



Ses yalıtımında ses azaltım indisi modellerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi

Ceyhun Aksoylu^{1*}, Engin Mendi², Arda Söylev³

¹Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

²KTO Karatay Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

³Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Ses yalıtımında R_w değerinin önemi
- Ses yalıtım modellerinin doğruluğunun R_w değerleri üzerinden karşılaştırılması
- Yapı malzemeleri için ses yalıtımında simülatif çalışmaların deneysel çalışmalara yakınlığı

Makale Bilgileri

Geliş: 10.09.2015

Kabul: 20.03.2016

DOI:

10.17341/gummfd.02002

Anahtar Kelimeler:

Ses yalıtımı,
ses yalıtım modeli,
ses azaltım indisi,
ses yalıtım malzemeleri

ÖZET

Teorik hesaplamalara dayalı olarak geliştirilmiş ses yalıtım modellerinin amacı, deneysel olarak malzemeye ait “Ses Azaltım İndisi (R)” değerlerinin bulunması sırasında harcanan zaman, emek ve maliyeti azaltmaktır. Bu çalışmada, literatürde var olan simülasyon modelleri ile ticari ses yalıtım programları kullanılarak, yapı malzemelerinin R değerleri araştırmacılar tarafından daha önce yapılan deneysel verilerle 11 farklı malzeme için karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Deneyler Bastian, Akuzoft, Insul ve dBKAisla modelleri kullanılarak yapılmıştır. Modeller ISO 12354, ISO 10140 ve ISO 717 standartlarında 1/3 oktav bant analiz yapmaktadır. Kullanılan bu modellerde literatürdeki temel hesaplama formülleri, tek tabakalı paneller için R hesabında kullanılması gereken hesap yöntemleri, kullanılan panel boyutları ile malzemeye ait kalınlık, yoğunluk, elastisite modülü, porozite, iç kayıp faktörü ve sesin havadaki hızı dikkate alınmıştır. Bu sayede, farklı frekanslara karşılık gelen R değerleri deneysel çalışmalarla bulunmuş malzemelerin, farklı ses yalıtım modelleri kullanılarak simülasyonları yapılmış, sonuçları karşılaştırılarak kullanılan ses yalıtım modellerinin etkinlikleri belirlenmiştir. Analizler sonucunda, kullanılan modellerin farklı malzemeler için R ve R_w 'ye bağlı olarak malzemelerin performansını gösteren tek dereceli “Ağırlıklı ses azaltım indisi (R_w)” bakımından etkinlikleri saptanmış, doğruluk değerleri hesaplanmıştır.

A study of sound transmission loss for building materials using simulative and experimental approaches

H I G H L I G H T S

- Importance of R_w in sound insulation
- Accuracy comparison of sound insulation models based on R_w values
- Closeness of simulative to experimental approaches on sound insulation for building materials

Article Info

Received: 10.09.2015

Accepted: 20.03.2016

DOI:

10.17341/gummfd.02002

Keywords:

Sound insulation,
sound insulation model,
sound transmission loss,
insulation materials

ABSTRACT

The sound insulation models that we use in this study are based on theoretical computations and their aim is to reduce time, labor and cost consumption during the calculation of “Sound Transmission Loss (R)” of a particular material experimentally. In this study, for 11 different materials, we compare the performance of various simulation models with the experimental results that are already available in the literature. The experiments were carried out with Bastian, Akuzoft, Insul and dBKAisla model. The analyses were conducted in the standards of ISO 12354, ISO 10140 and ISO 717 in 1/3 octave band. In the models, basic formulas from the literature, computation methods that is necessary to be used in R value calculation for single panels, dimensions of the panels, thickness, density, elasticity module, porosity, internal loss factor belonging to the material and velocity of sound in air have been taken into consideration. In summary, we conducted the simulations with different sound insulation models for the materials whose R values correspond to particular frequencies that have been calculated using experimental work. Comparing the results, effectiveness of each model has been calculated in terms of R and “Weighted Sound Reduction Index (R_w)”.

* Sorumlu Yazar/Corresponding author: ceyhunaksoylu@selcuk.edu.tr / Tel: +90 332 223 2025

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde teorik hesaplamalar dikkate alınarak geliştirilmiş olan ses yalıtım modellerinin amacı, deneysel olarak malzemeye ait “*Ses Azaltım İndisi (R)*” değerlerinin bulunması sırasında harcanan uzun ve maliyetli süreci azaltmaktır. Bu modellerin her biri kendi içinde farklı standartlardaki teorik hesapları dikkate alarak deneysel veriye en yakın sonucu sunmak için geliştirilmişlerdir. Dolayısıyla bu yazılım modellerini incelemeye önce genel anlamda hava doğuşumlu bir sesin iletilmesinde kullanılan teorik hesapların bilinmesi, ses yalıtım modellerinin anlaşılması için önemlidir. Hava doğuşumlu ses yalıtımındaki teorik temeli anlayabilmek için öncelikle sistem içerisinde hareket eden enerjinin nasıl kontrol edildiği bilinmelidir. Termodinamiğin birinci yasasına göre, enerji yoktan var edilemeyeceği gibi vardan da yok edilemez. Sadece bir durumdan başka bir duruma dönüşür [1]. Bu kanunun bir sonucu olarak, herhangi bir yüzeye çarpan ses dalgası, ya bu yüzey tarafından emilir, ya yansımaya uğrar, ya da iletilir. Eğer ses dalgası, yüzey tarafından emilirse, ses enerjisi durum değiştirerek ısı enerjisine dönüşür. Dolayısıyla herhangi bir panelin ses yalıtımı basitçe ölçülebilir ve ölçülen değere göre alınması gereken önlemler tespit edilebilir. Hava doğuşumlu seste iletilen dalganın büyüklüğünün hesaplanmasında ses azaltım katsayısı (τ) ve R iki önemli parametredir. R değeri ISO 12354-1’de ses azaltım indisi olarak bilinmektedir [2]. Ayrıca yapı elemanının performansını değerlendirmek için kullanılan tek dereceli, karşılaştırma amaçlı kullanılan büyüklükler de vardır. Bu büyüklükler 1/3 oktav bantlarda hesaplandığı gibi, 1/1 oktav bandında da olabilir. Benzer durumlarda elemanın performansını gösterecek tek sayılı değerler uluslararası ISO 717-1 standardında anlatıldığı gibi R değerlerine bağlı olarak elde edilebilir [3]. Ses azaltım indisi olan R, bir yapı elemanının her bir frekanstaki ses azaltım indisi değerini teker teker gösterirken, R_w (C;Ctr) değeri ISO 717-1 standardında izah edilen yöntemle göre kaydırma yapıldıktan sonra 500 Hz’de ki referans eğrisinin desibel cinsinden değeridir [3].

Bir ortamda bulunan ses kaynağının şiddetinin alıcı ortama etkisini azaltmak için araya bölücü eleman yerleştirilir. Bu sayede havada hareket halinde olan ses dalgaları bu bölücü elemana çarparak bölücü elemanın titreşmesine ve dolayısıyla kaynak ortamından alıcı ortama belli bir oranda ses geçişinin sağlanmasına neden olur [4]. Elemandan iletilen sesin şiddeti elemanın R değerine bağlı olarak değişmektedir. Bunun yanında τ değeri, bölmeden iletilen sesin, bölmeye gelen sesin şiddetine oranı ile bulunurken, elemanın R değeri ise τ değerine bağlı olarak Eş. 1’deki gibi hesaplanır:

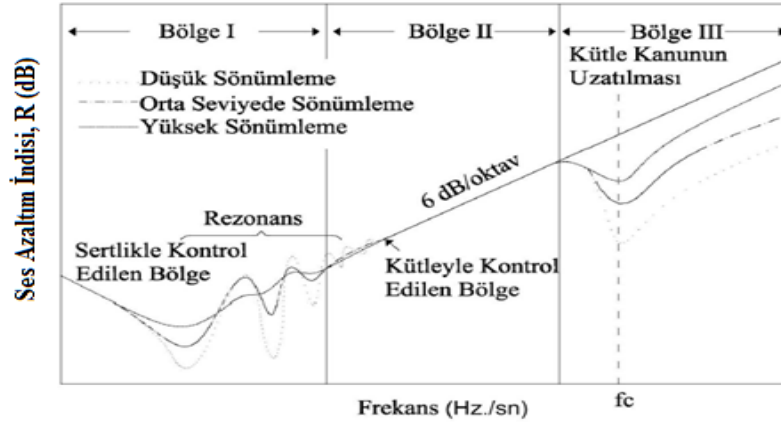
$$R = 10 \log \left(\frac{1}{\tau} \right)$$

$$R = \log \frac{\text{Bölmeye gelen sesin şiddeti}}{\text{Bölmeden iletilen sesin şiddeti}} \quad (1)$$

R değeri yutuculukta olduğu gibi frekansa bağlı olarak da farklılıklar gösterir. τ , 0 ile 1 arasında değişen değerler alır. τ değerinin 0 olması, kullanılan malzemenin sesi hiçbir şekilde geçirmediğini ifade ederken 1 olması, kullanılan malzemenin sesi tümüyle geçirdiğini ifade etmektedir [5]. Buna en güzel örnek açık bırakılan kapı ve pencerelerden geçen ses verilebilir. Genel anlamda τ değerinin 0,4 olması ortaya çıkan ses enerjisinin %40’ının iletilmiş olduğunu göstermektedir. Sesin yayılması sırasında frekans ve malzemenin özellikleri de R değerinin belirlenmesinde etkili olmaktadır. Ses dalgasının katı bir ortamdaki hareketi sırasında davranışında belirgin farklar olduğundan, frekansa karşılık gelen R grafiği üzerinde üç ayrı frekans bölgesi oluşturularak değerlendirilir. Şekil 1’de üç farklı frekans bölgesine bağlı olarak R değerindeki değişimler gösterilmektedir [6]. Şekil 1’den de görüldüğü gibi, düşük frekanslarda malzemenin sertliği R değeri üzerinde etkiliyken, frekans yükselip rezonans bölgesine girdiğinde ise R değerini malzemenin sönümlemesi etkiler [7]. Orta frekans bölgesinde R değeri malzemenin kütlesine bağlıdır, kütle kanunu bölgesinde de R doğrusal olarak artar. Teorik olarak maksimum 6dB/oktav artış görülür. Kritik frekansa ulaşıldığında R düşüş gösterir ve minimum değerinden geçerek, frekansa bağlı olarak tekrar artmaya başlar. Buna çakışma çukuru denir [8]. Tek katlı homojen malzemeli panelin R değerini arttırmanın en efektif yolu kütlesinin arttırılmasıdır. Diğer taraftan bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ve yaygınlaşması ile malzemelerin, özelliklerine bağlı olarak R değerlerinin hesaplanmasında kullanılmak üzere yazılım programları da geliştirilmekte ve bunlar deneysel çalışmaya yakın sonuçlar vermektedir. Böylelikle ses yalıtımı için en uygun malzeme tespiti deneysel çalışmalara gerek duymadan yapılabilmektedir. Kısaca, yapılan simülasyon yöntemi, gerçek bir sistemi temsil eden bir model oluşturma işlemidir. Bu tip bir modelleme, bir problemi çözmeye son derece etkili olmasından dolayı farklı amaçlar için farklı alanlarda uygulanabilen bir yöntem haline gelmiştir. Simülasyonlar vasıtasıyla çeşitli yalıtım malzemelerinin ses yalıtım değerlerinin çok kısa sürede ve etkili bir şekilde hesaplanabilmesi, yapılan bu çalışma için temel teşkil etmektedir. Bu çalışmada 4 farklı simülasyon modeli için 11 farklı malzemeye ait ses yalıtım değerleri hesaplanmış ve modeller karşılaştırılarak önceden bilinen deneysel sonuçlara göre doğrulukları incelenmiştir. Bu sayede hangi simülasyon modelinin hangi malzemeler üzerinde etkili olduğu da görülmüştür.

2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR (RELATED WORKS)

Konuyla ilgili literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde malzemelerin R değerlerinin hesaplanması üzerinde durulduğu görülmektedir. Dym ve Lang [9] sandviç panellerde R tespiti için geliştirdikleri teorik tahminler, R değerinin tespiti açısından yapılan ilk çalışma olma özelliği taşımaktadır. Yaptıkları çalışmada, Ford vd. [10]’da sandviç panellerin hareketine bağlı olarak geliştirdikleri kinematik varsayımlardan türeterek elde ettikleri beş ilişkili eşitlik kullanmışlardır. Geliştirdikleri bu eşitlikler, sandviç



Şekil 1. Tek tabakalı panelin ses azaltım indisinin frekans ile değişimi [5]
Change in sound reduction index based on frequency for single layer panels)

panellerin simetrik olma ve simetrik olmama durumları için ayrı ayrı düşünülmüştür. Teorik hesaplamalar sonucunda bulunmuş oldukları R değerlerini, Smolenski ve Krokosky [11]'de sandviç paneller üzerinde yapmış oldukları deneysel çalışmalar ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, deneysel ve teorik hesaplamaların kabul edilebilir olduğunu saptamışlardır. Yapılan ilk çalışmalar ışığında Rahbarı [12], tek katmanlı duvarların 100 Hz ile 4000 Hz arasında kalan 1/3 oktav band frekanslarındaki ses geçirgenliğini incelemiştir. Ayrıca çeşitli yoğunluk ve kalınlıktaki yapı malzemelerini kullanıp bunların sıvalı olup olmama durumları için ayrı ayrı ses geçirgenliklerini tespit etmiştir. Rahbarı'nın duvarlar üzerine yaptığı çalışmaya benzer olarak Homsı [13] çalışmasında, tek katmanlı ve çok katmanlı paneller için polimer bazlı malzemeler kullanılması durumu için R değerini analitik metot yöntemiyle belirlemiştir. Düşük frekanslar için malzemelerin R değerlerini hesaplamış ve kullanılan analitik metodun başarılı bir sonuç verdiğini görmüştür. Homsı'nın analitik çalışmasına benzer olarak Tadeu ve ark. [14], Kirchoff ve Mindlin yaklaşımını kullanarak analitik ve deneysel bulguları göreceli kütle yasasına göre tek ve çift kat paneller için ayrı ayrı değerlendirmişlerdir. Kullandıkları cam, çelik ve beton için ses yalıtım değerleri hesaplanmış ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta, tahmin edilen analitik modelin ses yalıtımı açısından etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca deneysel ve analitik sonuçlar arasında düşük frekanslarda farklılıklar meydana geldiği saptanmıştır. Diğer taraftan Cambridge [15], Tadeu vd. benzer bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada bitişik iki sınıf için farklı kalınlıklardaki panellerin R değerlerini tespit etmek amacıyla Insul, Bastian, ENC, Reduct ve Winflag modelleri ile malzemelerin ses yalıtımı açısından karşılaştırmalarını yapmış, Insul ve Bastian modellerinin daha güvenilir sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca bir sınıfın, bir müzik odasına dönüştürülmesinde tek panel ve çift panel kullanılması durumları için de R değerlerinin tespitinde Insul ve Bastian modellerinin kullanımının güvenilir sonuçlar verdiğini belirlemiştir. Malzemelerin R değerlerinin deneysel olarak belirlenmesi amacıyla Demirkale [5], 19 cm kalınlığında bims blok, 20 cm

kalınlığında gaz beton, düşey delikli ve yatay delikli olmak üzere 19 cm kalınlığında tuğla malzemesine ait R değerinin tespitini yapmak için "TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü" (TÜBİTAK UME) laboratuvarlarında deneysel çalışmalar yapmıştır. Sonuç olarak gürültü sorunu açısından performansı en yüksek olan duvar tipinin tuğla duvar olduğunu belirlemiştir. Ayrıca duvarların sıvalanmasının R değerini artırdığını, dolayısıyla ses yalıtımı açısından son derece önemli olduğunu vurgulamıştır. Deneysel çalışma yapması bakımından İlgün vd. [16] çalışmalarında, temiz kâğıtlardan, çöplerden, şirketlerin arşivlerinden ve ofislerden almış oldukları atık kâğıtları sıvılaştırılmış bor ile karıştırıp 3 cm ve 5 cm kalınlığında paneller inşa etmişlerdir. İki odalı hücre içerisindeki ara bölme %88 oranında temiz kâğıtla %12 oranında borun karışımından oluşan ve %90 oranında atık kâğıtla %10 oranında borun karışımından oluşan farklı kalınlıklarda paneller inşa edilmiş ve R değerleri tespit edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada, kullanılan atık kâğıdın yüksek frekanslar için daha etkili olduğu görülmüştür. Son olarak Ratnieks [17] çalışmasında Ratnieks vd. [18] çalışmasını da dikkate alarak, kilden yapılmış tuğla duvarlar için geliştirdiği matematiksel modeli, iki boyutlu Comsol akustik modülünde kullanarak ses azaltım indisini (R) değerini hesaplamıştır. Kullanılan birçok malzemenin hesabında ISO 10140-1 [19] ve ISO 10140-5 [20] standartlarını kullanarak tahminler yapmıştır. Sonlu elemanlar metoduna göre geliştirilen matematiksel modelin, deneysel çalışmaları yapılmış malzemelerin SR değerlerine yakın çıkması, geliştirilmiş olan matematiksel modelin başarılı olduğunu göstermiştir. Ratnieks'in çalışmasının temeli Papadopoulos [21]'e dayanmaktadır. Papadopoulos çalışmasında, üç boyutlu bir optimize test odası düşünmüş ve oluşturduğu sanal test tesisleri ile deneysel verileri karşılaştırmıştır. Sonuç olarak, geliştirilen sanal modelin düşük frekanslar için uygun olduğu, frekansın artmasıyla maliyetin de arttığı görülmüştür. Del Coz Diaz [22] çalışmasında Papadopoulos sistemine benzer olarak, iki boyutlu sonlu elemanlar metodunu dikkate alarak duvarların R değerlerini hesaplamış ancak R hesabında farklı bir matematiksel hesaplama yöntemi kullanmıştır. Bu çalışmalara benzer

[23-26] çalışmaları da literatürde R değerlerini bulmaya yönelik olarak incelenmiştir. Genel olarak yapılan çalışmalar incelendiğinde farklı matematiksel modellerin R değerinin tespiti için kullanıldığı ve modellerin doğruluklarının da deneysel verilerle karşılaştırılarak ortaya koyulduğu görülmüştür. Bu sayede, hangi simülasyon modelinin hangi malzemeler üzerinde etkili olduğu görülebilmektedir.

3. MODELLER (MODELS)

Bu çalışmada kapsamlı teorik hesaplamaları bünyelerinde bulunduran modeller kullanılarak tek tabakalı paneller için R hesabı yapılmıştır. Sırasıyla Bastian, Akuzoft, Insul ve dBKAİsla modelleri kullanılarak malzemeye ait kalınlık, yoğunluk, elastisite modülü, porozite, iç kayıp faktörü ve sesin havadaki hızı gibi parametrik değerler dikkate alınmıştır. Uygulanan modeller arasında Bastian ve Akuzoft modelleri MATLAB ortamında literatürde var olan araştırmacılar tarafından daha önce geliştirilmiş olup, Insul ve dBKAİsla modelleri ticari paket programlardır.

3.1. Bastian Modeli (Bastian Model)

Bastian [15], bitişik odalar arasında hava doğuşumlu (hava yolu ile iletilen) ses iletimi esnasında malzemeye ait ses yalıtım değerlerinin hesaplanmasında kullanılan bir ses yalıtım modelidir. Model, ISO 15712-1 Avrupa standardına dayanmakta, buna ek olarak ISO 10140-1 [19] ve ISO 10140-5 [20] gibi standartları da destekleyici yan parametreler olarak dikkate almaktadır. Bastian modeli ile tek tabakalı duvarlar için malzemenin R değeri Eş. 2 ve 3'de verilmiş ses geçiş azaltımına bağlı olarak hesaplanmaktadır. R değerinin önündeki eksi işareti ses azaltımını ifade etmektedir. Burada ses azaltım katsayısı (τ), ilgili panelin kalınlığı (t), yüzey kütlesi (m), sesin frekansı (f), kritik frekans (f_c), ses dalgasının havadaki hızı (c_0), toplam kayıp faktörü (η_{tot}), serbest eğilme dalgaları için radyasyon faktörleri (σ ve σ_f), boyuna dalga hızı (C_L) ve eleman kenar boyutları (l_1, l_2)'ye bağlıdır. f değeri ile f_c arasındaki ilişkiye göre kullanılan formül Eş. 4'de olduğu gibi değişmektedir. Eşitliklerde frekansın kritik frekanstan büyük olması durumlarında iletim kaybı hesabında panel boyutlarının etkisi dikkate alınmamaktadır. Ayrıca bu hesaplamada Josse ve Lamura [27] çalışmaları dikkate alınarak geliştirilmiş olan aşağıdaki formüller ISO 12354-1 [2] standardında yer alan R hesaplama modelini ifade etmektedir [8].

$$f_c = \frac{c_0^2}{1.8C_L t} \quad (2)$$

$$R = -10 \log(\tau) \quad (3)$$

$$\left(\frac{2 \cdot \rho_0 \cdot c_0}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot m} \right)^2 * \left(\frac{\pi \cdot f \cdot \sigma_2}{2 \cdot f \cdot \eta_{tot}} \right) \quad f > f_c$$

$$\tau = \left(\frac{2 \cdot \rho_0 \cdot c_0}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot m} \right)^2 * \left(\frac{\pi \cdot \sigma_2}{2 \cdot \eta_{tot}} \right) \quad f \approx f_c \quad (4)$$

$$\left(\frac{2 \cdot \rho_0 \cdot c_0}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot m} \right)^2 * \left(2 \cdot \sigma f + \frac{(l_1 + l_2)^2}{(l_1^2 + l_2^2)} * \sqrt{\frac{f_c}{f}} * \frac{\sigma_2}{\eta_{tot}} \right) \quad f < f_c$$

3.2. Akuzoft Modeli (Akuzoft Model)

Bir diğer ses yalıtım modeli olan Akuzoft [28], bazı akustik problemlerin modellenmesi için MATLAB ortamında geliştirilmiş bir hesaplama modelidir. Bazı duvar malzemeleri üzerine yapılan deneysel çalışmaların R değerlerini hesaplamak üzere kullanılmaktadır [29]. Akuzoft modeli malzemelerin R değerinin hesaplanmasında kalınlık (m), yoğunluk (ρ), yüzey kütlesi (m'), kritik frekans (f_c), boyuna dalga hızı (C_L), porozite (p), iç kayıp faktörü (η_{int}), elastisite modülü (E) ve havanın yoğunluğunu (ρ_0) dikkate almaktadır. Duvarlardaki R hesabında dikkate alınması gereken önemli parametrelerden birisi olan f_c değerinin hesaplanması Eş. 5'de gösterilmektedir. Eşitlikte, sesin havadaki hızı (c) kullanılmaktadır.

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_s}{B}} \quad (5)$$

Ayrıca yapılan hesaplamalar sonucunda her bir malzemeye ait R değeri Eş. 6 ve 7'deki son hali ile hesaplanmaktadır. Burada, ses azaltım indisi (R), ses azaltım katsayısı (τ), açısal frekans (ω), malzemenin yüzey yoğunluğu (ρ_s), malzemenin eğilme sertliği (B), sesin havadaki hızı (c) ve sesin engele geliş açısı (α)'dır.

$$B = \frac{Eh^3}{12 \cdot (1 - 2\nu^2)} \quad (6)$$

$$TL = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (7)$$

$$\tau = 2.0904 \int_0^{78} \left\{ \left[1 + \eta \left(\frac{\omega \rho_s \cos(\alpha)}{2 \rho_0 c} \right) \left(\frac{\omega B \sin^4(\alpha)}{c^4 \rho_s} \right) \right]^2 + \left[\left(\frac{\omega \rho_s \cos(\alpha)}{2 \rho_0 c} \right) \left(1 - \frac{\omega^2 B \sin^4(\alpha)}{c^4 \rho_s} \right) \right]^2 \right\}^{-1} \cos(\alpha) \sin(\alpha) d(\alpha) \quad (8)$$

3.3. Insul Modeli (Insul Model)

Malzemelerin R değerlerinin hesaplanmasında kullanılan diğer bir ses yalıtım modeli olan Insul, malzemenin yüzey kütlesini ve frekansını dikkate alarak hesaplama yapmaktadır. Yapılardaki tek katmanlı ve çok katmanlı duvar, yer, tavan, çatı ve pencerelerin R hesaplama değerlerinin bulunmasında etkili sonuçlar vermektedir [30]. Insul, hesaplama modelinde uygulamalı kütle yasasını geliştirmiş, ayrıca B.H. Sharp, Cremer ve diğer araştırmacılarında dikkate aldığı kritik frekans değerini de kullanmıştır [31]. Ses frekansının (f) malzemenin özelliğine bağlı olan kritik frekanstan (f_c) küçük olması hali ile frekansın (f) kritik frekansa (f_c) eşit veya büyük olması durumlarında R değerlerinin hesaplanma şekli Eş. 9 ve 10'da gösterilmiştir [31]. Eşitliklerde yer alan yüzey kütlesi (m'), frekans (f), iç kayıp faktörü (Γ)'dür.

$$TL = 20 * \log(m'f) - 48 \quad f < f_c \quad (9)$$

$$TL = 20 * \log(m'f) + 10 \log \left(\frac{2\eta f}{\pi f_c} \right) - 44 \quad f \geq f_c \quad (10)$$

Tablo 1. 11 farklı malzemeye ait parametrik değerler (Parametric values for 11 different materials)

Malzeme Özellikleri	Düşey Delikli Tuğla Duvar	Yatay Delikli Tuğla Duvar	Gaz Beton Duvar	Beton Duvar	Beton Duvar	Alçı Panel Duvar
Kalınlık(m)	0,19	0,19	0,2	0,12	0,26	0,013
Yoğunluk (kg/m ³)	800	600	500	2300	2300	661,5
Porozite	0,55	0,55	0,74	0,27	0,27	0,6
Elastisite Modülü (N/m ²)	0,714x10 ⁹	0,714x10 ⁹	2x10 ⁹	11x10 ⁹	11x10 ⁹	2,1x10 ⁹
İç kayıp faktörü	0,01	0,01	0,01	0,006	0,006	0,006
Sesin havadaki hızı (m/sn)	340	340	340	340	340	340
Malzeme Özellikleri	Ca-Si Blok Duvar	Ca-Si Blok Duvar	Hafif Kütleli Beton Duvar	Gaz Beton Duvar	Gaz Beton Duvar	
Kalınlık(m)	0,11	0,24	0,12	0,10	0,20	
Yoğunluk (kg/m ³)	1750	1750	1300	650	650	
Porozite	0,91	0,24	0,70	0,74	0,74	
Elastisite Modülü (N/m ²)	7,3x10 ⁹	7,3x10 ⁹	3,697x10 ⁹	1,643x10 ⁹	1,643x10 ⁹	
İç kayıp faktörü	0,015	0,015	0,015	0,015	0,010	
Sesin havadaki hızı (m/sn)	340	340	340	340	340	

Ayrıca ses dalgasının havadaki hızı (c), malzemenin kalınlığı (h), malzemenin yoğunluğu (ρ), elastisite modülü (E) ve yaklaşık değeri 1,8 olan katsayı (K) kullanılarak Eş. 11'a göre kritik frekans (f_c) hesaplanmaktadır [32].

$$f_c = \frac{c^2}{K \cdot h} \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (11)$$

3.4. dBKAisla Modeli (dBKAisla Model)

MATLAB ortamında geliştirilmiş tek ve çift panel duvarların yalıtımında kullanılan dBKAisla modeli, teorik hesaplamaları dikkate alarak panellerin simülasyonunu gerçekleştiren bir model olma özelliği taşımaktadır. Panellerin yanı sıra panolarda, döşemelerde ve pencerelerdeki R hesaplamalarında da kullanılan geniş bir veri tabanına sahip, geliştirilmeye ve yeni malzemeler tanımlanmaya müsait bir yazılım programıdır [33]. dBKAisla modeli ile yapılan simülasyonlar, ISO 12354-1, ISO 717-1, ve ISO 10140 [2, 3, 19] standardı dikkate alınarak 1/3 oktav bant analizlerine göre Eş. 12'deki gibi hesaplama yapmaktadır:

$$\tau = \frac{\text{Bölmeye gelen sesin şiddeti}}{\text{Bölmeye iletilen sesin şiddeti}} = \frac{1}{10^{TL/10}}, \quad TL = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (12)$$

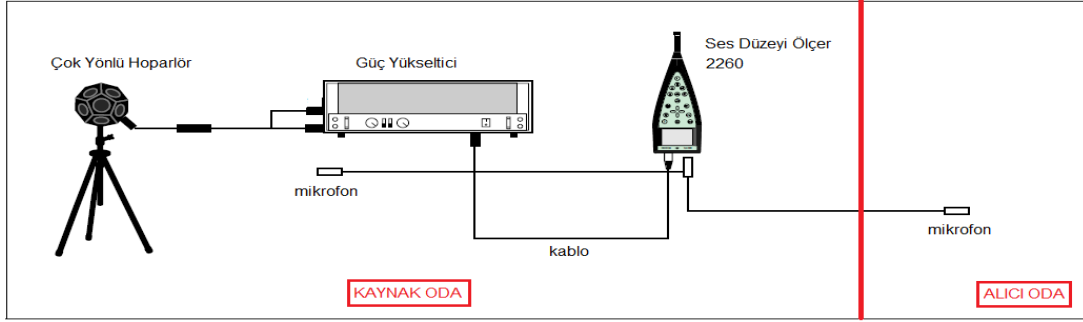
Burada ses azaltım indisi (R) ve ses azaltım katsayısı (τ) ile ifade edilmektedir. R, yutuculukta olduğu gibi frekansa bağlı olarak farklılık gösterir. dBKAisla, Insul modelinde olduğu gibi kütle yasası esas alınarak hesaplamalar yaptığından dolayı sonuçları itibari ile etkilidir. Ayrıca yapılan hesaplamalarda kütle yasasını ve düzeltilmiş kütle yasasını kullanarak iki farklı alternatif sunan bu model, farklı parametreleri her bir yasa için de dikkate almaktadır.

Yapılan seçim kütle yasası ise, gerekli olan parametre, ilgili panelin adı ve yüzey kütlesi olurken, düzeltilmiş kütle yasası olması halinde ilgili parametrelere ek olarak çakışma frekansı ve iç kayıp faktörü dikkate alınmaktadır. dBKAisla modeli ISO 12354 standardındaki ilgili eşitlikleri dikkate alınarak hesaplamalar yaparken R değeri bulunmak istenilen

malzemeye ait kalınlık, yoğunluk, yüzey kütlesi, elastisite modülü, iç kayıp faktörü ve sesin havadaki hızının bilinmesi yeterlidir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

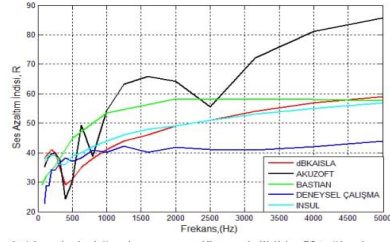
Bu bölümde Bastian (B), Akuzoft (A), Insul (I) ve dBKAisla (D) modellerinin 11 farklı malzeme için literatürde var olan deneysel çalışma sonuçlarıyla (E) karşılaştırılması ve sonuçları incelenmektedir. Tablo 1'de verilen malzemelere ait parametrik değerler bu çalışma kapsamında bulunmamış, simülasyon modellerinin doğruluğunun belirlenmesi için [2, 5, 19, 20, 34] çalışmalarından alınmıştır. Çalışmamızda 0,19 m Düşey Delikli ve Yatay Delikli Tuğla Duvar, 0,2 m Gaz Beton [5], 0,12 m ve 0,26 m Beton Duvar, 0,11 m ve 0,24 m Ca-Si Beton Duvar, 0,12 m Hafif Kütleli Beton Duvar, 0,10 m ve 0,20 m Gaz Beton Duvar [2] ve 0,013 m Alçı Panel Duvar [34] kullanılarak, simülasyon programlarının etkinliği belirlenmeye çalışılmaktadır. Düşey Delikli ve Yatay Delikli Tuğla Duvar, Gaz Beton ile ilgili literatürde var olan [5] deneysel çalışma TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (TÜBİTAK UME) Laboratuvarında ISO 10140-1 Standardında tanımlanan özelliklere uygun olarak yapılmıştır. İlgili Laboratuvar Şekil 2'de gösterilen ses yalıtım ölçüm odaları ve birbirine strüktürel olarak bağlantısı kesilmiş iki odadan oluşmaktadır. Diğer taraftan ISO 12354-1, ISO 10140-1 ve ISO 10140-5 standartlarından alınan 0,12 m ve 0,26 m Beton Duvar, 0,11 m ve 0,24 m Ca- Si Beton Duvar, 0,12 m Hafif Kütleli Beton Duvar, 0,10 m ve 0,20 m Gaz Beton Duvar, 0,013 m alçı panel duvar verileri kullanılmıştır. Yapılan tüm deneysel çalışmalar standartlarda belirtilen laboratuvar koşulları dikkate alınarak 1/3 oktav band frekansları dikkate alınarak yapılmıştır [5]. Şekil 3'de 11 farklı malzemeye ait frekansa karşılık gelen R değerleri gösterilmiş olup Tablo 2'de ise hesaplanan R_w ve doğruluk değerleri verilmiştir. Doğruluk değeri Eş. 13'de gösterildiği gibi hesaplanmıştır [36]. Bu değer simülasyon modelinin deneysel sonuca göre doğruluğunu istatistiksel olarak vermektedir.



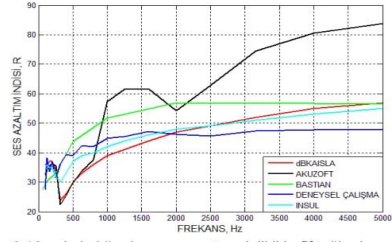
Şekil 2. Ses yalıtımı test odaları ve ölçüm yöntemi [35] (Sound insulation test rooms and the measurement method)

Tablo 2. R_w ve Doğruluk değerlerinin dört farklı model için hesaplanması
(Value of R_w and Accuracy in 4 different models)

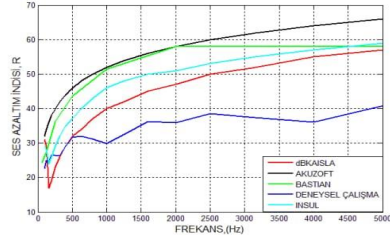
İTÜ DENEYSSEL	0,19 m kalınlığında sıvasız düşey delikli hafif tuğla duvar					0,19 m kalınlığında sıvasız yatay delikli hafif tuğla duvar				
Modeller	E	D	A	B	I	E	D	A	B	I
$R_w (C;C_{tr})$	40 (-1;-3)	39 (0;-2)	41 (-4;-5)	48 (-1;-6)	44 (-1;-3)	43 (-1;-3)	36 (-1;-3)	36 (-1;-3)	46 (-1;-5)	41 (-1;-3)
Doğruluk (%)	100	97,5	97,5	80	90	100	83,7	83,7	93	95,3
İTÜ ve ISO DENEYSSEL	0,2 m kalınlığında sıvasız gaz beton duvar					0,12 m kalınlığında beton duvar				
Modeller	E	D	A	B	I	E	D	A	B	I
$R_w (C;C_{tr})$	33 (-1;-3)	35 (-2;-5)	50 (-1;-5)	46 (-1;-5)	41 (-1;-5)	49 (-1;-5)	41 (0;-3)	59 (-1;-5)	58 (-2;-8)	51 (-1;-4)
Doğruluk (%)	100	93,9	48,5	60,6	75,7	100	83,6	79,6	81,6	95,9
ISO DENEYSSEL	0,26 m kalınlığında beton duvar					0,11 m kalınlığında Ca- Si duvar				
Modeller	E	D	A	B	I	E	D	A	B	I
$R_w (C;C_{tr})$	61 (-1;-6)	49 (-2;-6)	53 (-5;11)	72 (-2;-7)	63 (-2;-6)	49 (-1;-4)	43 (-1;-4)	44 (-4;-6)	47 (-2;-6)	48 (-1;-3)
Doğruluk (%)	100	80,3	86,8	81,9	96,7	100	87,7	89,8	95,9	97,9
ISO DENEYSSEL	0,24 m kalınlığında Ca-Si duvar					0,12 m kalınlığında hafif kütleli beton duvar				
Modeller	E	D	A	B	I	E	D	A	B	I
$R_w (C;C_{tr})$	49 (-1;-6)	49 (-2;-6)	51 (-3;-8)	59 (-2;-7)	58 (-1;-5)	49 (-1;-3)	41 (0;-3)	59 (-1;-5)	47 (-1;-6)	51 (-1;-4)
Doğruluk (%)	100	100	95,9	79,5	81,6	100	83,6	79,5	95,9	95,9
ISO DENEYSSEL	0,1 m kalınlığında gaz beton duvar					0,2 m kalınlığında gaz beton duvar				
Modeller	E	D	A	B	I	E	D	A	B	I
$R_w (C;C_{tr})$	49 (0;-1)	34 (-1;-3)	34 (-1;-3)	41 (-1;-4)	37 (0;-2)	49 (-1;-3)	37 (-1;-5)	38 (-1;-4)	48 (-2;-7)	43 (-1;-4)
Doğruluk (%)	100	69,3	69,3	83,6	75,5	100	75,5	77,5	97,9	87,7
YTU DENEYSSEL	0,013 m kalınlığında alçı panel duvar									
Modeller	E	D	A	B	I					
$R_w (C;C_{tr})$	27 (-1;-3)	26 (-4;-3)	27 (-3;-4)	34 (0;-2)	26 (-1;-2)					
Doğruluk (%)	100	96,2	100	74	96,2					



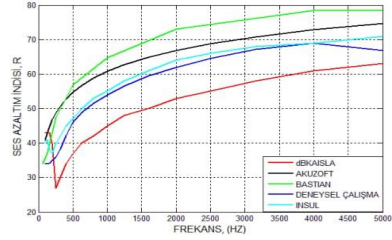
0.19 m kalınlığında sıvasız düşey delikli hafif tuğla duvar



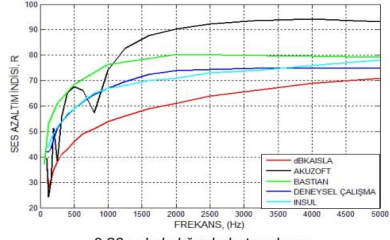
0.19 m kalınlığında sıvasız yatay delikli hafif tuğla duvar



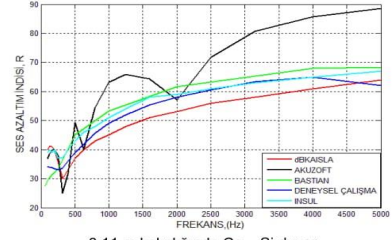
0.2 m kalınlığında sıvasız gaz beton



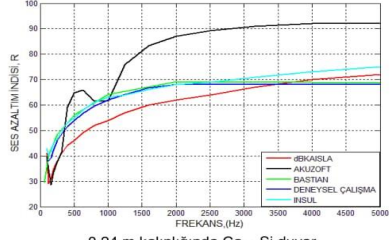
0.12 m kalınlığında beton duvar



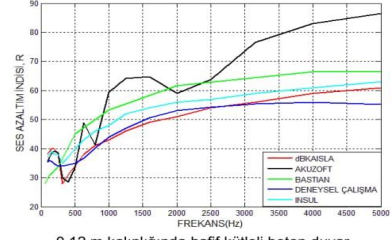
0.26 m kalınlığında beton duvar



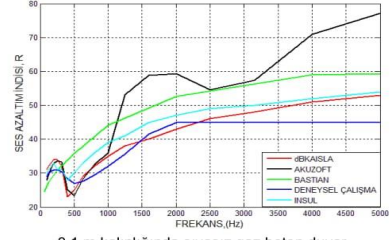
0.11 m kalınlığında Ca – Si duvar



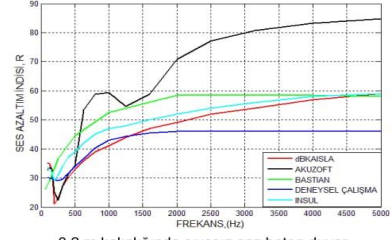
0.24 m kalınlığında Ca – Si duvar



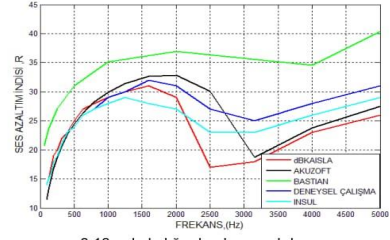
0.12 m kalınlığında hafif kütleli beton duvar



0.1 m kalınlığında sıvasız gaz beton duvar



0.2 m kalınlığında sıvasız gaz beton duvar



0.13 m kalınlığında alçı panel duvar

Şekil 3. Yapı malzemelerinin frekansa karşılık gelen R değerleri (Corresponds to the frequency of R in building materials)

Tablo 3. Modellerin malzemeler üzerindeki etkinlik sıralaması (The order of the models' effect on the materials)

Malzemeler	Modellerin malzemeler üzerindeki etkinlik sırası (etkisi en çok olandan en aza)
0,19 m kalınlığında sıvasız düşey delikli hafif tuğla duvar	D, A, I, B
0,19 m kalınlığında sıvasız yatay delikli hafif tuğla duvar	I, B, A, D
0,2 m kalınlığında sıvasız gaz beton duvar	D, I, B, A
0,12 m kalınlığında beton duvar	I, D, B, A
0,26 m kalınlığında beton duvar	I, A, B, D
0,11 m kalınlığında Ca-Si duvar	I, B, A, D
0,24 m kalınlığında Ca-Si duvar	D, A, I, B
0,12 m kalınlığında hafif kütleli beton duvar	B, I, D, A
0,1 m kalınlığında gaz beton duvar	B, I, A, D
0,2 m kalınlığında gaz beton duvar	B, I, A, D
0,013m kalınlığında alçı panel duvar	A, I, D, B

Eşitlikte R_w , simülasyonlar sonucu R değerlerine bağlı olarak bulunan "Ağırlıklı ses azaltım indisini" gösterir ve ISO 717-1'de verilen metoda göre, kaydırma yapıldıktan sonra 500 Hz'de referans eğrisinin desibel cinsinden değeridir. R'_w , ise araştırmacılar tarafından yapılan deneysel çalışmalar sonucu ISO 717-1'e göre bulunan ağırlıklı ses azaltım indisini olup Tablo 2'deki E değerine karşılık gelmektedir. Ayrıca 11 farklı malzeme için hesaplanan doğruluk değerlerinin ortalaması da alınarak her modelin hangi malzemede daha başarılı olduğu belirlenmiş, bu sayede en etkili model tespit edilmiştir.

$$\text{Doğruluk}(\%) = 1 - \left| \frac{R'_w - R_w}{R'_w} \right| \quad (13)$$

Yukarıdaki grafiklerde yatay eksen frekansı, düşey eksen R değerini göstermektedir. 1/3 oktav band frekans değerleri olan 100 Hz - 4000 Hz arasındaki değerlerin her biri için gösterilen R değerleri malzemelerin performansı ile ilgili bilgi vermektedir. Kullanılan her malzeme için karşılaştırma amacıyla tek sayılı değer olarak hesaplanan R_w ve deneysel veriye yakınlığını tespit etmek için hesaplanan "doğruluk" değerleri, kullanılan ses yalıtım modellerinin etkinliği hakkında bilgi vermektedir. Deneysel sonuçta yakınlık ve uzaklık açısından R_w değeri dikkate alındığında Insul ve dBKAisla modellerinin, Bastian ve Akuzoft modellerine göre daha etkili olduğu görülmektedir. Ayrıca her modelin malzemeler üzerindeki etkinlikleri sırasıyla Tablo 3'de verilmiştir. Kullanılan ses yalıtım modelleri arasında özellikle ticari yazılımlar olan Insul ve dBKAisla modelleri, elde edilen sonuçlar itibarıyla oldukça başarılıdır. MATLAB ortamında geliştirilmiş olan Bastian ve Akuzoft modellerinin ise ticari programlara yakın sonuçlar vermekte, geliştirilmeleri halinde ise daha etkili sonuçlar verebileceği düşünülmektedir.

Akuzoft modelinin doğruluk oranı, Insul ve dBKAisla modelleriyle karşılaştırıldığında daha düşüktür. Akuzoft modeliyle bulunan sonuçların deneysel değerlere nispeten uzak olmasının nedeni, ses geçiş katsayısının hesaplanmasına ilişkin oluşturduğu eşitlikte, ses yankısının olmaması durumu için kabul ettiği integral sınır değerlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bir malzemeye ait R_w değerlerinin belirlenmesi, malzemenin ses yalıtım performansını ölçmek için en temel analizlerdendir. Kullanılan malzemelerin ses yalıtımı açısından etkisi, ilgili standartlarda verilen şartları sağlamasına ve R_w değerinin yüksek olmasına bağlıdır. Bir malzemenin R_w değerinin yüksekliği ses yalıtımı açısından başarılı olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada, daha önceden geliştirilmiş, literatürde var olan dört farklı ses yalıtım modeli kullanılarak farklı tipteki yapı malzemelerinin ses yalıtım değerlerinin tespit edilmesi sonucu, modellerin doğruluğu ölçülmüş, simülasyonun deneysel çalışmalara göre etkinliği belirlenmiştir. Modellerin doğruluğunun hesaplanmasında ise her modelin R_w değerinin, deneysel çalışma sonucu daha önceden bilinen R_w değerine oranı kullanılmıştır. Modellerin doğruluk hesabı yapılırken de her model için 11 malzemeye ait doğruluk değerlerinin ortalaması alınarak modellerin doğruluk yüzdesi belirlenmiştir. Aşağıda sonuçları verilen bu çalışmadan elde edilen verilerin gelecek çalışmalara ışık tutması hedeflenmektedir.

R_w değerleri frekans bazında karşılaştırıldığında, bir malzemenin R_w değerleri ne kadar büyükse, sağladığı ses yalıtımı da o kadar büyük olmaktadır. Yapılan karşılaştırmalar, kullanılan modeller (simülasyon) ile deneysel veriler arasında olduğundan, deneysel verinin R_w değerine en yakın olan model, ses yalıtımı açısından en etkili olmaktadır. Deneysel veriler sonucunda elde edilen R_w değerlerine bağlı olarak 11 adet malzeme için modellerin doğruluklarının ortalaması karşılaştırıldığında sırasıyla Insul modeli %90, dBKAisla modeli %86, Bastian modeli %84 ve Akuzoft modeli %82 seviyesindedir.

Malzemelere ait R ve R_w değerlerinin bulunmasında kullanılan her parametre, yapılan çalışmanın sonucunu etkilemektedir, bu da yapılacak yeni çalışmalarda kullanılacak olan parametrelerin seçiminde büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada sadece 11 adet R ve R_w değerleri deneyler sonucunda saptanmış malzemelerin doğruluk analizi yapılmıştır. İleriki çalışmalarda malzeme sayılarının artırılması ve modellerin malzeme üzerindeki etkilerinin daha fazla araştırılması, modellerin deneysel

sonuçlara göre etkinliğini tespit etmekte fayda sağlayacaktır. Ayrıca gelecekte bu çalışmada kullanılan Insul, dBKAisla, Bastian ve Akuzoft modellerini bir arada bulunduracak bir ara yüz programının geliştirilmesi planlanmaktadır. Yapılan bu çalışma tek paneller için uygulanmış olup çok katmanlı ve kompozit paneller için yapılacak çalışmaların ön hazırlığı niteliğindedir.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

R	Ses azaltım indisi
R_w	Ağırlıklı ses azaltım indisi
R'_w	Deneyler sonucu bulunmuş ağırlıklı ses azaltım indisi
ISO 12354-1	Türk Standartları Enstitüsü 12354-1 numaralı standart
ISO 10140	Türk Standartları Enstitüsü 10140 numaralı standart
ISO 717	Yapılarda ve yapı elemanlarında ses yalıtımının değerlendirilmesi
YTÜ	Yıldız Teknik Üniversitesi
İTÜ	İstanbul Teknik Üniversitesi
t	İlgili panelin kalınlığı
c_0	Ses dalgasının havadaki hızı
η_{tot}	Toplam kayıp faktörü
σ ve σ_f	Serbest eğilme dalgaları için radyasyon faktörleri
C	ISO 717-1'e göre spektrum uyarlama terimi 1
C_{tr}	ISO 717-1'e göre spektrum uyarlama terimi 2
C_L	Boyuna dalga hızı
l_1, l_2	Eleman kenar boyutları
m'	Birim alanın kütlesi
f	Sesin frekansı
f_c	Kritik frekans
ρ	Yoğunluk
m	Kalınlık
m'	Yüzey kütlesi
p	Porozite
η_{int}	İç kayıp faktörü
E	Elastisite Modülü
ρ_0	Havanın Yoğunluğu
c	Sesin havadaki hızı
ω	Açısal Frekans
τ	Ses azaltım katsayısı
ρ_s	Malzemenin yüzey yoğunluğu
B	Malzemenin eğilme sertliği
α	Sesin engele geliş açısı
η	İç kayıp faktörü
K	Yaklaşık değeri 1,8 olan katsayı
h	Malzemenin kalınlığı
ρ_0	Poisson oranı
Hz	Hertz

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Çengel A.C., Heat transfer a practical approach, McGraw-Hill, 2003.
2. ISO 12354-1, Building acoustics-Estimation of acoustic performance of buildings from the

performance of elements-Part 1: Airborne sound insulation between rooms, 2015.

3. ISO 717-1, Acoustics-Rating of sound insulation in buildings and of building elements-Part 1: Airborne sound insulation, 2013.
4. Demirkale S.Y., Yapı Elemanlarında Ses Yalıtımının Değerlendirilmesi, Yapıda Yalıtım Konferansı Bildiriler Kitabı, TMMOB Makine Mühendisliği, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Ocak, 41-53, 1999.
5. Demirkale S.Y., Yapı Elemanlarında Sesin Yayılması, Çeşitli Duvarların Ses Geçiş Kaybı Değerlerinin Karşılaştırılması, Rapor, İTÜ Mimarlık Fakültesi, Ocak, 2008.
6. Çay H., TS EN 12354-1 ve TS EN ISO 140-4 Standartlarının Karşılaştırılması: İstanbul'da Bir Konut Örneği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014.
7. İliş İ.A., 2005, Yapı Elemanlarında Hava İle Yayılan Sesin EN ve ISO Standartlarına Göre Değerlendirilmesi İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005.
8. Demirkale S.Y., Çevre ve Yapı Akustiği, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2007.
9. Dym C.L., Lang M.A., Transmission of sound through sandwich panels, The Journal of the Acoustical Society of America, 56, 1523, 1974.
10. Ford R.D., Lord P., Walker A.W., Sound transmission through sandwich constructions, Journal of Sound and Vibration, 5 (1), 9-21, Ocak, 1967.
11. Smolenski C.P., Krokosky E.M., Dilatational-mode sound transmission in sandwich panels, The Journal of the Acoustical Society of America, 54, 1449, Temmuz, 1973.
12. Rahbari R., Sound transmission through single walls, Master's thesis, Ortadogu Teknik Üniversitesi, 1995.
13. Homsı E.N., Acoustical characterization and parameter optimization of polymeric noise control materials, Ph.D. dissertation, New Jersey Institute of Technology, 2003.
14. Tadeu A., Anto'nio J., Mateus D., Sound Insulation provided by single and double panel walls-a comparison of analytical solutions versus experimental results, University of Coimbra, Department of Civil Engineering, Polo II-Pinhal de Marrocos, 64 (1), 15-29, Ocak, 2003.
15. Cambridge J.E., An evaluation of various sound insulation programs and their use in the design of silent rooms, Master's Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2006.
16. Ilgun A., Cogurcu M.T., Ozdemir C., Kalipci E., Sahinkaya S., Determination of sound transfer coefficient of boron added waste cellulosic and paper mixture panels, Sci. Res. Essays, 5 (12), 1530-1535, 2010.
17. Ratnieks J., Jakovics A., Klavins J., Mathematical Model for Prediction of Transmission Loss for Clay Brick Walls, Comsol Conference, Stuttgart, 2012.

18. Ratnieks J., Jakovics A., Klavins J., Development of Mathematical Model for Determining Sound Reduction Index of Building Elements, Comsol Conference, Stuttgart, 2011.
19. ISO 10140-1, Acoustics-Laboratory measurement of sound insulation of building elements-Part 1: Application rules for specific products, 2010.
20. ISO 10140-5, Acoustics-Laboratory measurement of sound insulation of building elements-Part 5: Requirements for test facilities and equipment, 2010.
21. Papadopoulos C.I., Development of an optimized standard-compliant procedure to calculate sound transmission loss: Numerical measurements, Applied Acoustics, 64 (11), 1069-1085, Kasım, 2003.
22. Del Coz Diaz J.J., et.al., 2010, Sound transmission loss analysis through a multilayer lightweight concrete hollow brick wall by FEM and experimental validation, Building and Environment, 45 (11), 2373-2386, Kasım, 2010.
23. Dym C.L., Lang M.A., Transmission of sound through sandwich panels, The Journal of the Acoustical Society of America, 56, 1523, 1974.
24. Ljunggren S., Airborne sound Insulation of thin walls, The Journal of the Acoustical Society of America, 89, 2324, Mart, 1991.
25. Kurra S., Comparison of the models predicting sound insulation values of multilayered building elements, Applied Acoustics, 73 (6-7), 575-589, 2012.
26. Ballagh K.O., Accuracy of prediction methods for sound transmission loss, in The 33rd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, 2004.
27. Josse R., Lamure J., Transmission du son par uneparoi simple, Acustica, 14 (5), 266-280, 1964.
28. Marco A.A.B., Diseño E Implementación De Una Aplicación Computacional Para El Modelado De Soluciones Acústicas, Master's Thesis, Universidad Austral De Chile Facultad De Ciencias De La Ingeniería Escuela De Ingeniería Civil Acústica Valdivia, Chile, 2010.
29. Aksoylu C. Yapılardaki ses izolasyonunun bilgisayar ortamında simülasyonu, Yüksek lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2014.
30. Ljunggren S., Airborne sound Insulation of thin walls, The Journal of the Acoustical Society of America, 89, 2324, Mart, 1991.
31. Cremer L., Heckel M., Ungar E.E., Structureborne Sound Springer Verlag, 1988.
32. Rindel J.H., Sound Radiation from Building Structures and Acoustical Properties of Thick Plates. COMETT-SAVOIR Course Notes, CSTB Grenoble.
33. Aksoylu C., Mendi Ş.E., Arslan M.H., A Comparative Study on Sound Insulation in Buildings, 11'th International Congress on Advances in Civil Engineering (ACE 2014), İTÜ, 21-25 Ekim, 2014.
34. Yavuz A., Ses Kayıt Stüdyosu Tasarımı ve Mimari Akustik, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
35. Bayazıt N.T., 19 ve 29 cm'lik Poncebloc Hafif Yapı Elemanı Ses Azalma indisi Ölçümü Ön raporu, İTÜ Mimarlık Fakültesi Yapı Bilgisi ABD, 2014.
36. Karşılaştırmalı Doğrulamalar www.csiberkeley.com. Yayın tarihi 2003. Erişim tarihi Nisan 15, 2013.