

## Fononik Kristal Kaplama ile Gösteri Salonlarında Akustik Yalıtımın Sayısal İncelenmesi

Nurettin KÖRÖZLÜ\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Nanobilim ve Nanoteknoloji Bölümü, 15030, Burdur

(Alınış / Received: 17.08.2016, Kabul / Accepted: 07.04.2017,  
Online Yayınlanma / Published Online: 02.05.2017)

**Anahtar Kelimeler**  
Akustik yalıtım,  
Fononik kristal,  
Yüzey kipi, Sonlu  
Elemanlar  
Yöntemi

**Özet:** Periyodik üçgenel ahşap çıkıntılardan oluşan fononik kristal ile duvarların kaplanması ses yalıtımına katkı sağlayacağı sayısal hesaplarla gösterilmiştir. Ses yalıtımı fononik kristalin yüzey kipleri ile gerçekleştirilmektedir. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile yürütülen band yapısı hesapları fononik kristal periyodu 25 cm, ahşap et kalınlığı 15 mm ve üçgen tepe açısı 60 derece iken tepe frekansı 553 Hz olan yüzey bandını göstermektedir. Yüzey kiplerinin üçgenler arasındaki düzlüklerde yerleştiği yüzey bandı 440 Hz frekansındaki akort notasını kapsamaktadır. Durağan Sonlu Elemanlar analizleri yaklaşık olarak 300 Hz ile 550 Hz arasında yüzey ile küçük açılar yaparak gelen düzlem dalgaların az yansıma ile ve saçılmadan yüzeyde kılavuzlanabildiğini göstermiştir. Kılavuzlama 440 Hz frekansında 30 dereceye kadar olan geliş açılarında sağlanabilmektedir.

## Numerical Investigation of Acoustic Isolation in Performance Halls through Covering with Phononic Crystals

**Keywords**  
Acoustic isolation,  
Phononic crystal,  
surface mode,  
Finite Element  
Method

**Abstract:** Sound isolation via covering walls with phononic crystal composed of periodic triangular wooden protrusions is demonstrated through numerical calculations. Sound isolation is achieved by surface modes of the phononic crystal. Band structure calculations through the Finite Element Method revealed a surface band with a maximum of 553 Hz when the periodicity, wall thickness and triangle apex angle are 25 cm, 15 mm and 60 degrees, respectively. Surface band the modes of which are localized in the flat regions between triangles covers the accord frequency at 440 Hz. Stationary Finite Element analyses demonstrate that plane waves with frequency between approximately 300 Hz and 550 Hz incident at small angles with the surface can be guided over the surface with low reflection and scattering. Guiding at 440 Hz can be achieved up to 30 degrees angle of incidence.

\*Sorumlu yazar: nkorozlu@mehmetakif.edu.tr

## 1. Giriş

Konser salonu ve tiyatro salonu gibi ortamlarda ses yalıtımı büyük önem taşımaktadır [1]. Ses yalıtımı denilince ilk akla gelen malzemeler arasında fononik kristallerde yer alır. Fononik kristal yoğunluk ve ses hızı gibi akustik özellikleri bir, iki veya üç boyutta periyodik değişen yapay malzemelerdir [2]. Fononik kristaller ile ses yalıtımı akustik dalgaların kristal boyunca iletilmeyip yansıtıldığı frekans aralıklarını ifade eden band aralıkları sayesinde gerçekleştirilmektedir [3-6]. Band aralığı özelliği sayesinde duyulabilir ses bölgesinde ağaçların periyodik dizilimi ile yerleşim yerlerinde çevresel gürültünün azaltılması sağlanmaktadır [7]. Ayrıca katı arka planda periyodik katı ya da sıvı saçıcılardan oluşan fononik kristaller ile ultrases frekanslarında yalıtım da gösterilmiştir [8, 9]. Son yıllarda radyo frekanslı uygulamalar için gigahertz mertebesinde frekanslarda band aralığı sergileyen hipersonik fononik kristaller üzerine çalışmalar da yapılmaya başlanmıştır [10, 11]. Ayrıca güncel uygulamalardan biri de Silisyum ve Germanyum gibi yarıiletken malzemelerde periyodik modülasyon ile akustik fononlar için band aralığı oluşturarak malzemenin ısı iletilenliğinin düşürüldüğü termokristaller olarak adlandırılan yapılardır [12-14].

Fononik kristallerde periyodikliğin bozulması ile de önemli uygulamalar elde edilebilmektedir. Örneğin iki boyutlu bir fononik kristalde saçıcılardan bir sıra uzaklaştırıldığında oluşan boşlukta akustik dalgaların kılavuzlanması sağlanmaktadır [6, 15-18]. Ayrıca fononik kristal dalga kılavuzlarının dik açılı keskin bükümlerinde az kayıplı iletim sağlandığından bu tür yapılarda karmaşık yörüngelerde akustik dalga iletimi de gösterilmiştir [19]. Sayılan bu özellikler fononik kristal band aralığında

çizgisel kusur nedeniyle ortaya çıkan kusur durumları sayesinde elde edilmektedir. Çizgisel kusurların yanı sıra fononik kristalde yalnızca bir saçıcının uzaklaştırılması ya da geometrik ve/veya malzeme özelliklerinin değiştirilmesi ile nokta kusurlar da elde edilebilmektedir [20, 21].

Fononik kristal band aralığında yerleşmiş kip türlerinden biri de sonlu ölçülerdeki fononik kristal ile çevreleyen ortam arakesitinde ortaya çıkan yüzey kipleridir. Fononik kristal yüzey kipleri ilk olarak Zhao vd. tarafından hava ortamında periyodik çelik çubuklardan oluşan yapı için süper hücre hesapları ile sayısal olarak gösterilmiştir [22]. Daha sonra Jia vd. su ortamında çelik çubuklardan oluşan fononik kristal için megahertz mertebesindeki frekanslarda yüzey dalgalarının düzlemsel dalgalarla ve noktasal kaynakla uyarılmasını deneysel olarak göstermiştir [23]. Çiçek vd. ise hava ortamında kare örgü düzeninde dizili iki boyutlu fononik kristalde yüzey kiplerinin havadan gelen düzlem dalgalarla uyarılma ve kılavuzlanma özelliklerini deneysel olarak incelemiştir [24]. Çiçek vd. ayrıca sonlu boyuttaki fononik kristalin köşesine bir saçıcı yerleştirilerek uyarılan yüzey dalgalarının 90 derecelik keskin bükümler boyunca az kayıpla iletilebildiğini göstermiştir [25]. Bunun yanı sıra iki fononik kristal yüzeyi birbirlerine yaklaştırıldığında frekansa ve aradaki mesafeye bağlı olarak fononik kristallerin birinde uyarılan yüzey modu diğerine atlayabilmektedir. Bu iki fononik kristal yüzeyinin çıkışlarındaki akustik alan ölçülerek değişik algılayıcılar yapılabilir. Örneğin Doppler etkisinden yararlanılarak ultrasonik frekanslarda hız ölçümü önerilmiştir [26]. Ayrıca birbirine komşu bir çizgisel kılavuz ve yüzey arasında kip geçişleri göz önünde bulundurularak da benzer algılayıcılar öngörülmüştür [27].

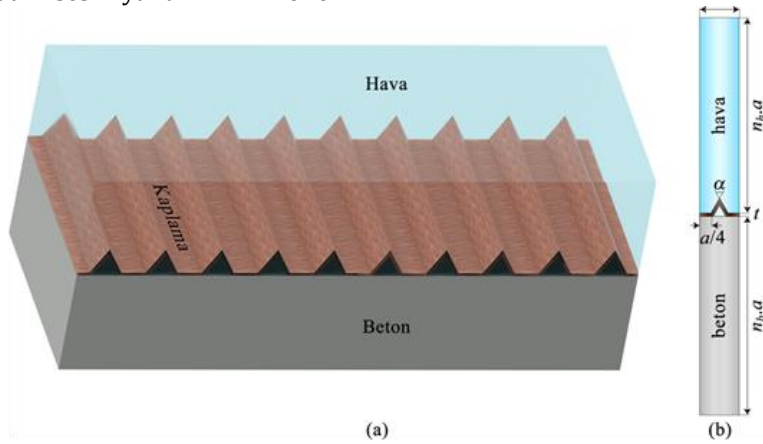
Yukarıda bahsedildiği gibi fononik kristal yüzey kiplerinde akustik enerji yüzeye örgü sabiti mertebesinde bir ölçekte yerleştiğinden bu kiplerin düz yüzeylerden akustik dalgaların yansımalarının ya da saçılmasının önlenmesinde kullanılması öngörülebilir.

Bu çalışmada gösteri salonları gibi kapalı ortamların duvarlarından ses yansıtıcılığının ve saçılmasının azaltılması için fononik kristallerin kullanımının etkisi üzerinde durulmuştur. Pratik uygulamalar da göz önünde bulundurularak fononik kristal tasarımında bir beton duvar üzerinde bir boyutta periyodik ahşap çıkıntılar incelenmiştir. Çıkıntıların periyodu ve et kalınlığı gibi geometrik parametrelerine bağlı optimizasyon yapılarak 100 Hz mertebesindeki düşük frekanslar için ses yalıtımı incelenmiştir. Yalıtım fononik kristalin yüzey kiplerinin uyarılıp duvara yakın yerleşerek kılavuzlanmaları ile sağlanmaktadır. Fononik kristallerin yüzey kiplerinin eldesi ve ses yalıtım özelliklerinin incelenmesinde Sonlu Elemanlar Yönteminden yararlanılmıştır. Bu çalışma gösteri salonları gibi ortamlarda ses yalıtımının fononik

kristaller kullanılarak pratik biçimde sağlanmasına yönelik yapılacak uygulamalı çalışmalara rehber olacaktır.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada incelenen yapı Şekil 1(a)'da görülmektedir. Burada hava içeren bir odadaki bir beton duvarın yüzeyi periyodik üçgenel çıkıntılar içeren ahşap kaplama ile kaplıdır. Bu kaplama beton yüzeyinde bir boyutlu fononik kristal oluşturmaktadır. Çıkıntılarının altında kalan üçgenel bölge hava boşluğudur. Uygun periyodikliğin (örgü sabiti,  $a$ ), ahşap kalınlığının ( $t$ ) ve üçgen tepe açısının ( $\alpha$ ) fonksiyonu olarak akort notası (ya da standart nota) olarak bilinen  $f=440$  Hz frekansındaki Re (ya da A4) notasını kaplayan 200-600 Hz aralığında ses dalgalarının fononik kristal ile kaplı olan ve olmayan duvardan yansıma özellikleri incelenmiştir. Fononik kristal ile kaplamanın beton duvar ile hava ara kesitinde akustik yüzey dalgalarını uyararak kılavuzlama sağlanması ve duvarın ses yansıtıcılığını azaltması beklenmektedir [24].



**Şekil 1.** Periyodik ahşap kaplama içeren fononik kristalin şematik görünümü (a) ve band yapısı hesaplarında kullanılan birim hücre (b).

Bragg kırınımı göz önünde bulundurulduğunda örgü sabitinin sesin dalga boyunun (örneğin 440 Hz için havada yaklaşık olarak  $\lambda=78$  cm) kesri

olması beklenir. Çalışmada uygun fononik kristal geometrik parametreleri sonlu elemanlar yöntemine (Finite Element Method, FEM) dayalı band yapısı

hesapları ile belirlenmiştir. Hesaplar için Şekil 1(b)'de gösterilen 1 boyutlu birim hücre kullanılmıştır. Düzleme dik ( $z$ ) eksenindeki süreklilikten dolayı bütün hesaplamalar iki boyutta yürütülmüştür. Burada periyodiklik ( $x$ ) eksenine dik sınırlar Floquet-Bloch periyodik sınır koşulları ile birbirine ilişkilendirilmiştir [24]. Bu koşullar altında  $p(x,y)$  hava bölgesindeki akustik basınç alanı olmak üzere birim hücrenin sağ (R) ve sol (L) kenarları arasındaki ilişki

$$p_R(x, y) = p_L(x, y) \cdot e^{ik_x a} \cdot e^{ik_y a} \quad (1)$$

şeklinde yazılabilir [28]. Burada  $k_x$  ve  $k_y$  dalga vektörünün dik bileşenleridir. Band yapısı hesaplarında  $k_y=0$  alınarak  $k_x$  bileşeni 0 ile  $\pi/a$  arasında değiştirilip fononik kristal yüzeyinin indirgenmiş band yapısı elde edilmiştir [24]. Şekil 1(b)'deki birim hücrede beton blok  $n_b$ , hava katmanı da  $n_h$  örgü sabiti kalınlığındadır. Band yapısı hesaplarında Çizelge-1'de verilen  $n_b=n_h=5$  değerlerinde yakınsama gözlenmiştir. Bu nedenle  $\alpha$  tepe açısı için band yapısı hesaplarında bu değerler kullanılmıştır.

**Tablo 1.** FEM simülasyonlarında kullanılan geometrik ve fiziksel parametreler.

Parametre (Birim)	Açıklama	Değer
$a$ (cm)	Örgü sabiti	25
$t$ (cm)	Ahşap kalınlığı	1.5
$\alpha$ (°)	Tepe açısı	60-90
$n_b$	Katı birim hücre sayısı	5 (band) – 8 (simülasyon)
$n_h$	Hava birim hücre sayısı	5 (band) – 3 (simülasyon)
$f$ (Hz)	Frekans	200-600
$\theta$ (°)	Kaynak geliş açısı	5-60
$c_h$ (m/s)	Havada ses hızı	343 <sup>a</sup>
$\rho_h$ (kg/m <sup>3</sup> )	Havanın yoğunluğu	1.21 <sup>a</sup>
$E_b$ (GPa)	Betonun Young modülü	25 <sup>b</sup>
$\nu_b$	Betonun Poisson oranı	0.33 <sup>b</sup>
$\rho_b$ (kg/m <sup>3</sup> )	Betonun yoğunluğu	2300 <sup>b</sup>
$E_c$ (GPa)	Çamın Young modülü	0.32 <sup>b</sup>
$\nu_c$	Çamın Poisson oranı	0.347 <sup>b</sup>
$\rho_c$ (kg/m <sup>3</sup> )	Çamın yoğunluğu	482 <sup>b</sup>

<sup>a</sup>Çiçek vd. [24], <sup>b</sup>COMSOL MultiPhysics Malzeme Kütüphanesindeki ilgili referanslar.

FEM kullanılarak hem band yapısı hesaplarında hem de durağan simülasyonlarda Şekil 1(a) ve (b)'de görüldüğü gibi akışkan olan hava ortamı ve katı çam kaplama ve beton duvar bulunmaktadır. Hava ortamı yalnızca boyuna akustik dalgaları desteklerken, katı malzemelerde enine dalgaların uyarılması da söz konusu olmaktadır [29]. Bu nedenle hava ortamı için problemin çözümünde sadece boyuna dalgaları içeren aşağıdaki Helmholtz tipi

diferansiyel denklemin çözümü aranmaktadır [29];

$$\Delta \cdot \left( \frac{1}{\rho_h} \Delta p(x, y) \right) + \frac{\omega^2 p(x, y)}{\rho_h c_h^2} = 0; \Omega_h \text{ üzerinde} \quad (2)$$

Burada  $\Omega_h$  hesaplama uzayının hava içeren akışkan kısmını ifade etmekte olup  $\rho_h$  ve  $c_h$  da sırasıyla havanın yoğunluğu ve havada ses hızıdır. Hesaplamalarda kullanılan değerler

Tablo-1’de verilmiştir. Eşitlik (2)’de  $\omega$  ise açılmal frekanstır ( $\omega=2\pi f$ ). Ayrıca Eşitlik (2)’de basınç alanının harmonik olduğu varsayılmıştır:  $p(x,y,t)=p(x,y)e^{-i\omega t}$ .

Hesaplamalarda katı bölgelerin formülasyonunda ise elastik dalga denkleminin çözümü aranmaktadır [29]:

$$\nabla \cdot \sigma = -\rho_k \omega^2 \mathbf{u}; \Omega_k \text{ üzerinde} \quad (3)$$

Bu eşitlikte  $\sigma$  ve  $\mathbf{u}$  sırasıyla Cauchy gerilme tensörü ve katı içerisinde atomların yer değiştirme vektörüdür. Eşitlik (3)’te  $\rho_k$  ise katının yoğunluğudur. Çam ( $\rho_c$ ) ve beton ( $\rho_b$ ) için yoğunluk değerleri Tablo-1’de verilmiştir. Eşitlik (3)’ün çözümü için gerekli diğer girdiler ise Young modülü ( $E$ ) ve Poisson oranından ( $\nu$ ) oluşan elastik sabitlerdir. Çam ve beton için çalışmada kullanılan Young modülü (sırasıyla  $E_c$  ve  $E_b$ ) ve Poisson oranı (sırasıyla  $\nu_c$  ve  $\nu_b$ ) değerleri Tablo-1’de verilmiştir. Son olarak, Eşitlik (3)’teki  $\Omega_k$  hesaplama uzayının katı bölgesini ifade etmektedir. FEM hesapları Eşitlik (2) ve (3)’ün bir arada çözüldüğü karışık bir formülasyon içermektedir.

FEM modellerinde hava ve katı ortamların bir arada incelenmesi bu ortamların ara kesitinde sınır koşullarının doğru tanımlanmasını gerektirmektedir. Örneğin hava ortamındaki basınç değişimleri hemen yanındaki katı ortamında yüzey atomlarında yer değiştirmeye sebep olurken, katı ortamındaki elastik titreşimler de havada moleküllerin ivmelenmesini sağlamaktadır. Bu durumda sınır koşulları aşağıdaki gibi ifade edilir [29]:

$$\mathbf{n}_h \cdot \left( \frac{1}{\rho_h} \nabla p(x, y) \right) = a_n; \Gamma_h \text{ üzerinde} \quad (4a)$$

$$\mathbf{f}_k = -\mathbf{n}_k p(x, y); \Gamma_k \text{ üzerinde} \quad (4b)$$

Eşitlik (4a)’nın sağındaki  $\Gamma_h$  arakesitine dik  $a_n$  ivmelenmesi yukarıda belirtildiği gibi katı atomlarının yer değiştirmelerinin hava bölgesinde oluşturduğu ivmelenmedir. Buna karşılık Eşitlik (4b)’de  $p(x,y)$  basınç alanı katı atomları üzerinde yer değiştirmeye neden olan  $\mathbf{f}_k$  kuvvetini oluşturmaktadır. Eşitlik (4a) ve (4b)’de  $n_h$  ve  $n_k$  sırasıyla hava ve katı ortamlarından bakıldığında  $\Gamma_h$  ve  $\Gamma_k$  ara kesitlerine dik, ilgili arakesitten dışarı doğru yönelmiş birim vektörlerdir.

Band yapısı hesaplarından frekans dağılımı ve kip profilleri elde edilen bir boyutlu fononik kristalin duvarın yansıtıcılığına etkisi iki boyutlu durağan FEM analizleri ile incelenmiştir. FEM analizlerinde Şekil 2’deki gibi hesaplama uzayı göz önünde bulundurulmuştur. Şekil 2’de hesaplama uzayının sol kenarındaki yamuk şekilli bölge akustik kaynağı tanımlamak için kullanılmaktadır. Kaynağın genişliği  $w_{src}$  olup eğik kenarı  $\theta$  geliş açısına bağlı olarak tanımlanmaktadır. Hesaplama modelinde beton duvarın alt kenarı yer değiştirmenin ( $\mathbf{u}$ ) serbest bırakıldığı sınır koşulu ile tanımlanmıştır. Hesaplama uzayının hava sınırları ise uzayı terk eden akustik dalgaların yansımaları önleyecek şekilde az yansımalı sınır koşulu ile tanımlanmıştır. FEM simülasyonlarında  $f$  ve  $\theta$  değiştirilerek sadece beton ve fononik kristal ile kaplı duvardan sesin yansıma özellikleri incelenmiştir.

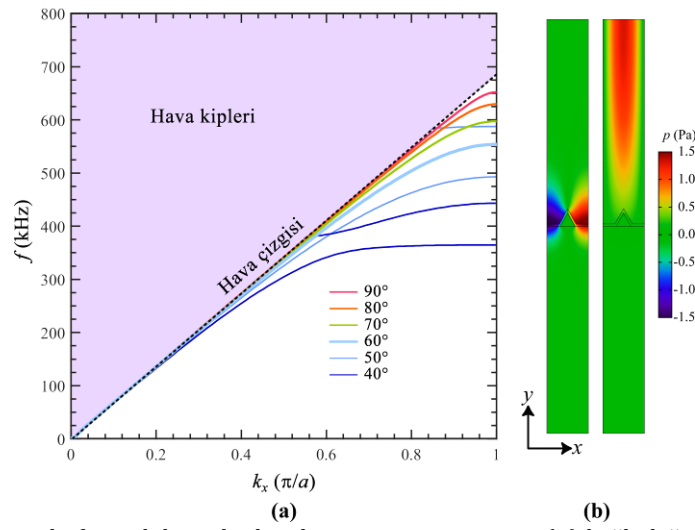
FEM band yapısı hesaplarında ve simülasyonlarında ahşap kısımlar diğer bileşenlere göre çok daha ince olduğundan uyarlamalı üçgenel kafes kullanılmıştır. Kafeslerde en büyük eleman boyutu ahşap kısımlar için  $t/4$ , hava ve beton bölgeleri için  $a/2$  olarak alınmıştır. Bu durumda band yapısı hesaplarında süper hücrede toplam 13108 üçgenel eleman üretilirken minimum eleman kalitesi de 0.69

olmaktadır. Durağan FEM simülasyonlarında ise, toplam 221803 elemana karşılık minimum eleman kalitesi 0.49 olmaktadır. Bu değerlerin her iki durumda da yakınsama sağladığı gözlenmiştir.

### 3. Bulgular

Bir boyutlu fononik kristalin Şekil 1(b)'deki birim hücre kullanılarak FEM ile hesaplanan band yapısı Şekil 2(a)'da

görülmektedir. Burada 'hava çizgisi',  $\omega=c_h.k_x$  ile ifade edilen havanın dağılım bağıntısına karşılık gelmektedir [24]. Bu çizgi üzerindeki 'hava kipleri' olarak ifade edilen taralı alan birim hücredeki hava ortamının çınlanım kipleri olup bunların yüzey kipleri ile ilgisi yoktur. Bu yüzden taralı bölgedeki kiplere yer verilmemiştir.



**Şekil 2.** Bir boyutlu fononik kristalin band yapısının tepe açısına ( $\alpha$ ) bağlı değişimi **(a)**,  $\alpha=60^\circ$  için  $k_x=\pi/a$  noktasındaki en düşük frekanslı iki kiplin profilleri **(b)**.

Şekil 2(a)'da  $a=25$  cm ve  $t=15$  mm olan bir boyutlu fononik kristalin  $\alpha$  tepe açısının  $40^\circ$  ile  $90^\circ$  arasında  $10^\circ$  adımlarla taranması ile elde edilen yüzey bandları da görülmektedir.  $\alpha=90^\circ$  iken üçgenel ahşap çıkıntı daha basık olduğundan üçgenler arasındaki düzlükte yerleşmiş sadece bir adet yüzey bandı gözlenmektedir. Bu band, yaklaşık olarak 500 Hz'e kadar olan frekanslarda hava çizgisine çok yakın seyretmekte olup bandın kiplerinin hava kiplerinden ayrıştırılması oldukça zordur. Buna karşın bandın tepe frekansı olan 652 Hz'e doğru band hava çizgisinden ayrılırken yüzey kipleri daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Bandın tepe frekansı etrafında (ya da  $k_x \pi/a$ 'ya yaklaşırken) düzleşmesi şiddetli Bragg

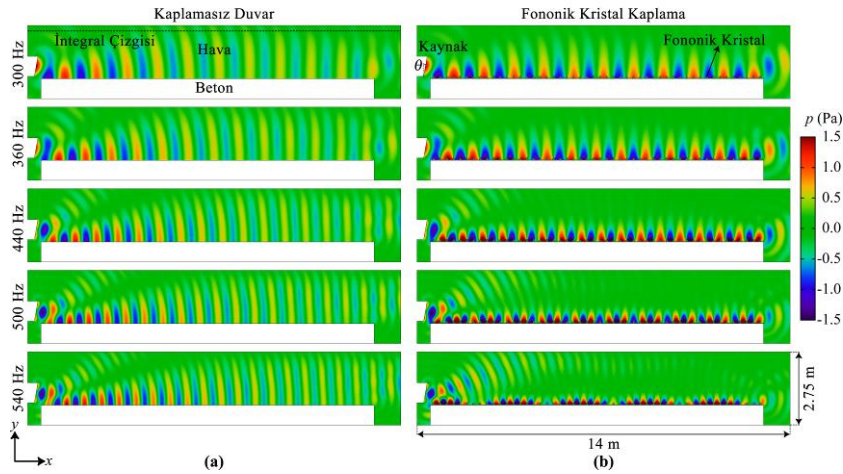
saçılmalarından kaynaklanmaktadır [22]. Şekil 2(a) incelendiğinde  $\alpha$  azaldıkça yüzey bandının hava çizgisinden daha geniş frekans aralıklarında ayrıştığı ve tepe frekansının daha düşük değerlere kaydığı gözlenmektedir. Örneğin  $\alpha=60^\circ$  iken yüzey bandının tepe frekansı  $f=553$  Hz olmaktadır. Daha düşük tepe açılarında ise ikinci bir yüzey bandı ortaya çıkmaktadır.

$\alpha=60^\circ$  fononik kristalin  $k_x=\pi/a$  noktasındaki kip profili Şekil 2(b)'de verilmiştir. Burada solda görülen kip üçgenel bölgeler arasındaki düzlüğe ve biraz da beton içerisine yerleşmiş yüzey kipidir. Fononik kristalle ses dalgalarının duvardan yansımalarının engellenmesi bu yüzey kipinin uyarılması

ile sağlanmaktadır. Buna karşın Şekil 2(b)'de sağda görülen kip hava çizgisi üzerinde kalan bir hava kipini göstermekte olup yüzey kipi değildir. Şekil 2(b)'de gösterilmemiş olmasına rağmen  $\alpha > 60^\circ$  için birinci yüzey bandının üzerinde görülen daha düz ikinci bir yüzey bandı üçgensel bölge içerisindeki hava boşluğunda yerleşmiş yüzey kiplerine karşılık gelmektedir. Komşu birim hücreler arasında bu kiplerin etkileşimi zayıf olduğundan çalışmada bu tür kipler göz önünde bulundurulmamıştır. Ancak benzer fononik kristal yapılarda bu tür kiplerin varlığı sıvı ve gaz algılayıcıları gibi uygulamalar için oldukça uygundur [26, 27]. Band yapısı hesaplarında  $t < 15$  mm iken ikinci yüzey bandının her  $\alpha$  değerinde ortaya çıktığı gözlenmiştir. Bu durumda, algılayıcı uygulamaları için ince levha türü kaplamalar kullanılarak

kip etkileşimlerinin artırılmasının sağlanması daha uygun olacağı görülmüş olur.

Yalın ve  $a=25$  cm,  $t=15$  mm,  $\alpha=60^\circ$  olan bir fononik kristal içeren beton duvardan değişik frekanslarda  $\theta=10^\circ$  geliş açısında gelen dalgaların yüzeye etkileşimi ve yansıma davranışlarının durağan FEM simülasyon sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. Burada  $\theta$  dalganın yüzey ile yaptığı açı olarak tanımlanmıştır. Şekil 3'te kaynak genişliği ise oldukça uzaktaki noktasal bir kaynağa mümkün olduğunca benzeşim sağlamak için  $w_{src}=3a$  olarak seçilmiştir [24, 25]. Kaynaktan çıkan dalgalar,  $p(\mathbf{r},t)=p_0e^{-i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}-\omega t)}$  ile ifade edilen düzlem dalgalarıdır.



Şekil 3. Değişik frekanslardaki akustik dalgaların  $\theta=10^\circ$  açı ile (a) yalın beton ve bir boyutlu fononik kristal içeren (b) duvara gelmesi sonucu davranışlarının FEM simülasyon sonuçları.

Şekil 3(a)'da yalın beton duvara gelen dalgaların bir kısmının yüzeyden yansırken bir kısmının da yüzey boyunca ilerlediği görülmektedir. Ancak, ilerleyen dalgalar sınırlı kaynak boyutu nedeniyle kırınımına uğrayarak genişlemekte ve akustik enerji, hava ortamına doğru dağılmaktadır. Bu durumda, örneğin bir konser salonunda duvara yakın dinleyiciler hem doğrudan kaynaktan

gelen hem de duvardan saçılan ses ekosunu duyacaklarından rahatsız olacaklardır.

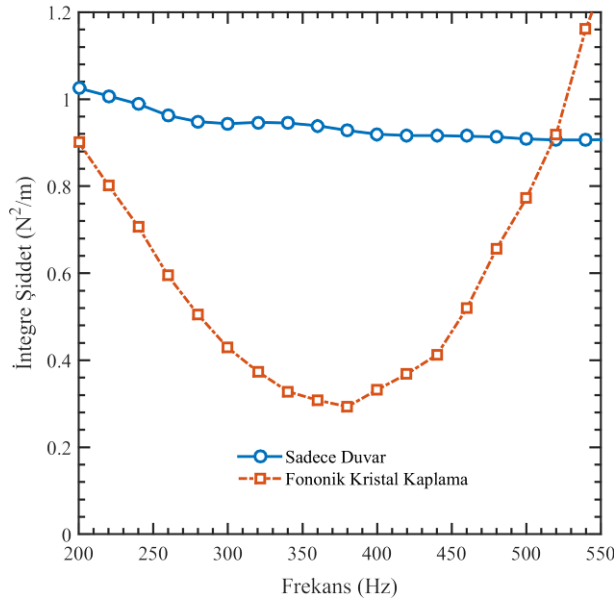
Şekil 3(b)'de bir boyutlu fononik kristal kaplamanın yerleştirilmesi ile sesin duvardan saçılma karakteristiğinin önemli ölçüde değiştiği görülmektedir. 300 Hz ile 540 Hz arasındaki tüm frekanslarda yüzey kipinin uyarılıp

akustik enerjinin yoğunluklu olarak yüzey boyunca kılavuzlandığı net olarak görülmektedir. Şekil 3(b)'de sesin duvardan yansıyan bileşeni de olmasına rağmen yansımanın önemli ölçüde azaldığı aşağıdaki tartışmalarla ortaya konulmuştur.

Ayrıca Şekil 3(b)'de, frekans arttıkça dalga boyu azaldığından ve Şekil 2(a)'da ki bandın tepe frekansına yaklaştığından yüzeydeki yerleşmenin, dolayısıyla ses yalıtımının arttığı görülmektedir. Şekil 3(b)'nin orta satırında yukarıda belirtilen 440 Hz frekansında akustik yalıtımın sağlandığı net olarak ortaya çıkmaktadır. Buna karşın en alt satırda  $f=540$  Hz frekansında yüzey dalgasının vuru davranışı sergilediği gözlenmektedir. Bu davranış Brillouin bölgesi sınırına

yaklaştıkça yüzeyde birbirine zıt yönlü dalga vektörleri ile hareket eden diğer tüm bakımlardan özdeş yüzey dalgalarının uyarılması nedeniyle meydana gelmektedir [22, 24].

Şekil 3(b)'nin en üst satırında 'integral çizgisi' olarak adlandırılan yatay kesikli çizgi duvardan akustik enerjinin hava ortamına yansımaları hesaplamak için kullanılan varsayımsal çizgiye karşılık gelmektedir. Duvarın yansıtma karakteristiği bu çizgi üzerinde akustik şiddetin bir ölçüsü olan basınç alanının mutlak değerinin karesinin ( $|p(x,y)|^2$ ) integralinin alınması ile belirlenmiştir. Şekil 4'te fononik kristal kaplamanın çalışılan frekans bölgesinde yansıtıcılığı azalttığı net olarak görülmektedir.



**Şekil 4.**  $\theta=10^\circ$  geliş açısında akustik dalgaların sadece beton bloklardan oluşan ve 1 boyutlu fononik kristal içeren duvardan yansıma özelliklerinin frekansa bağlılığı.

Fononik kristal  $f=440$  Hz için optimize edildiğinden, fononik kristalle kaplı duvarın yansıtıcılığı en çok bu frekans etrafında azaltılmaktadır. Örneğin  $f=380$  Hz iken fononik kristal kaplı duvarın yansıtıcılığı yalın duvarın yansıtıcılığının yaklaşık olarak dörtte

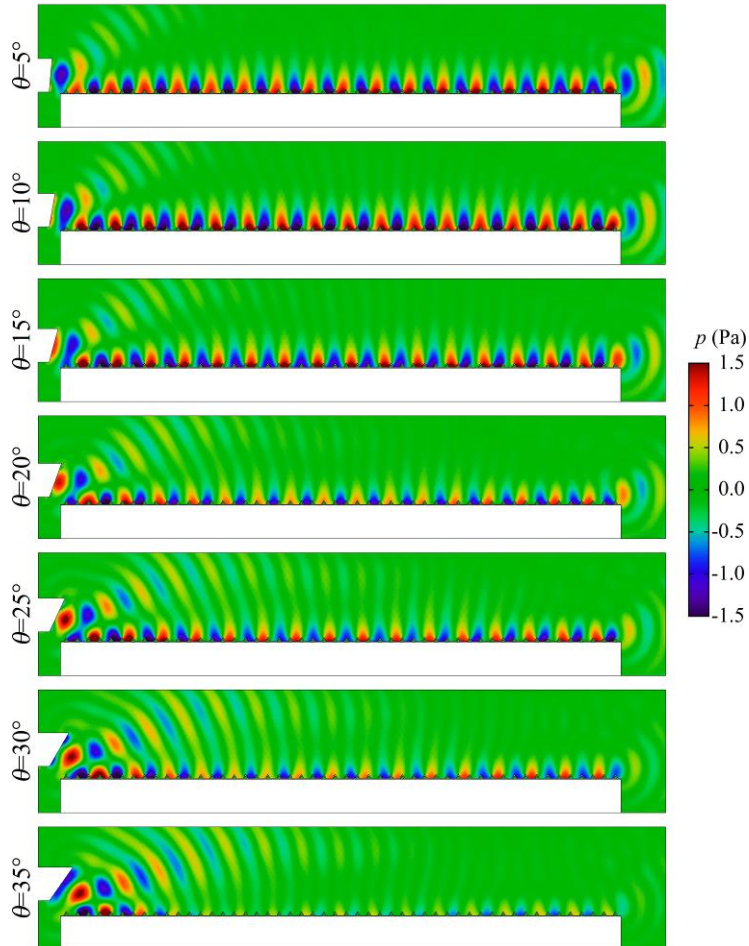
birine düşmektedir. Fononik kristal kaplı duvarda ilerleyen yüzey dalgası duvar köşesine akustik soğurucular konularak bertaraf edilebilir. Ayrıca ahşap üzerine ince soğurucu katmanlar kaplanarak ya da ahşap yerine gözenekli malzemeler



kullanılarak ses yalıtımı etkinliği artırılabilir.

Fononik kristalin yüzey dalgalarının uyarılması ile yalnızca yüzeye Şekil 3(b)'deki gibi hemen hemen paralel gelen dalgaların değil, değişik geliş açıları ile gelen dalgaların da yalıtılması beklenir. Bu nedenle,  $\theta$  değiştirilerek fononik kristal kaplı duvarın yansıtıcılığının nasıl değiştiği durağan FEM analizleri ile incelenmiştir. Şekil 5'te  $\theta$ ,  $5^\circ$  ile  $35^\circ$  arasında değiştirildiğinde elde edilen FEM simülasyon sonuçları gösterilmiştir. Burada,  $f=440$  Hz iken  $\theta=30^\circ$  geliş açısına kadar yüzey

dalgalarının uyarılıp fononik kristal yüzeyi boyunca kılavuzlandığı açıkça görülmektedir. Ancak, daha büyük geliş açılarında yüzey dalgalarının uyarılması havadan gelen dalgaların ve yüzey dalgalarının dalga vektörleri eşleşemediği için mümkün olmamaktadır. Şekil 5'te geliş açısı arttıkça yansıyan bileşenin arttığı da görülmektedir. Bu durumda, konser salonu gibi ortamlarının yanıl duvarlarının ve tavanının fononik kristal ile kaplanması daha iyi ses yalıtımı sağlayacağı ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5.  $f=440$  Hz frekansındaki akustik dalganın farklı geliş açılara göre bir boyutlu fononik kristal kaplı duvar ile etkileşiminin FEM simülasyon sonuçları.

Örneğin bir çalışmada, iki farklı konser salonunun duvar kaplamalarının akustik soğurum özelliği farklı frekans bandlarının 1/1 ve 1/3 oktav genişliklerinde incelenmiştir [30]. Örneğin, 250 Hz merkez frekansının 1/1 oktav genişliğindeki bandı için, Münih'teki Fubertssaal in Schloss Nymphenburg'de ses soğurum katsayısı ( $\alpha$ ) bu frekans bandında 30 mm kalınlığında plaster kaplamalar için 0.123 iken, Japonya'daki Mitaka konser salonunun 33 mm kalınlığındaki ağır alçı taşı kaplamaları için 0.097 olarak ölçülmüştür [30]. Bu çalışmada ise Şekil 4'teki veriler kullanılarak, fononik kristal kaplandığında 250 Hz frekansında 0.35 ve bu frekansın 1/1 oktav genişliğinde ortalama olarak  $\alpha=0.47$  hesaplanmış olup daha ince ahşapla periyodik kaplamanın ses soğurum özelliğini önemli ölçüde geliştirdiği belirlenmiştir

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Sonuç olarak, duyarlı ses bölgesinde özellikle düşük frekanslarda beton duvarların yüzeylerinin periyodik üçgenel çıkıntılar içeren ahşap kaplamadan oluşan bir boyutlu fononik kristal ile kaplamanın önemli ölçüde ses yalıtımı sağladığı gösterilmiştir. Fononik kristalin üçgenel çıkıntıları arasında yerleşmiş yüzey kiplerinin uyarılması ve yüzey boyunca kılavuzlanması ile akustik enerjinin duvardan yansımaları ve saçılması önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Hava ile beton duvar arakesitindeki yüzey kipleri, kendilerini band yapısında havanın dağılım eğrisi altında kalan ve Brillouin bölgesi sınırlarına yaklaştıkça hava çizgisinden ayrılan yüzey bandlarında göstermektedir. Yüzeğe gelen düzlemsel dalgaların yüzey ile 30° ve

altında açı yaptıklarında kılavuzlanabildikleri görülmüştür. Bu durumda sahne içeren ortamlarda özellikle yanal duvarların ve tavanın fononik kristal ile kaplanması akustik yalıtımı önemli ölçüde artıracak ön görülmüştür.

#### Teşekkür

FEM band yapısı hesaplarında ve simülasyonlarda hesaplama sisteminin ve COMSOL MultPhysics 4.3 yazılımının kullanımına izin verdiği için İnönü Üniversitesi Eğitim Fakültesi Bilgisayar ve Öğretim Teknolojileri Öğretmenliği Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Olgun Adem KAYA'ya şükranlarımı sunarım.

#### Kaynakça

- [1] Mehta, M., Johnson, J., Rocafort, J. 1999. Architectural acoustics: Principles and Design, Prentice Hall.
- [2] Maldovan, M. 2013. Sound and heat revolutions in phononics, Nature, Cilt. 503, No. 7475, s. 209-217. Doi:10.1038/nature12608
- [3] Kushwaha, M.S., Halevi, P., Dobrzynski, L., Djafari-Rouhani, B. 1993. Acoustic band structure of periodic elastic composites, Physical Review Letters, Cilt. 71, No. 13, s. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.71.2022>
- [4] Kushwaha, M.S., Halevi, P., Martinez, G., Dobrzynski, L., Djafari-Rouhani, B. 1994. Theory of acoustic band structure of periodic elastic composites, Physical Review B, Cilt. 49, No. 4, s.2313. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.49.2313>
- [5] Sainidou, R., Stefanou, N., Modinos, A. 2002. Formation of absolute

- frequency gaps in three-dimensional solid phononic crystals, *Physical Review B*, Cilt. 66, No. 21, s. 212301. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.66.212301>
- [6] Vasseur, J., Deymier, P.A., Djafari-Rouhani, B., Pennec, Y., Hladky-Hennion, A. 2008. Absolute forbidden bands and waveguiding in two-dimensional phononic crystal plates, *Physical Review B*, Cilt. 77, No.8, s. 085415. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.77.085415>
- [7] Martínez-Sala, R., Rubio, C., García-Raffi, L. M., Sánchez-Pérez, J. V., Sánchez-Pérez, E.A., Llinares, J. 2006. Control of noise by trees arranged like sonic crystals, *Journal of Sound and Vibration*, Cilt. 291, No. 1, s. 100-106. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2005.05.030>
- [8] Wu, T.T., Huang, Z.G., Tsai, T.C., Wu, T.C. 2008. Evidence of complete band gap and resonances in a plate with periodic stubbed surface, *Applied Physics Letters*, Cilt. 93, No. 11, s. 111902. DOI: 10.1063/1.2970992
- [9] Tanaka, Y., Tomoyasu, Y., Tamura, S.I. 2000. Band structure of acoustic waves in phononic lattices: Two-dimensional composites with large acoustic mismatch, *Physical Review B*, Cilt. 62, No. 11, s. 7387. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.62.7387>
- [10] Gorishnyy, T., Ullal, C.K., Maldovan, M., Fytas, G., Thomas, E. 2005. Hypersonic phononic crystals, *Physical Review Letters*, Cilt. 94, No. 11, s. 115501. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.94.115501>
- [11] Gomopoulos, N., Maschke, D., Koh, C., Thomas, E., Tremel, W., Butt, H.J., Fytas, G. 2010. One-dimensional hypersonic phononic crystals, *Nano Letters*, Cilt. 10, No. 3, s. 980-984. DOI: 10.1021/nl903959r
- [12] Maldovan M, Narrow low-frequency spectrum and heat management by thermocrystals, *Physical Review Letters*, Cilt. 110, No. 2, 2013, s.025902.
- [13] Palucka T, Nano Focus: Theoretical thermocrystals control heat like sound, *MRS Bulletin*, Cilt. 38, No. 03, 2013, s.200.
- [14] Lacatena, V., Haras, M., Robillard, J. F., Monfray, S., Skotnicki, T., Dubois, E. 2015. Toward quantitative modeling of silicon phononic thermocrystals, *Applied Physics Letters*, Cilt. 106, No. 11, s.114104. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4915619>
- [15] Miyashita, T., Inoue, C. 2001. Numerical investigations of transmission and waveguide properties of sonic crystals by finite-difference time-domain method, *Japanese Journal of Applied Physics*, Cilt. 40, No. 5S, s.3488. DOI: <http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.40.3488>
- [16] Miyashita, T. 2005. Sonic crystals and sonic wave-guides, *Measurement Science and Technology*, Cilt. 16, No. 5, s. R47. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/16/5/R01>
- [17] Hsiao, F.L., Khelif, A., Moubchir, H., Choujaa, A., Chen, C.C., Laude, V. 2007. Waveguiding inside the complete band gap of a phononic crystal slab, *Physical Review E*, Cilt. 76, No. 5, s.056601. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.76.056601>
- [18] Vasseur, J., Hladky-Hennion, A. C., Djafari-Rouhani, B., Duval, F., Dubus, B., Pennec, Y., Deymier, P.A. 2007. Waveguiding in two-dimensional

piezoelectric phononic crystal plates, Journal of Applied Physics, Cilt. 101, No. 11, s.114904. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2740352>

[19] Khelif, A., Choujaa, A., Benchabane, S., Djafari-Rouhani, B., Laude, V. 2004. Guiding and bending of acoustic waves in highly confined phononic crystal waveguides, Applied Physics Letters, Cilt. 84, No. 22, s.4400-4402. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1757642>

[20] Wu, F., Hou, Z., Liu, Z., Liu, Y. 2001. Point defect states in two-dimensional phononic crystals, Physics Letters A, Cilt. 292, No. 3, s.198-202. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0375-9601\(01\)00800-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0375-9601(01)00800-3)

[21] Wu, F., Liu, Z., Liu, Y. 2004. Splitting and tuning characteristics of the point defect modes in two-dimensional phononic crystals, Physical Review E, Cilt. 69, No. 6, s.066609. DOI: 10.1103/PhysRevE.69.066609

[22] Zhao, D., Liu, Z., Qiu, C., He, Z., Cai, F., Ke, M. 2007. Surface acoustic waves in two-dimensional phononic crystals: Dispersion relation and the eigenfield distribution of surface modes, Physical Review B, Cilt. 76, No. 14, s.144301. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.76.144301>

[23] Jia, H., Ke, M., He, Z., Peng, S., Liu, G., Mei, X., Liu, Z. 2009. Experimental demonstration of surface acoustic waves in two-dimensional phononic crystals with fluid background, Journal of Applied Physics, Cilt. 106, No. 4, s.044512. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3200964>

[24] Cicek, A., Gungor, T., Kaya, O.A., Ulug, B. 2015. Guiding airborne sound through surface modes of a two-dimensional phononic crystal, Journal of Physics D: Applied Physics, Cilt. 48, No. 23, s.235303. DOI:

<http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/48/23/235303>

[25] Cicek, A., Salman, A., Kaya, O.A., Ulug, B. 2015. Sharp bends of phononic crystal surface modes, Journal of Physics: Condensed Matter, Cilt. 27, No. 47, s.475003. DOI: 10.1088/0953-8984/27/47/475003

[26] Cicek, A., Salman, A., Kaya, O.A., Ulug, B. 2016. Phononic crystal surface mode coupling and its use in acoustic Doppler velocimetry, Ultrasonics, Cilt. 65, s.78-86. DOI: 10.1016/j.ultras.2015.10.017

[27] Cicek, A., Salman, A., Kaya, O.A., Ulug, B. 2015. Evanescent coupling between surface and linear-defect guided modes in phononic crystals, Journal of Physics D: Applied Physics, Cilt. 49, No. 3, s.035103. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/49/3/035103>

[28] Laude, V., Wilm, M., Benchabane, S., Khelif, A. 2005. Full band gap for surface acoustic waves in a piezoelectric phononic crystal, Physical Review E, Cilt. 71, No. 3, s.036607. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.036607>

[29] Salman, A., Kaya, O.A., Cicek, A., Ulug, B. 2015. Low-concentration liquid sensing by an acoustic Mach-Zehnder interferometer in a two-dimensional phononic crystal, Journal of Physics D: Applied Physics, Cilt. 48, No. 25, s.255301. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/48/25/255301>

[30] Beranek, L. L. ve Hidaka, T. 1998. Sound absorption in concert halls by seats, occupied and unoccupied, and by the hall's interior surfaces, The Journal of the Acoustical Society of America, Cilt. 104, s.3169. DOI: <http://dx.doi.org/10.1121/1.423957>