

AKÜ FEMÜBİD 19 (2019) 031101 (536-543)

AKU J. Sci. Eng. 19 (2019) 031101 (536-543)

DOI: 10.35414/akufemubid.577855

Araştırma Makalesi / Research Article

## Dönen Kare Çubuklu İki Boyutlu Fononik Kristalin Dispersiyon Özellikleri

Selami PALAZ<sup>1,\*</sup>, Oral OLTULU<sup>1</sup>, Amirullah M. MAMEDOV<sup>2,3</sup><sup>1</sup>Harran Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Şanlıurfa<sup>2</sup>Bilkent Üniversitesi, Nanoteknoloji Araştırma Merkezi, NANOTAM, Ankara<sup>3</sup>Bakü Devlet Üniversitesi, Uluslararası Bilim Merkezi, Bakü, Azerbaycan

\*Sorumlu yazar e-posta: spalaz@harran.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2322-8898>

oltulu@harran.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6733-1769>

mamedov@bilkent.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-0837-3931>

Geliş Tarihi: 13.06.2019;

Kabul Tarihi: 09.11.2019

### Öz

#### Anahtar kelimeler

Akustik Dalgalar;  
Fononik Kristaller;  
Metamateryaller;  
Bant Aralıkları

Bu çalışmada, bir kare örgülü hava matrisinde yer alan kare şekilli saçılardan oluşan iki boyutlu fononik kristallerin bant yapısı çalışıldı. Bant yapısı hesaplamaları için, bir hava matrisindeki kare  $\text{LiNbO}_3$  çubuklarından oluşan iki boyutlu bir fononik kristal dikkate alındı. Kare çubukların yönelimlerinin akustik bant aralıkları üzerindeki etkisi, iletim kaybı spektrumları, basınç alanı haritası ve dağılım ilişkileri sonlu elemanlar yöntemi ve Bloch teoremi kullanılarak hesaplandı. Bu yapı için maksimum bant aralığı  $45^\circ$  dönme açısında bulundu. Sayısal sonuçlar, bant aralıklarının kare çubukların dönüş açısını değiştirerek ayarlanabileceğini göstermektedir.

## Dispersion Features of Two-dimensional Phononic Crystal with Rotating Square Rods

### Abstract

#### Keywords

Acoustic Waves;  
Phononic Crystals;  
Metamaterials;  
Band Gaps

In the present work, band structures of two-dimensional phononic crystals (PC) composed of square-shaped scatters in an air matrix with a square lattice are investigated. A two-dimensional phononic-crystal consisting of square  $\text{LiNbO}_3$  rods in an air matrix is considered for band structure calculations. Effects of orientations of square rods on the acoustic band gaps, transmission loss spectra, pressure field map and dispersion relations are calculated using the finite element method and Bloch theorem. The maximum acoustic band gaps for this structure is found at the rotation angle of  $45^\circ$ . The numerical results show that the band gaps can be tuned by changing the rotation angle of the square rods.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Giriş

Metamateryaller, tabiiatta doğal olarak bulunmayan elektrik, magnetik ve akustik özelliklere sahip yapılar olarak adlandırılan malzemelerdir. Son zamanlarda üzerinde yoğun çalışmalar yapılan ultrasonik görüntüleme, ses odaklaması, dalga hapsetme, dalga kılavuzu gibi farklı uygulamaları olan fononik kristaller (FKr) farklı akustik özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemedan meydana gelen yapılardır (Sigalas, and Economou 1992, Kushwaha *et al.* 1993, Kushwaha and Halevi 1994, Vasseur *et al.* 1998, Meseguer *et al.* 1999, Liu *et al.* 2000). FKr'lerin

özelliklerinden bir tanesi, belirli frekanslardaki mekanik veya akustik dalgaların geçişine izin

vermemesidir. FKr'lerde gözlenen bu durum bant aralıkları olarak adlandırılır. FKr'lerle ilgili olarak bir (1D)-, iki (2D)- ve üç (3D)-boyutlu periyodik, yarı-periyodik veya düzensiz, fononik kristallerin bant yapısı, iletim-yansıma katsayıları gibi farklı konularda çalışmalar mevcuttur (Haberman and Norris 2016, Haberman and Guild 2016, Ang *et al.* 2016).

FKr'lerin tüm fiziksel özellikleri onların yapıları ayarlanarak değiştirilebilmektedir (Júnior and Santos 2017). FKr'lerin geometrik parametrelerinin yanında materyallerin ve özelliklerinin seçimi de bant yapısı üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Fononik kristal çalışmaları büyük ölçüde 1D, 2D ve 3D yapılarıdaki bant aralıklarından faydalanabilmek üzere kartezyen koordinatlardaki üç yönün periyodikliğine bağlıdır (Chen *et al.* 2008, Pennec *et al.* 2010, Sainidou *et al.* 2002). FKr'lerin bant yapısının karakteristikleri, FKr'lerin belirli frekans aralıklarında elastik ve/veya akustik dalgaları filtreleyebildikleri anlamına gelmektedir. Frekans aralığı içinde gelen dalgalardan herhangi biri yayılım yönünden bağımsız olarak kristalden geçemezse frekans aralığı mutlak yasak bant aralığı olarak kabul edilmektedir. Yasak bant frekansları dışındaki frekans aralıkları geçiş bantları olarak adlandırılmaktadır. Fononik kristallerin bant yapıları üzerine olan çalışmalar, bu kristallerin başka fiziksel özelliklerinin de keşfedilmesine imkân vermiş olup, akustik filtreler (Kushwaha 2016, Khelif *et al.* 2004, Wang *et al.* 2009), ses yalıtımı, ultrasonik sessiz bloklar ve ultrasonik dizilimli dönüştürücüler (Wu *et al.* 2005, Wilm *et al.* 2007) gibi çeşitli uygulama alanları oluşturmuştur.

Katı, sıvı ve katı/sıvı bileşenleri olmak üzere farklı FKr yapıları incelenmiş olup, çeşitli materyal bileşimlere karşılık gelen akustik yasak bant aralıkları bulunmuştur (Li *et al.* 2011, Montero *et al.* 1998). Gerek kare (Lu *et al.* 2011), üçgen (Hsu and Wu 2007), gerekse petek (Pennec *et al.* 2011) örgülerde yasak akustik bant aralıkları elde edilmiştir. Bu yapılar da dalga yayılımı üzerine gerçekleşen çalışmalar, genellikle, yüksek simetriye sahip silindirik çubuklara odaklanmıştır. Ancak, kare ya da üçgen bir örgüde, kare şekilli kesitlere sahip sistemlerde ise bu çalışmalar az sayıdadır. Bu nedenle, mevcut çalışma bu az sayıdaki çalışmalardan ilham alınarak yapılmıştır (Wang *et al.* 2007, Li *et al.* 2002, El-Naggar *et al.* 2011). Wang ve arkadaşları dielektrik zemine gömülü hava çubuklarından oluşan yapıları incelemiş ve mutlak fononik bant aralık genişliğinin dairesel olmayan saçıcılarda kontrol edilebildiğini ortaya koymuşlardır. Li ve arkadaşları kare çubukların yönelimlerinin akustik bant aralığı üzerindeki

etkilerini düzlem dalga açılım metodu (PWE) ile incelemişlerdir. Kare ve üçgen örgü türlerinde kare kesite sahip çubukların oluşturduğu fononik kristal Süper Hücre Yöntemi kullanılarak çalışılmıştır (El-Naggar *et al.* 2011).

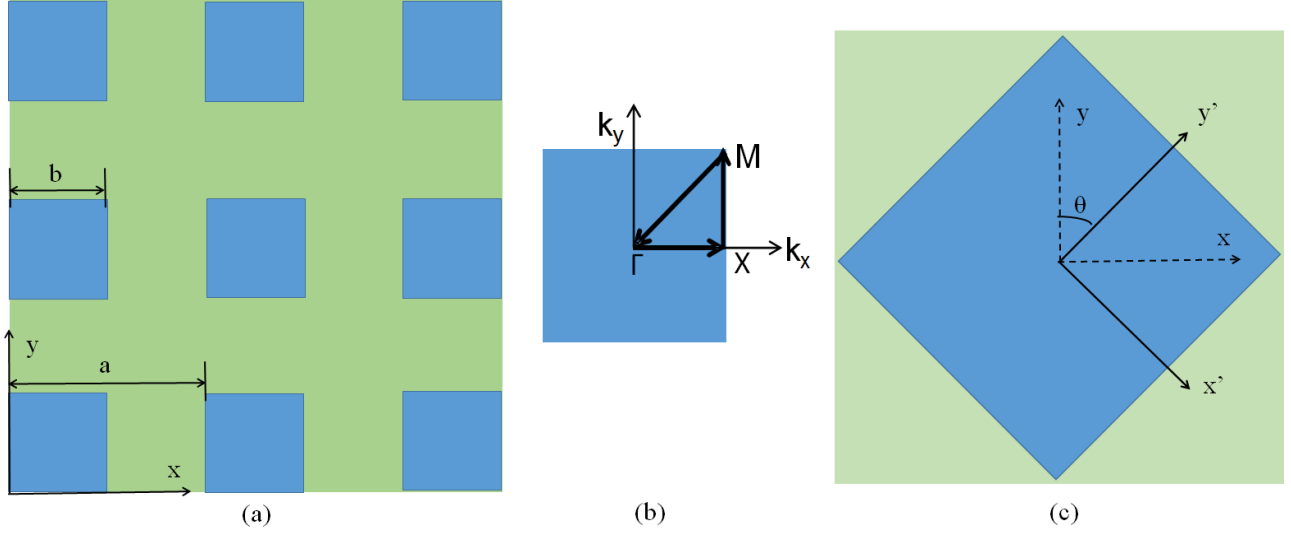
Dönebilen çoklu saçıcılardan oluşan iki boyutlu bir fononik kristalde akustik dalga yayılımı incelenmiş ve dönme açısının geniş bant aralıkları üzerindeki etkisi gösterilmiştir (Song *et al.* 2017). İki boyutlu fononik kristallerde, heksagonal, trigonal ve tetragonal kristal sistemlerinde yer alan anizotropik saçıcı silindirlerin dönmesine bağlı olarak fononik bant aralıklarının açılabilirliği, ayarlanabilirliği ve kapatılabildiği gösterilmiştir (Lin and Huang 2011). Polimer matris içerisinde piezoelektriklerin bant yapıları kare kesit alanlı çubukları için dönme açısına bağlı olarak çalışılmış ve dönme açısı artarken bant aralık sayılarının arttığı gözlemlenmiştir (Zou *et al.* 2013).

Elastik dalgaların, nano-piezoelektrik fononik kristallerde, kare, dikdörtgen, petek ve Kagomé örgü türleri için dairesel ve kare kesitli BaTiO<sub>3</sub> saçıcıların dönme açısına bağlı olarak bant yapıları da incelenmiştir (Miranda Jr. and Santos 2017).

Bu çalışmanın amacı, sabit bir doluluk kesri için, iki boyutlu kare bir örgüde yönelimi ayarlanabilen saçıcı geometrisinin etkisini ortaya koymaktır. Bu amaca ulaşmak için aralık genişliğinin saçıcıların dönme açısına bağlılığı araştırılacaktır. Bu çalışmada LiNbO<sub>3</sub> (hava arka planında) kare kesitli çubuklardan oluşan 2D FKr yapıda, akustik dalgaların yayılım karakteristikleri ve bant yapıları teorik olarak, akustik dalga yayılımının temel eşitlikleri çözülerek incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada öngörülen sistem, kare bir örgüde ayarlanan hava arka planındaki LiNbO<sub>3</sub> kare çubuklardan oluşan tipik bir 2D FKr'dir. Çalışılan sistemin, birim hücresinin ve  $\theta$  açısı ile döndürülen kare çubuğun hesaplama modeli Şekil 1.'de gösterilmiştir. Materyal özellikleri şu şekildedir: Hava için  $\rho_1 = 1.25 \text{ kg/m}^3$  ve  $c_{L1} = 343 \text{ m/s}$ , LiNbO<sub>3</sub> için  $\rho_2 = 4700 \text{ kg/m}^3$  ve  $c_{L2} = 7430 \text{ m/s}$ 'dir. Burada  $\rho$  yoğunluğu,  $c$  boyuna dalgaların hızını göstermektedir. Kare çubukların kenar uzunluğu  $b$ , örgü sabiti  $a$ 'dır.



**Şekil 1.** (a) Hava içerisinde kare LiNbO<sub>3</sub> çubuklardan oluşan iki boyutlu kare örgü fononik kristalin enine kesiti, (b) İlk Brillouin bölgesi, (c)  $\theta$  dönüş açısı ile döndürülmüş kare çubuk.

Burada, periyodik bir kare saçıcı sistem boyunca akustik dalganın yayılımına odaklanılmaktadır. FKR'ler için bant aralıklarını hesaplamak üzere, farklı algoritmalar geliştirilmiştir. Bu sayısal yöntemler, transfer matris yöntemi (TMM) (Yu *et al.* 2008), zaman uzayı sonlu farklar yöntemi (FDTD) (Tanaka *et al.* 2000), çoklu saçılma teorisi (MST) (Kafesaki and Economou 1999) yöntemi ve sonlu elemanlar metodunu (SEM) (Li *et al.* 2008) içermektedir. Farklı fononik kristal yapıları incelenerek bunlara karşılık gelen akustik bant yapıları bulunabilir. Öngörülen FK yapısının bant yapısını hesaplamak için Bloch teoremine dayalı olan SEM kullanılmıştır. Akustik dalgalar için ana denklem Helmholtz denklemi ile verilmiştir:

$$\nabla \left( -\frac{1}{\rho} \nabla P \right) = \frac{\omega^2 P}{\rho c_s^2} \quad (1)$$

Burada  $p$  akustik basınç,  $\rho$  yoğunluk,  $\omega$  açısal frekans ve  $c_s$  ses hızıdır. Birim hücredeki özdeğer denklemlerinin ayrık formu şu şekilde yazılabilir;

$$\left( K^2 - \omega^2 M \right) p = 0 \quad (2)$$

Burada  $p$  düğümlerdeki basınç alanıdır ve  $K$  ile  $M$  sırasıyla birim hücrenin bükülmezliği (rijitlik) ve kütle

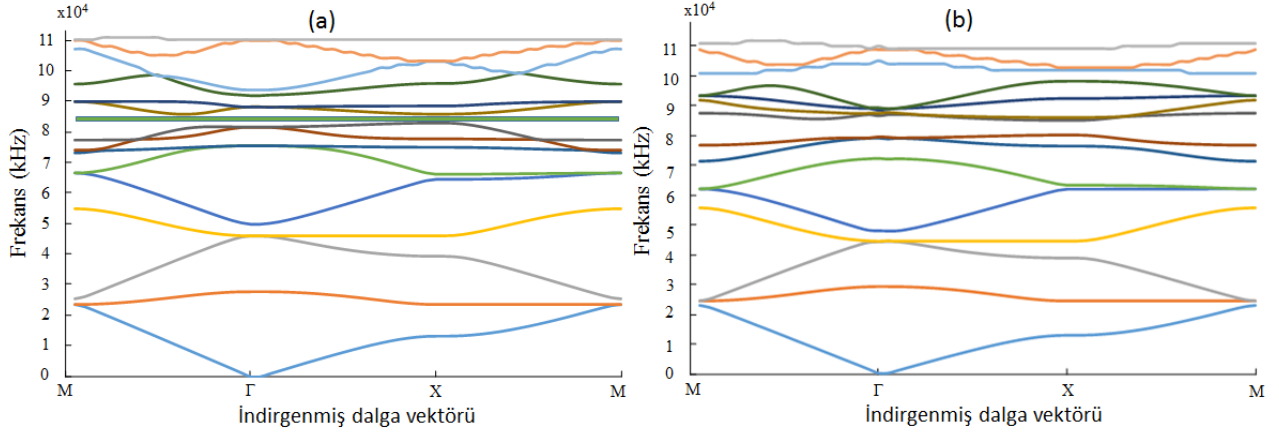
matrisi olarak görülebilir. Bloch-Floquet teoremi uygulanarak, birim hücrenin sınırlarına Bloch periyodik sınır koşulları uygulanmıştır:

$$p(\vec{r} + \vec{a}) = p(\vec{r}) e^{-i\vec{k} \cdot \vec{a}} \quad (3)$$

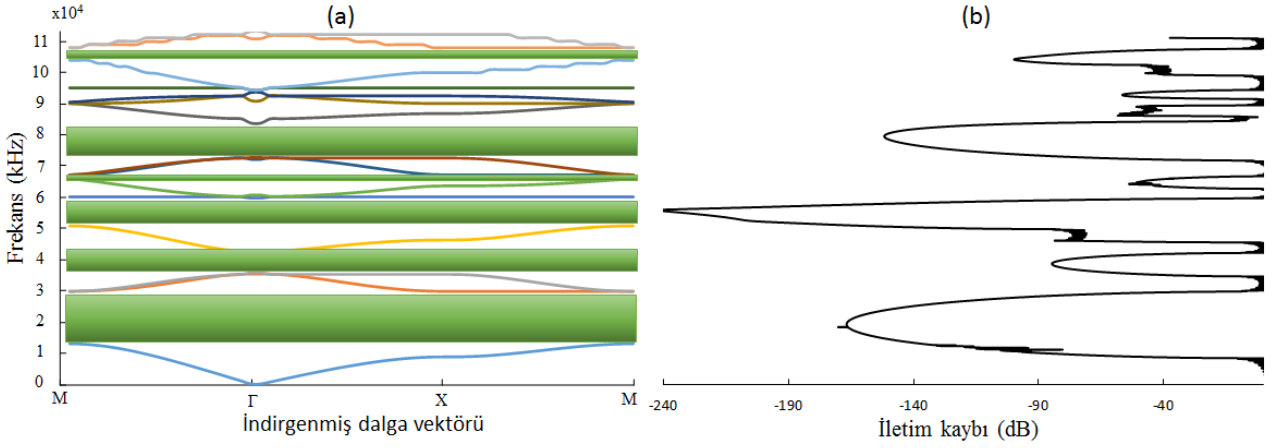
Burada  $\vec{a}$  örgünün temel vektörleri ve  $K=(K_x, K_y)$  Bloch dalga vektörüdür.  $K$ 'nın değerini indirgenmiş birinci Brillouin bölgesi (BZ) boyunca değiştirerek ve SEM algoritması ile üretilen özdeğer problemini çözerek, hem dağılım ilişkileri, hem de yapının normal modları elde edilebilir.

### 3. Tartışma ve Sonuç

Yukarıda açıklanan yöntem ile özdeğer denklemi (2) SEM yazılımı ile çözüldü (COMSOL Multiphysics 5.2). FKR'in bant yapısı örgü sabiti  $a=8$  mm ve kare çubuklarının kenar uzunluğu  $b=5.6$  mm olacak şekilde hesaplanmıştır. Öncelikle, farklı dönme açıları için bant yapıları, sırasıyla,  $\theta=0^\circ$  ve  $\theta=15^\circ$  açıları için, doluluk kesri  $F=0.49$  olacak şekilde araştırıldı. Analizimizde, kare çubuklar dolgu maddesi olarak kullanıldığından, doluluk kesri birim hücre içindeki çubukların toplam kesit alanının birim hücre alanına oranıdır. Bu oran  $F=b^2/a^2$  denkleminde yararlanılarak elde edildi.



**Şekil 2.** Fononik kristal yapının SEM ile hesaplanan bant yapısı. Hava ortamındaki katı çubuklar için, doluluk kesri  $F=0.49$ , (a)  $\theta=0^\circ$ , (b)  $\theta=15^\circ$  iken akustik bant yapıları.



**Şekil 3.** Doluluk kesri  $F=0.49$  ve  $\theta=45^\circ$  durumu için (a) fononik bant yapısı, (b) akustik iletim kaybı grafiği.

Çalışmada farklı doluluk kesri içerisinde en iyi sonuçlar, bu maksimum doluluk kesri değerinde elde edildiğinden dolayı  $F=0.49$  değeri kullanıldı. Sonuçlar Şekil 2(a) ve 2(b)'de gösterilmiştir. Detaylı analizimizde, nümerik hesaplamalar kare saçıcıların  $\theta=0^\circ$  dönme açısında hiçbir doluluk kesri için ilk iki mod arasında mutlak bant aralığına sahip olmadığını göstermektedir. Ancak, Şekil 2(b)'de görüldüğü gibi, kare çubuklar döndürüldüğünde ilk en düşük bant aralığı  $\theta=15^\circ$  dönme açısında görülmektedir. M noktasında ilk bandın bozulmasının kaldırıldığı ve Şekil 2(b)'de bant aralıkları arasındaki en düşük bant aralığının oluştuğu görülmektedir.

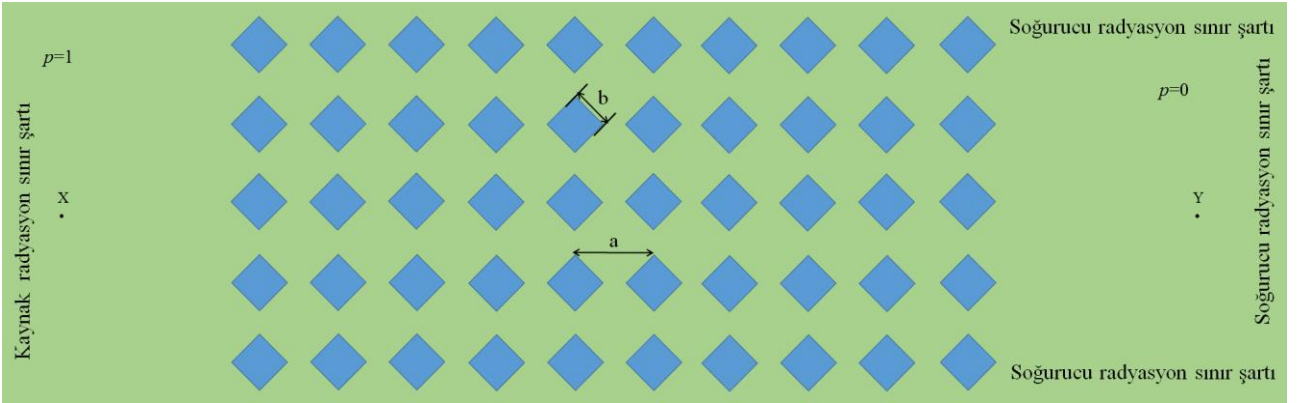
Sonuçlar, aralık genişliğinin artan dönme açıları ile arttığını göstermektedir. Şekil 3(a)'da görüldüğü üzere, maksimum akustik bant aralığı, dönme açısı  $\theta=45^\circ$  iken görülmektedir. İlk on beş mod arasında bu açıda altı tam bant aralığı bulunmaktadır. En alt seviyedeki bant aralığından en üst seviyedeki bant

aralıklarına göre aralık genişlikleri sıralandığında, elde edilen frekans aralıkları şu şekildedir:  $\Delta\omega_1=16.86$  kHz,  $\Delta\omega_2=6.47$  kHz,  $\Delta\omega_3=9.34$  kHz,  $\Delta\omega_4=1.44$  kHz,  $\Delta\omega_5=10.61$  kHz ve  $\Delta\omega_6=4.0$  kHz. Akustik dalga yayılımını ve öngörülen FKr'lerde saçılımı modellemek için sonlu eleman (SE) simülasyonlarından yararlanılmıştır. SE yazılımının akustik modülü kullanılarak, akustik dalganın zamana bağlı harmonik yayılım analizi yapılmıştır. Bant yapısında, bant aralıklarının görüldüğü frekanslar iletim kaybı spektrumunda mevcut olan zayıflama bölgeleri ile yüksek uyum içerisinde, Şekil 3(b). Bu belirli frekans segmentleri için iletim katsayısı sıfıra yakındır ve bu nedenle bant yapısının  $\Gamma X$  yönü boyunca yasak bölgelerine karşılık gelmektedir. FKr yapısı içindeki akustik dalgaların yayılım özelliklerini araştırmak için, farklı frekanslardaki FKr yapılarının basınç alan haritaları incelenmiştir.

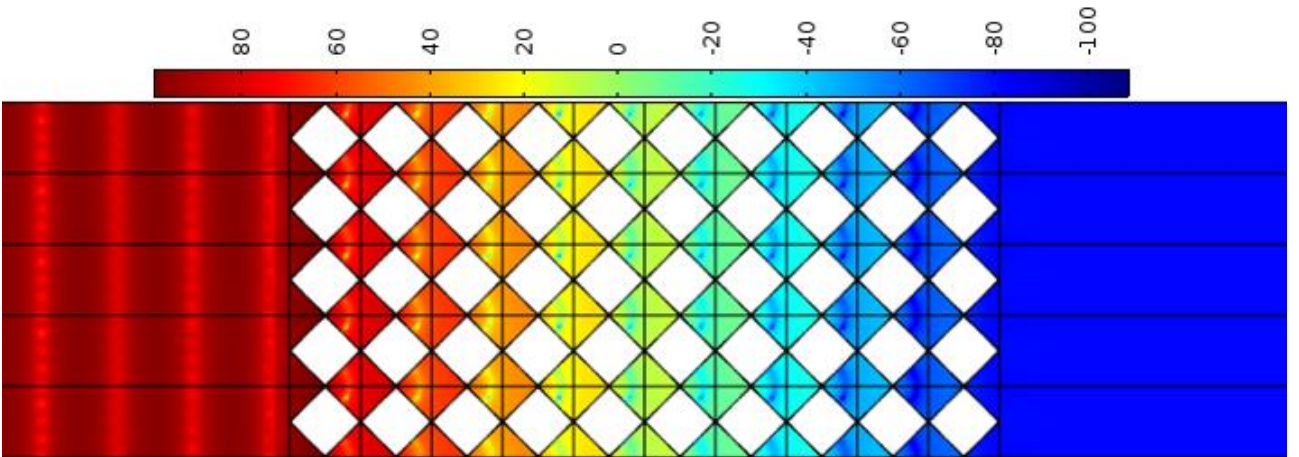
Hesaplama için  $5 \times 10$ 'luk fononik kristal yapıdan oluşan sonlu bir yapı modellenmiştir. Şekil 4 bu sonlu yapıdaki modeli ve kullanılan sınır şartlarını göstermektedir. Aynı model iletim kaybı spektrumu için de kullanılmıştır. Fononik kristal sistemi içinde, dalga yayılımının frekans spektrumu Parametrik Tarama Metodu ile yapıldı. Şekil 5, en düşük yasak bant içinde olan  $f=20$  kHz frekansındaki basınç alan haritasını göstermektedir. Şekil 5'den, akustik dalga,

yapı içinde soldan sağa doğru yayılırken, akustik basıncın giderek azaldığı ve dalga beşinci sütuna ulaştığında basıncın neredeyse sıfır olduğu görülmektedir.

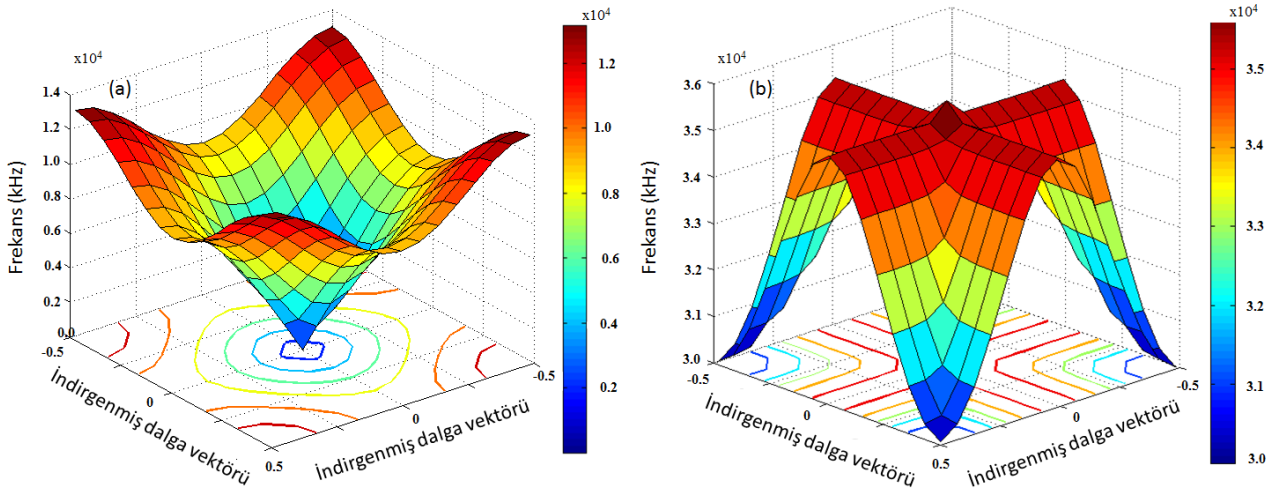
Şekil 6(a) ve 6(b), birinci ve üçüncü modlar için 2D FKr sistemin frekans dağılım yüzeyini göstermektedir. Eş-frekans yüzeyi olarak da bilinen bu yüzey grafikleri, tüm izinli  $k_x$  ve  $k_y$  dalga vektörleri için elde edilen özdeğer çözümlerini vermektedir.



Şekil 4. İki boyutlu zamana bağlı harmonik dalga analizi için tanımlanan geometri. Teorik ölçümler X ve Y olarak işaretlenen iki noktada alınmıştır.



Şekil 5.  $f=20$  kHz frekansında  $5 \times 10$ 'luk birimlerden oluşan FKr'nin içindeki ses basınç alanı haritası.



**Şekil 6.** Fononik kristalin ilk (a) ve üçüncü (b) bantlarının ilk Brillouin bölgesinde tüm k-vektörleri için hesaplanan dispersiyon,  $\omega(k)$  grafikleri.

Şekil 6(a) ve 6(b)'deki dağılım eğrileri arasındaki fark çok açıktır. Buradan dağılım eğrilerinin kantitatif (sayısal, nicel) bilgi için faydalı olabileceği şekillerde verilen eş-frekans kontür diyagramlarından kolaylıkla görülebilir. Bu nedenle, FKR'lerdeki izotropik ve anizotropik dalga yayılımları en iyi şekilde eş-frekans kontürleri ile analiz edilebilir. Örneğin Şekil 6(a)'da merkezde görülen kontür eğrileri dairesel geometriye sahiptir. Bu dalgaların fononik kristal içerisinde izotropik yayıldığını, diğer bir deyişle her yönde aynı hızla yayıldığını göstermektedir. Kontür eğrilerindeki dairesellikten sapma, dalga yayılım hızının yöne bağlı olarak farklılık gösterdiğini ifade etmektedir.

Özetle, bir kare örgüde, hava içerisinde yer alan LiNbO<sub>3</sub> kare çubukların diziliminden oluşan 2D fononik kristalin yasak bant aralığının varlığı teorik olarak araştırılmıştır. Yasak bant aralığının sistemdeki saçıcıların dönme açılarını değiştirmek suretiyle kontrol edilebildiği ve bu açı değişiminin bir sonucu olarak, yasak bantların görünürlüğünün arttığı tespit edilmiştir. Sabit bir doluluk kesri için, iki boyutlu kare örgü içinde kare yapıdaki saçıcıların geometrik etkisi ortaya konulmuştur. Benzer sonuçlar daha önce farklı fraktal yapılarda da tespit edilmiştir (Norris et al. 2008, De Nicola et al. 2018, Kuo and Piazza 2011). Alınan teorik sonuçlar, hesaplanan akustik iletkenlik kaybı spektrumunun dağılım diyagramıyla son derece uyumlu olduğunu göstermektedir.

#### 4. Kaynaklar

- Ang, L.Y.L., Koh, Y. K. and Lee, H., 2016. A potential for cabin noise control in automobiles and armored vehicles. *International Journal of Applied Mechanics*, **8(5)**, 1650072.
- Chen, A.L., Wang, Y.S., Guo, Y.F. and Wang, Z.D., 2008. Band structures of Fibonacci phononic quasicrystals. *Solid State Communications*, **145**, 103-108.
- El-Naggar, S.A., Mostafa, S.I. and Rafat, N.H., 2011. Complete band gaps of phononic crystal plates with square rods. *Ultrasonics*, **52(4)**, 536-542.
- Haberman, M.R. and Guild, M.D., 2016. Acoustic Metamaterials. *Physics Today*, **69(6)**, 42-48.
- Haberman, M.R. and Norris, A.N., 2016. Acoustic Metamaterials. *Acoustics Today*, **12(3)**, 31-41.
- Hsu, J.C. and Wu, T.T., 2017. Lamb waves in binary locally resonant phononic plates with two dimensional lattices. *Applied Physics Letters*, **90**, 201904.
- Kafesaki, M. and Economou, E.N., 1999. Multiple-scattering theory for three-dimensional periodic acoustic composites. *Physical Review B*, **60**, 11993-12001.

- Khelif, A., Choujaa, A., Benchabane, S., Djafari-Rouhani, B. and Laude, V., 2004. Guiding and bending of acoustic waves in highly confined phononic crystal waveguides. *Applied Physics Letters*, **84(22)**, 4400-4402.
- Kuo, N-K. and Piazza, G., 2011. Fractal phononic crystals in aluminum nitride: An approach to ultra high frequency bandgaps. *Applied Physics Letters*, **99**, 163501.
- Kushwaha, M.S. and Halevi, P., 1994. Band-gap engineering in periodic elastic composites. *Applied Physics Letters*, **64(9)**, 1085–1087.
- Kushwaha, M.S., Halevi, P., Dobrzynski, L. and Djafari-Rouhani, B., 1993. Acoustic band structure of periodic elastic composites. *Physical Review Letters*, **71(13)**, 2022–2025.
- Kushwaha, M.S., 2016. The Phononic Crystals: An unending quest for tailoring acoustics. *Modern Physics Letters B*, **30(19)**, 1630004.
- Li, F-L., Wang, Y-S., Zhang, C., 2011. Bandgap calculation of two-dimensional mixed solid–fluid phononic crystals by Dirichlet-to-Neumann maps. *Physica Scripta*, **84(5)**, 055402.
- Li, J., Wang, Y. and Zhang, C., 2008. Finite element method for analysis of band structures of three dimensional phononic crystals. *2008 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings*, **1-4**, 1468-1471.
- Li, X., Wu, F., Hu, H., Zhong, S. and Liu, Y., 2002. Large acoustic band gaps created by rotating square rods in two-dimensional periodic composites. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **36(1)**, L15-L17.
- Lin, Sz-C.S. and Huang T.J., 2011. Tunable phononic crystals with anisotropic inclusions. *Physical Review B*, **83**, 174303.
- Liu, Z., Zhang, X., Mao, Y., Zhu, Y.Y., Yang, Z., Chan, C.T. and Sheng, P., 2000. *Locally resonant sonic materials. Science*, **289(5485)**, 1734-1736.
- Lu, M.H., Feng, L. and Chen, Y.F., 2009. Phononic crystals and acoustic metamaterials. *Materials Today*, **12(12)**, 34-42.
- Júnior, E.J.P. de M. and Santos, J.M.C.D., 2017. Band Structure in Carbon Nanostructure Phononic Crystals. *Materials Research*, **20(2)**, 555-571.
- Meseguer, F., Holgado, M., Caballero, D., Benaches, N., Sánchez-Dehesa, J., López, C. And Llinares, J., 1999. Rayleigh-wave attenuation by a semi-infinite two-dimensional elastic-band-gap crystal. *Physical Review B*, **59**, 12169–12172.
- Miranda Jr., E.J.P. de and Santos, J.M.C.D., 2017. Complete Band Gap in Nano-Piezoelectric Phononic Crystals. *Materials Research*, **20**, supl.1, 15-38.
- Montero de Espinosa, F.R., Jiménez, E. and Torres, M., 1998. Ultrasonic band gap in a periodic two-dimensional composite. *Physical Review Letters*, **80**, 1208-1211.
- Nicola, F.De., Purayil, N.S.P., Spirito, D., Miscuglio, M., Tantussi, F., Tomadin A., Angelis, F.De., Polini, M., Krahne, R. and Pellegrini, V., 2018. Multiband Plasmonic Sierpinski Carpet Fractal Antennas. *ACS Photonics*, **5(6)**, 2418-2425.
- Norris, R.C., Hamel, J.S. and Nadeau P., 2008. Phononic band gap crystals with periodic fractal inclusions: Theoretical study using numerical analysis. *Journal of Applied Physics*, **103**, 104908.
- Pennec, Y., Rouhani, B.D., El Boudouti, E., Li, C., El Hassouani, Y., Vasseur et al, J.O., 2011. Band gaps and waveguiding in phoxonic silicon crystal slabs. *Chinese Journal of Physics*, **49**, 100–110.

- Pennec, Y., Vasseur, J.O., Djafari-Rouhani, B., Dobrzyński, L. and Deymier, P.A., 2010. Two-dimensional phononic crystals: Examples and applications. *Surface Science Reports*, **65**, 229-291.
- Sainidou, R., Stefanou, N. and Modinos, A., 2002. Formation of absolute frequency gaps in three-dimensional solid phononic crystals. *Physical Review B*, **66(21)**, 2012301.
- Sigalas, M.M. and Economou, E.N., 1992. Elastic and acoustic-wave band-structure. *Journal of Sound and Vibration*, **158(2)**, 377–382.
- Song, A., Wang, X., Chen, T. and Wan L., 2017. Band structures in a two-dimensional phononic crystal with rotational multiple scatterers. *International Journal of Modern Physics*, **31 (06)**, 1750038.
- Tanaka, Y., Tomoyasu, Y. and Tamura, S., 2000. Band structure of acoustic waves in phononic lattices: Two-dimensional composites with large acoustic mismatch. *Journal of Sound and Vibration*, **62**, 7387-7392.
- Vasseur, J. O., Deymier, P.A., Frantziskonis, G., Hong, G., D-Rouhani, B. and Dobrzynski, L., 1998. Experimental evidence for the existence of absolute acoustic band gaps in two-dimensional periodic composite media. *Journal of Physics: Condensed Matter*, **10**, 6051–6064.
- Wang, J., Xu ,X., Liu ,X. and Xu ,G., 2009. A tunable acoustic filter made by periodical structured materials. *Applied Physics Letters*, **94(18)**, 181908.
- Wang, X.H., Gu, B. Y., Li, Z.Y. and Yang, G.Z., 1999. Large absolute photonic band gaps created by rotating noncircular rods in two-dimensional lattices. *Physical Review B*, **60(16)**, 11417-11411.
- Wang, Y.Z., Li, F.M., Huang, W.H. and Wang, Y.S., 2007. Effects of inclusion shapes on the band gaps in two-dimensional piezoelectric phononic crystals. *Journal of Physics: Condensed Matter*, **19**, 496204.
- Wilm, M., Khelif, A., Laude, V. and Ballandras, S., 2007. Design guidelines of 1-3 piezoelectric composites dedicated to ultrasound imaging transducers, based on frequency band-gap considerations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **122(2)**, 786-793.
- Wu, T.T., Wu, L.C. and Huang, Z.G., 2005. Frequency band-gap measurement of two-dimensional air/silicon phononic crystals using layered slanted finger interdigital transducers. *Journal of Applied Physics*, **97(9)**, 94916.
- Yu, D., Wen, J., Zhao, H., Liu, Y. and Wen, X., 2008. Vibration reduction by using the idea of phononic crystals in a pipe-conveying fluid. *Journal of Sound and Vibration*, **318(1-2)**, 193-205.
- Zou, K., Wang, Y-feng and Wang, Y-sheng., 2013. The effects of the rod rotation on the band gaps of a two-dimensional piezoelectric phononic crystal. Proceedings of the 2013 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications, SPAWDA 2013.

#### İnternet kaynakları

1-<http://www.comsol.com>. COMSOL AB, Stockholm, Sweden. COMSOL Multiphysics® v. 5.2.