levhalar olarak tespit edilmiştir.
11. Malzemelerin daha pratik bir şekilde ses yutma kapasitelerinin ölçümü için tasarlanan deney ölçüm düzeneğinin bu çalışma kapsamında kullanılan örneklerin ses yutma özelliklerinin karşılaştırılması açısından yeterli olduğunu ve oldukça pratik bir çözüm getirebildiği tespit edilmiştir.

## **V. KAYNAKLAR**

- [1] F. K. Yuen, “A vision of the environmental and occupational noise pollution in Malaysia,” *Noise and Health*, vol. 16, no. 73, pp. 427-436, 2014.
- [2] M. Hustim, M. I. Ramli, R. Zakaria and A. R. Zulfiani, “The effect of speed factors and horn sound to the RLS 90 model reliability on the visum program in prediction noise of heterogeneous traffic,” *International Journal of Integrated Engineering*, Special Issue 2018: Civil & Environmental Engineering, vol. 10, no. 2, pp. 77-81, 2018.
- [3] M. Kavraz and R. Abdülrahimov, “Üzeri delikli ve yarıklı ekranların akustik etkisinin incelenmesi,” *II. Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi*, İstanbul, Türkiye, 2004, pp. 425-437.
- [4] Y. Abdullah, A. Putra, H. Efendy, W. Farid, and M. R. Ayob, “Investigation on sound absorption coefficient of natural paddy fiber,” *International Journal of Renewable Energy Resources*, vol. 3, no. 1, pp. 8-11, 2013.
- [5] M. J. M. Nor, N. Jamaludin, and F. M. Tamiri, “A preliminary study of sound absorption using multi-layer coconut coir fiber,” *Electronic Journal Technical Acoustic*, vol. 3, pp. 1-8, 2004.
- [6] R. T. Randeberg, “Perforated panel absorbers with viscous energy dissipation enhanced by orifice design,” Ph. D. thesis, Department of Telecommunications, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2000. [Online]. Available: [https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/249798/125365\\_FULLTEXT01.pdf?sequence=1](https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/249798/125365_FULLTEXT01.pdf?sequence=1)
- [7] H. Ruiz, P. Cobo, T. Dupont, B. Martin ve P. Leclaire, “Acoustic properties of plates with unevenly distributed macroperforations backed by woven meshes,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 132, no. 5, pp. 3138-3147, 2012.

- [8] T. E. Vigran, "The acoustic properties of panel with rectangular apertures," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 135, no. 5, pp. 2777-2784, 2014.
- [9] K. U. Ingard, *Notes on sound absorption technology*. Poughkeepsie, NY, USA: Noise Control Foundation, 1994.
- [10] Z. Maekawa, and P. Lord, *Environmental and Architectural Acoustics*, London, UK: CRC Press, 1993.
- [11] K. U. Ingard and R. H. Bolt, "Absorption characteristics of acoustic material with perforated facing," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 23, no. 5, pp. 533-540, 1953.
- [12] M. Kucuk and Y. Korkmaz, "The effect of physical parameters on sound absorption properties of natural fiber mixed nonwoven composites," *Textile Research Journal*, vol. 82, no. 20, pp. 2043-2053, 2012.
- [13] B. Song, L. Peng, F. Fu, M. Liu and H. Zhang, "Experimental and theoretical analysis of sound absorption properties of finely perforated wooden panels," *Materials*, vol. 9, no. 11, 942, 2016.
- [14] D. Y. Maa, "Potential of microperforated panel absorber," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 104, no. 5, pp. 2861-2866, 1998.
- [15] K. Sakagami, M. Yairi and M. Morimoto, "Multiple-leaf sound absorber with microperforated panels: an overview," *Acoustic Australia*, vol. 38, no. 2, pp. 76-81, 2010.
- [16] A. İstek ve A. Gençer, "Çimentolu yonga levha özelliklerine pomza kullanımının etkisi," *I. Ulusal Akdeniz Orman ve Çevre Sempozyumu*, Isparta, Türkiye, 2014, ss. 560-567.
- [17] R. Bi, Z. S. Liu, K. M. Li, J. Chen and Y. Wang, "Helmholtz resonator with extended neck and absorbing material," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 141, no. 1, pp. 308-312, 2012.
- [18] S. K. Tang, C. H. Ng and E. Y. L. Lam, "Experimental investigation of the sound absorption performance of compartmented Helmholtz resonators," *Applied Acoustics*, vol. 73, no. 9, pp. 969-976, 2012.
- [19] F. A. Everest, *The Master Handbook of Acoustics*, 4th edition. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2001.
- [20] A. Selamat, M. B. Xu, I. J. Lee and N. T. Huff, "Helmholtz resonator lined with absorbing material," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 117, no. 2, pp. 725-733, 2005.
- [21] J. Carbajo, J. Ramis, L. Godinho and P. Amado-Mendes, "Modeling of perforated panels with slit-like dead-end pores," *EuroRegio2016*, 2016.
- [22] H. M. Öz ve E. Köse, "Gürültü önleyici akustik malzemelerin performans düzeylerinin incelenmesi," *European Journal of Science and Technology*, vol. 18, ss. 1-10, 2020.
- [23] O. Keskin ve S. Yılmaz, "Su kabağı lifi (*Luffa Cylindrica*)-epoksi kompozitinde sesin yutulma performansını etkileyen parametreler," *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, cilt 24, sayı 1, ss. 201-208, 2020.
- [24] *Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method*, ASTM C423, 2022.

- [25] *Acoustics - Sound absorbers - Rating of sound absorption coefficients (ISO/DIS 11654:2017)*, DIN EN ISO 11654, 1997.
- [26] A. K. Ghilahare and M. Pandey, “Experimental analysis of sound absorption coefficient of the combined mechanism of enhanced egg carton, gypsum board and sound diffuser”, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 6, no. 8, p16400-16412, 2007. DOI:10.15680/IJRSET.2017.0608171
- [27] Decibel Drop and Noise Reduction Coefficients for Material Combinations, 2022, [online] Available at :<https://www.thermaxxjackets.com/noisereduction-coefficients-and-decibel-drop>
- [28] *Sound insulation and sound absorption of suspended ceilings*, VDI 3755:2015, Technical rule in Germany, 2015.
- [29] F. Negro, C. Cremonini, M. Properzi, and R. Zanuttini, “Sound absorption coefficient of perforated plywood: an experimental case study,” *World Congress On Timber Engineering*, Italy (2010).