



Akustik Işıma Kuvvetiyle Milimetre Boyutundaki Katı Parçacıkların Tuzaklanması ve Ayrıştırılması

Trapping and Separation of Solid Particles with the Size of Millimeters by Acoustic Radiation Force

Nurettin Körözlü ^{1*}

¹ Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Nanobilim ve Nanoteknoloji Bölümü, 15030, Burdur, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: nkorozlu@mehmetakif.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 14.12.2022

Kabul Tarihi / Accepted: 22.02.2023

Atıf şekli/ How to cite: KÖRÖZLÜ, N.(2023). Akustik Işıma Kuvvetiyle Milimetre Boyutundaki Katı Parçacıkların Tuzaklanması ve Ayrıştırılması. DEUFMD, 25(75), 639-646.

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2023257510

Öz

Akustik ışımaya kuvvetlerinden faydalanarak hava ortamında mm boyutundaki parçacıkların tuzaklanması ve manipülasyonu son zamanlarda yoğun ilgi gören çalışma alanlarından biridir. İki boyutlu fononik kristallerin çizgisel kusur durumları ile akustik ışımaya kuvvetinden faydalanılarak havada mm boyutunda katı parçacıkların akustik metamalzeme mercekler ile manipülasyonu ve boyutlarına göre ayrıştırılması sayısal hesaplamalar ile gösterilmiştir. Bu yapılırken, Sonlu Elemanlar Yöntemiyle simülasyon hesabı yapılarak fononik kristallerin band yapıları elde edilmiştir. Çalışmada iki boyutlu fononik kristal ile oluşturulan bir dairesel halka çınlaçta yerçekimi ve akustik ışımaya kuvvetlerinin birlikte etkisi ile küresel parçacıkların dairesel yörüngede hareketi sağlanmıştır. Hesaplamalarda 0.25 mm, 0.4 mm ve 0.55 mm çaplı polistiren küreciklerin hareketi $t=0, 50, 100, 150, 200$ ve 400 ms deki konumları incelenmiştir. Bütün parçacıklar dairesel düğüm çizgisini izleyerek belirtilen sürelerde yörüngeyi yaklaşık olarak $\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}$ ve 1 oranındaki kısımlarını kat etmişlerdir. $t=400$ ms anında 0.55 mm çaplı parçacık yaklaşık olarak iki turu tamamlarken, diğer parçacıklar sürüklenme kuvvetinden dolayı çizgisel hızlarını kaybetmekte ve düğüm çizgisinin en alt noktasında ayrılarak tuzaklanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Akustik ışımaya kuvveti, Fononik kristal, Parçacık tuzaklama, Parçacık ayırıştırma.

Abstract

Trapping and manipulating mm-sized particles in the air by utilizing acoustic radiant forces are one of the fields of study that have recently attracted great interest. By using the linear defect states of the two-dimensional phononic crystals and the acoustic radiation force, the manipulation of the mm-sized solid particles in the air with acoustic metamaterial lenses and their separation according to their size have been shown by numerical calculations. While doing this, the band structures of the phononic crystals were obtained by simulation calculation with the Finite Element Method. In the study, the movement of spherical particles in a circular orbit was ensured by the combined effect of gravity and acoustic radiation forces in a circular ring resonant formed with a two-dimensional phononic crystal. The calculations examined the motion of the 0.25 mm, 0.4 mm and 0.55 mm diameter polystyrene spheres and their positions at $t=0, 50, 100, 150, 200,$ and 400 ms. All the particles followed the circular nodal line and traversed approximately $\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4},$ and 1 part of the orbit in the indicated times. At $t=400$ ms, the

0.55 mm diameter particle completes approximately two turns, while the other particles lose their linear velocity due to the drag force and are trapped at the lowest point of the nodal line.

Keywords: Acoustic radiation force, Phononic crystal, Particle trapping, Particle separation.

1. Giriş

Akustik ışına kuvvetlerine büyük ölçeklerde bakıldığında su ve hava ortamındaki cisimlerin manipülasyonu için başvurulmaktadır. Bunun en popüler örneği durağan ultrasonik alanda parçacıkların düğüm noktalarında tuzaklandığı akustik cimbizlardır. Tuzaklamanın dışında, aralarında programlı faz ve genlik ilişkisi bulunan akustik transdüser dizileri kullanarak milimetre ve santimetre ölçeğindeki katı cisimlerin ve sıvı damlacıklarının havada belirli yörüngelerde taşınması sağlanabilmektedir. Ayrıca, milimetre ölçekli parçacıkların boyut ve yoğunluklarına göre ayrıştırılması için değişik yaklaşımlar da ortaya konulmaya başlanmıştır.

Daha küçük ölçekte, örneğin biyolojik veya inorganik materyallerin temassız manipülasyonunda, yaşam bilimlerinde, malzeme teknolojileri ve ilaç endüstrisi gibi birçok alanda önemli bir gereksinimdir. Akustik ışına kuvvetleri bu kapsamda değişik ölçeklerdeki nesnelere tuzaklanması, örüntülenmesi, taşınması ve ayrıştırılması için yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yaklaşım, optik ışına kuvvetleri ve dielektroforez gibi alternatiflerine kıyasla düşük güç tüketimi ve sistem yalınlığı, düşük maliyet, biyo-uyumluluk ve ölçeklenebilirlik gibi pek çok üstünlüğe sahiptir.

Bu çalışmada, milimetre ölçeğindeki yoğun parçacıkların hava ortamında tuzaklanması ve ayrıştırılabilmesi için yukarıda bahsi geçen kısıtlamaları içermeyen bir sistem geliştirilmiştir.

Mikroakışkan sistemlerde, akustik ışına kuvvetlerinin sıvıların düşük Reynolds sayıları ile laminer aktığı birçok uygulaması vardır. Bu tür sistemlerde akustik kuvvet bir piezoelektrik alttaş üzerinde iç içe geçmiş taraklı transdüserler (IDT) tarafından üretilen yüzey akustik dalgası (YAD), mikro kanal içerisindeki sıvıda Rayleigh açısı ile kırılarak oluşmaktadır [1-3]. Karşılıklı iki özdeş IDT ile durağan YAD oluşturulup mikro parçacıkların boyutlarına göre ayrıştırılması [4-7] yaygın bir uygulama yöntemidir. Durağan YAD akustoforez, dolaşımdaki kan içerisindeki *Eshcherichia coli* [8], dolaşımdaki tümör hücreleri [9], 30-200 nm

boyutlarındaki eksozomlar [10] gibi biyomateryallerin ayrıştırılmasında başarı ile kullanılmıştır. Bir mikroakışkan odasında biyo partiküllerin temassız ve durağan ultrasonik dalgalarla parçacık manipülasyonunun en bilinen örneği, akustik özellikleri suya yakın olan polistiren gibi küresel parçacıkların havada, durağan alanın düğümlerinde tuzaklandığı akustik kaldırmadır [11-13]. Durağan alan oluşturmak için manyetostriktif veya Langevin tipi yüksek güçlü ultrasonik transdüser ve yansıtıcı plaka içeren sistemler [14], genellikle akustik cimbizlar olarak tanımlanmaktadır [15].

Hava ortamında ultrasonik dalgalarla akustik tuzaklama, durağan olmayan dalgalarla da elde edilebilmektedir. Son zamanlarda ultrasonik alanı su ortamında odaklayan tek demetli tuzaklama sistemleri, yansıtıcının ortadan kaldırıldığı ve akustik transdüser çıkışının merceğe gibi tasarlandığı çalışmalar yapılmaktadır [16-18]. Ayrıca, karmaşık durağan alanda parçacık tuzaklanması sekizgenin her kenarına birer transdüser yerleştirilerek oluşturulmuştur [19]. Bunun yanında, top tripod düzeninde yerleştirilmiş üç adet Langevin üretici ile 50 mm ve daha fazla çapa sahip bir polistiren havada askıda tutulmuştur [20].

Hava ortamında parçacık manipülasyonunun ikinci amacı parçacıkların taşınmasıdır. Örneğin, bir Bessel akustik demetinde negatif aksel ışına kuvvetleri nedeniyle parçacıkların kaynağa doğru çekilmesi teorik olarak incelenmiş [21, 22] ve ayrıca çok odaklı Fresnel merceği kullanılarak da gerçekleştirilmiştir [23]. Sıvı damlalar ve hatta yüksek en-boy oranlı parçacıklar, düzlemsel yansıtıcı bir dizi Langevin transdüserin genliğini ve fazlarını programlı olarak değiştirerek istenen yörüngelerde hareket ettirebilmiştir [24]. Ayrıca, bir altgenin karşılıklı kenarlarına yerleştirilen üç adet transdüser-yansıtıcı çiftiyle su damlacıklarının dairesel hareketi ve kendi eksenleri etrafında dönmesi sağlanmıştır [25]. Holografik akustik elemanlar kullanan parçacık taşıma sistemi, transdüserler arasındaki faz ve genlik ilişkisinin programlandığı bir diğer sistemdir [26]. Bu sistemler akustik parçacık taşınmasında esneklik sağlasa da birçok transdüser ve elektriksel bağlantı vb. içermeleri

nedeniyle oldukça karmaşıktır. Bununla birlikte, sabit akustik alanın düğüm noktalarını hareket ettirerek parçacıkların taşındığı daha basit sistemler de önerilmiştir [27, 28]. Düğüm noktalarının hareketi, bir transdüser çiftinde fazın değiştirilmesi [27] ya da yansıtıcı plakanın hareket ettirilmesi ile sağlanır [28]. Ancak bu yaklaşımlar esnek değildir çünkü parçacıklar yalnızca doğrusal yörüngelerde hareket etmektedir. Bunun yanında, su ve polistiren parçacıkların dışında daha yoğun parçacık kullanılması durumunda gerekli güç kabul edilemez sınırlara ulaşabilmektedir.

Bu çalışmada fononik kristallerin zengin kip özelliklerinden yararlanarak ve ultrasonik transdüserlerin genlikleri modüle edilerek esneklik ve yalınlık sağlanmıştır. Örneğin, bir boyutlu yamuk biçimli çıkıntıları içeren fononik kristal ile oluşturulmuş dairesel halka çınlacın parçacıkları dairesel hareket yapmak için kullanma olasılığı araştırılmıştır [29]. Benzer bir halka çınlaç dairesel çubuklar içeren 2B fononik kristal ile de oluşturulabilir. Örneğin, hava ortamında kare örgü düzeninde dizili çelik çubuklardan oluşan 2B fononik kristalde uyarılan yüzey kipleri [30,31], yarıçapı örgü sabitinden çok büyük daireler üzerine dizili çubuklardan oluşan halka çınlacın uyarım frekansına bağlı olarak değişik çınlanım kiplerini uyurabilmektedir.

Bu çalışmada 2B FK çizgisel kusur kipleri, yüzey kipleri ile dairesel yörüngelerde parçacık ayırıştırma ve parçacık tuzaklama yapılmıştır. Yüzey kipleriyle meydana getirilen dairesel halka çınlacın rezonans kipleri ve kiplerle etkileşim halinde olan küresel katı parçacıkların dairesel hareketi incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Çalışmadaki hesaplamalar COMSOL MultiPhysics yazılımı kapsamında bulunan akustik modül kullanılarak, 2 Boyutlu (2B) Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) simülasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Empedans farkının fazla olduğu sistemlerde (hava-katı gibi) dalgalar boyuna dalgalar olarak yayıldığı kabul edilir ve akustik denklem sinüzoidal basınç alanı $(p(\mathbf{r},t)=p(\mathbf{r})e^{i\omega t})$ ile çözümlenir:

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho_0} \nabla p(\mathbf{r}) \right) + \frac{\omega^2 p(\mathbf{r})}{\rho_0 c_0^2} = 0 \quad (1)$$

Burada, ρ_0 ve c_0 sırasıyla hava yoğunluğu ve havadaki ses hızıdır. Akustik empedans farkı ($Z_h/Z_c=9.1 \times 10^{-6}$) hava ve çelik arasında çok fazla

olmasından dolayı hava ortamındaki akustik dalgaların çelik yüzeyinden tamamen yansıtıldığı kabul edilebilir [32]. Hesaplamalarda bu yüzden rijit sınır koşulu kullanılmıştır:

$$\mathbf{n} \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla p(\mathbf{r}) \right) = 0 \quad (2)$$

FEM simülasyonlarının ilk adımı, FK için bant yapısı hesaplamasıdır. "Periyodik Sınır Koşulları (PSK)" altında FK için band yapıları, Eşitlik (1)'in süper hücreler için çözülmesi ile elde edilmiştir [30, 33]. Hava ortamında örgü sabiti a olacak şekilde kare örgü düzeninde dizili r yarıçaplı çubuklardan oluşan fononik kristal dalga kılavuzunun band hesabında kullanılan kare örgü birinci Brillouin bölgesi Şekil 1'in içerisinde ve yüzey kip bandlarının elde edilmesi için kullanılan süper hücrede Şekil 2'nin içerisinde görülmektedir.

Parçacık manipülasyonunun FEM simülasyonları için COMSOL Multiphysics yazılımının akışkan akışı için parçacık izleme (Particle-tracing for fluid flow) modülü kullanılmıştır. Bu hesaplar iki aşamada yürütülmüştür. İlk aşamada, frekansa bağlı akustik alan simülasyonları yapılarak ışına kuvvetini oluşturan arka plan alanı belirlenmiştir. İkinci aşamada ise parçacık izleme modülü ile zamana bağlı simülasyon yapılarak ilk hızsız bırakılan küresel polistiren parçacıkların davranışı incelenmiştir. Polistiren parçacık yoğunluğu ve bulk modülü sırasıyla $\rho_p=2500 \text{ kg/m}^3$ ve $K_p=330 \text{ MPa}$ alınmıştır. Ayrıca hesaplamalarda hava ortamının durgun olduğu ($\mathbf{u}=0$) varsayılarak parçacık hareketi incelenirken Stokes sürüklenme kuvveti de hesaba katılmıştır. Yerçekimi kuvveti 2B ve 3B hesaplarda sırasıyla -y ve -z yönünde alınmıştır. Parçacık yarıçapı $0.1 \text{ mm} \leq r_p \leq 1.0 \text{ mm}$ aralığında seçilmiştir. Bu yarıçap $r_p/\lambda_0 \ll 1$ aralığında olduğundan, parçacık yarıçapının küpü ile ve basınç genliğinin karesi ile değişen akustik ışına kuvveti kullanılmıştır.

Gor'kov yaklaşımına göre [34], dalga boyundan çok daha küçük bir yarıçapa sahip küresel bir parçacık için, akustik ışına kuvveti, U_a akustik ışına potansiyeli olarak tanımlanan radyasyon potansiyelinin negatif gradyanı olarak $\mathbf{F}_a = -\nabla U_a$ yazılabilir. Burada potansiyel

$$U_a = V_p \left[f_1 \frac{1}{2\rho_0 c_0^2} \langle p^2 \rangle - f_2 \frac{3}{4} \rho_0 \langle v^2 \rangle \right] \quad (3)$$

Burada U_a akustik ışımaya potansiyeli, V_p parçacığın hacmi, ρ_0 ve c_0 da sırasıyla akışkanın yoğunluğu ve ses hızı olup “ $\langle \rangle$ ” gösterimi zamana göre ortalamayı ifade etmektedir. Eşitlik (3)’te p ve v sırasıyla akustik basınç alanı ve akışkan moleküllerin titreşim hızı olup f_1 ve f_2 , ρ_0 ve c_p , sırasıyla, parçacığın yoğunluğu ve parçacık içerisinde boyuna ses hızı olmak üzere

$$f_1 = 1 - \frac{\rho_0 c_0^2}{\rho_p c_p^2} \quad (4)$$

$$f_2 = \frac{2(\rho_p - \rho_0)}{2\rho_p + \rho_0} \quad (5)$$

Şeklinde ifade edilen monopol ve dipol terimleridir. f_1 , akışkan bir ortam içinde sıkıştırılabilir cisimden akustik alanın saçılmasını tanımlarken, f_2 , sıvı içindeki sıkıştırılmaz parçacıkların yer değiştirmesiyle ilgilidir [35]. Durağan harmonik alan altında $r \ll \lambda$ olan küresel parçacık için Eşitlik (3);

$$F_a = - \left(\frac{\pi p_0^2 V_p \beta_0}{2\lambda} \right) \Phi(\beta, \rho) \sin(2kx) \quad (6)$$

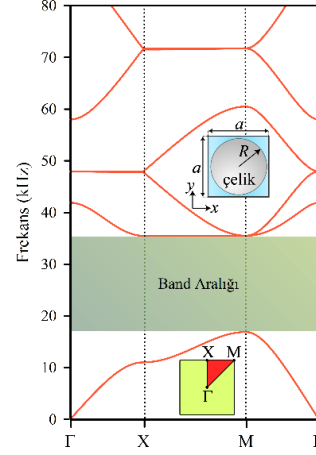
$$\Phi(\rho, \beta) = \frac{5\rho_p - 2\rho_0}{2\rho_p + \rho_0} - \frac{\beta_p}{\beta_0} \quad (7)$$

şeklinde yazılabilir [5]. Denklem (6)’da p_0 uygulanan basınç alanının genliği, β_0 ve β_p akışkan ortamın ve parçacığın sıkıştırılabilirliği, $k=2\pi/\lambda$ dalga sayısı, Φ akustik karışıklık faktörüdür. Φ , su ya da yağ içeren mikroakışkan sistemlerdeki çoğu biyolojik materyal için pozitif iken, bazı durumlarda negatif olabilir. Öte yandan hava ortamındaki katı parçacıklar için Φ , ideal 5/2 değerine çok yakın değerler alır ve böylece akustik kontrast faktörü, parçacığın durağan alanın hangi bölgesinde tutulacağını belirler [36].

3. Bulgular

FEM simülasyonlarının ilk adımı, her bir FK için band yapısı hesaplamasıdır. Şekil 1’de 2B FK band yapısı verilmiştir. Burada, 17.06 kHz ile 35.33 kHz arasında geniş bir band aralığı gözlenmekte olup bu frekans aralığı $f_0=20$ kHz frekansını kapsamaktadır. Şekil 1’in orta kısmında havada kare örgü düzeninde dizili $R=3.5$ mm yarıçaplı ve örgü sabiti $R/a=0.47$ olacak biçimde $a=7.45$ mm olan 2B FK band yapısı hesabında kullanılan birim hücre görülmektedir. Band hesaplamalarında Bloch-

Floquet PSK kullanılmıştır. Kare FK’nin birinci Brillouin bölgesi Şekil 1’in alt kısmında gösterilmiştir.

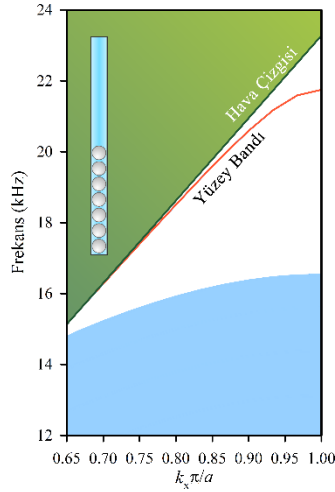


Şekil 1. Kare örgü birinci Brillouin bölgesi ile FK band yapısı.

Figure 1. The first Brillouin zone for the square lattice and the band structure of the phononic crystal (PnC).

2B FK’nın [10] (ΓX) dizilimi için band yapısı hesaplarında kullanılan süper hücre Şekil 2’nin içinde verilmiştir. Burada 1×14 süper hücre kullanılmış ve çizgisel kılavuzun enine genişliği $\Delta y=a$ alınmıştır. İlerleme doğrultusunda (x eksen) dalga vektörü $k_x=[0, \pi/a]$ aralığında taranarak dispersiyon eğrisi elde edilmiştir.

Maksimum kenar uzunluğu üçgensel elemanlar için $a/10$ alınmıştır. Fononik kristalin çizgisel kusur kip özellikleri dalga kılavuzu genişliğine de bağlı olup, bu genişliğin uygun olması durumunda kılavuzda grup hızının sesin havadaki hızının küçük bir kesrine düşürüldüğü yavaş ses elde edilerek dalga kılavuzunun tuzaklama ve parçacık taşıma özelliklerinin dinamik ayarlanmasında kullanılmıştır.



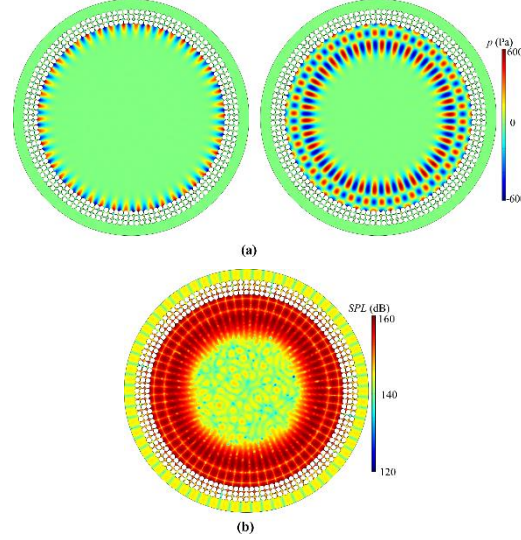
Şekil 2. FK dispersiyon eğrisi.

Figure 2. PnC dispersion curve.

Şekil 2'deki simetrik süper hücreyle 2B FK yüzey kip band yapısı hesaplamaları hava bölgelerinde saçıcı sayıları $n_p=n_a=7$ alınarak yapılmıştır. $R=3.5$ mm olan kare örgü düzenindeki 2B FK (10) yüzey band yapısı Şekil 2'de verilmiştir. Buradaki, hava çizgisi olarak adlandırılan çizgi (çapraz siyah çizgi), hava ortamında akustik dalgaların $\omega=c_0k_x$ biçiminde tanımlanan hava için dağılım fonksiyonuna karşılık gelmektedir. Bu çizgiler Bloch kipleri ile hava ortamında yığın (Bulk) dalga olarak ilerleyen kipleri birbirinden ayırdığı için önemlidir [37]. Yeşil renkli alan ile tarananmış bölge çizginin üzerindeki kipler olup, dikkate alınmamıştır. Hava çizgisi altındaki bantlar ise yığınsal yapı (bulk) üzerine dağılan Bloch kiplerine karşılık gelmektedir. Ayrıca, tekil band (hava çizgisinin hemen altındaki) 2B FK (10) yüzey kiplerine karşılık gelmekte olup, R/a oranı arttıkça hava çizgisine yaklaşmaktadır. Bunun sebebi katı doldurma oranının artması sonucu FK-hava ara kesitine yerleşmiş kip hacminin küçülerek kip frekansının yükselmesidir.

Şekil 1'de verilen 2B FK ile Şekil 3'deki dairesel halka çınlaç oluşturulmuştur. Burada, çınlaç dışından gönderilen akustik dalganın çınlacın rezonans kiplerini uyarması için yalnızca üç sıra saçıcı kullanılmıştır. Ayrıca, her bir sıradaki saçıcı sayısı taranarak $N=70$ alınmıştır. Şekil 3'de 20 kHz'e en yakın olan çınlanım kipleri gösterilmiştir. 19834 Hz frekansında 2B FK yüzey kip rezonansına karşılık gelmekteyken, 20011 Hz frekansı yüzey kipleri ile dairesel çınlaç yapısının 2 adet radyal düğüm şekillenimi

sergileyen $(n,m)=(0,2)$ kipinin karışımı bir karakter göstermektedir.



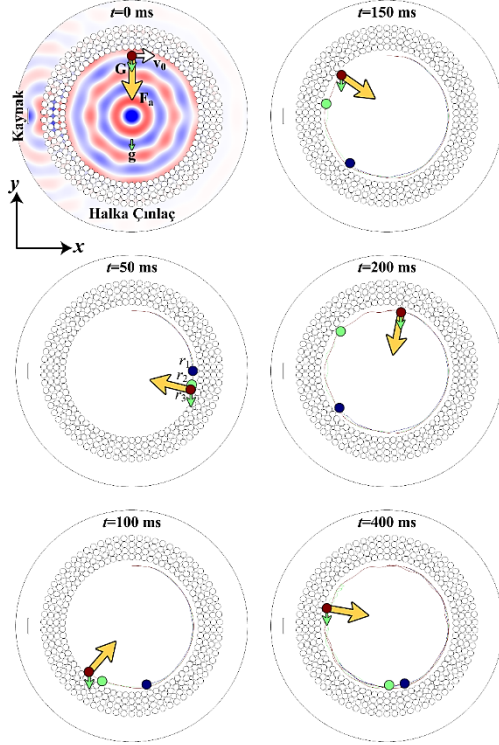
Şekil 3. 2B FK tarafından $R=3.5$ mm ve $R/a=0.47$ ile oluşturulan dairesel halka çınlacın (a) 19834 Hz ve 20011 Hz frekansındaki çınlanım kip şekilleri ve (b) ikinci durum için ses basınç seviyesi dağılımı.

Figure 3. (a) Resonant mode shapes at 19834 Hz and 20011 Hz and (b) sound pressure level distribution for the latter case belonging to the circular ring resonator formed by the two-dimensional (2D) PnC with $R=3.5$ mm and $R/a=0.47$.

Şekil 3(b)'de ikinci rezonans kipinin ses basınç seviyesi dağılımı gösterilmiştir. Ses basınç seviyesi hızlı bir artış göstererek radyal doğrultuda düğüm noktaları etrafında 120 dB ile 160 dB arasında değişmesinden dolayı dar bir akustik ışına potansiyeline karşılık gelmektedir. Küçük bir ilk hızla azimutal yönde serbest bırakılan bir parçacık potansiyel kuyusu içinde dairesel bir yörünge izleyebilir.

Şekil 4'te polistiren küreciklerin dairesel yörüngelerde hareket ettirilmeleri için hava ortamında r_p yarıçaplı ve yoğunlukları 1040 kg/m^3 olan 4 sıra kalınlığındaki dairesel halka çınlaç tasarlanmıştır. Burada, $N=70$ alınmasının sebebi dışarıdan gönderilen dalganın çınlaca nüfuz edebilmesi içindir. Halka çınlaca akustik dalga, $f_0=20$ kHz frekansında çınlacın dışındaki çizgisel kaynak ile verilmektedir. Halka çınlacın yalnızca radyal düğüm çizgilerinin bulunduğu çınlanım kipi bu frekansta uyarılmaktadır. Burada, FEM simülasyonlarında Stokes

sürüklenme (drag) ve akustik ışına kuvvetleri ile yer çekimi kuvveti dikkate alınmış olup, yer çekimi ivmesi (g) $-y$ yönündedir.



Şekil 4. 2B fononik kristal tarafından oluşturulan $N=70$ sıra içeren halka çınlaç ile dairesel yörüngede polistiren kürelerin dönüşü.

Figure 4. Circular motion of polystyrene spheres by the ring resonator containing $N=70$ rows, which is constructed from the 2D PnC.

Polistiren kürecikler $v_0=1.5$ m/s hızla halka çınlaçın birinci radyal düğüm çizgisine denk gelen üst kısmında bir noktadan yatay atılmaktadır. Parçacığa etkiyen F_a akustik ışına kuvveti, parçacığın ağırlığından (G) oldukça büyük olmasından dolayı merkezci ivmeyi sağlamaktadır. Hesaplamalarda kullanılan polistiren küreciklerin boyutları 0.25 mm, 0.4 mm ve 0.55 mm çaplarındadır. 165 dB kaynak ses şiddeti düzeyi kullanılarak dairesel hareketi sağlanmıştır.

Dışardan gönderilen dalganın frekansı, yüksek kalite faktörlü rezonans modu frekansı ile çalıştığından kaynak tarafından üretilen dalganın enerjisi büyük oranda çınlaç modunu uyarmada kullanılmaktadır. Bir başka deyişle halka çınlaç kaynağın akustik enerjisini rezonans modunda hapsedmektedir.

Her grafik, belirtilen anlarda hesaplanan parçacık konumlarını gösterir. $t=0$ ms için halka çınlaç içindeki akustik alan dağılımı da verilmiştir.

Parçacıkların $t=0, 50, 100, 150, 200$ ve 400 ms anındaki konumları ve yörüngeleri Şekil 4'de gösterilmiştir. 0.25 mm, 0.40 mm ve 0.50 mm çaplı parçacıklar sırasıyla lacivert, yeşil ve koyu kırmızı renkli daire ile belirtilmiştir. Bütün parçacıklar dairesel düğüm çizgisini izleyerek $t=50$ ms, $t=100$ ms, 150 ms ve 200 ms anlarında yaklaşık olarak yörüngelin $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ ve 1 oranındaki kısımlarını kat etmişlerdir. Akustik ışına ve sürüklenme kuvvetinin sırasıyla yarıçapın 3. ve 1. kuvvetleri ile orantılı olarak değişmesinden dolayı diğer parçacıklara göre 0.55 mm çaplı parçacık daha fazla yol kat etmiştir. Sürüklenme kuvvetinden dolayı yarıçapı daha büyük olan parçacıklar olarak daha az etkilenmektedir. 0.55 mm çaplı parçacık $t=400$ ms anında 0.55 mm çaplı parçacık yaklaşık olarak iki turu yaparken, diğer parçacıklar sürüklenme kuvvetinin etkisinden dolayı çizgisel hızlarını kaybederek düğüm çizgisinin en alt noktasında tuzaklanmaktadır.

4. Tartışma ve Sonuç

Çalışmada ilk olarak fononik kristallerin band yapıları elde edilerek, tasarlanan fononik kristallerde çizgisel kusur ve yüzey durumları gösterilmiş ve polistren parçacıkları akustik alanda zaman bağlı davranışları incelenmiştir. Bütün simülasyonlar sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmıştır. Tasarlanan iki boyutlu fononik kristal özelliğine sahip bir dairesel halka çınlaçta yerçekimi kuvveti ve akustik ışına kuvvetinin birlikte etkisi altında küresel parçacıkların dairesel bir yörüngede dönüşleri gösterilmiştir. Geliştirilen bu akustik metamalzeme mercek Fabry-Perot rezonansı sergilediği ve kırınım limitinin altında keskin odaklama ve odak noktasında 20 dB'in üzerinde kazanç sağladığı gözlenmiştir. Bu sayede, polistren kürelerin (0.25 mm, 0.4 mm ve 0.55 mm) düşük seviyede akustik güç kullanarak boyutlarına göre etkin bir biçimde ayrıştırılabildikleri sayısal olarak gösterilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 117F403 numaralı proje ile desteklenmektedir.

Kaynakça

- [1] Ding X, Li P, Lin S-CS, Stratton ZS, Nama N, Guo F, et al. 2013. Surface acoustic wave microfluidics. *Lab on a Chip*, 13, 3626-49. DOI: 10.1039/C3LC50361E
- [2] Yeo LY, Friend JR. 2014. Surface acoustic wave microfluidics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 46, 379-406. DOI: 10.1146/annurev-fluid-010313-141418
- [3] Wixforth A. 2003. Acoustically driven planar microfluidics. *Superlattices and Microstructures*, 33, 389-96. DOI: 10.1016/j.spmi.2004.02.015
- [4] Shi J, Mao X, Ahmed D, Colletti A, Huang TJ. 2008. Focusing microparticles in a microfluidic channel with standing surface acoustic waves (SSAW). *Lab on a Chip*, 8, 221-3. DOI: 10.1039/B716321E
- [5] Shi J, Huang H, Stratton Z, Huang Y, Huang TJ. 2009. Continuous particle separation in a microfluidic channel via standing surface acoustic waves (SSAW). *Lab on a Chip*, 9, 3354-9. DOI: 10.1039/B915113C
- [6] Franke T, Abate AR, Weitz DA, Wixforth A. 2009. Surface acoustic wave (SAW) directed droplet flow in microfluidics for PDMS devices. *Lab on a Chip*, 9, 2625-7. DOI: 10.1039/B906819H
- [7] Yeo LY, Friend JR. 2009. Ultrafast microfluidics using surface acoustic waves. *Biomicrofluidics*, 3, 012002. DOI: 10.1063/1.3056040
- [8] Ai Y, Sanders CK, Marrone BL. 2013. Separation of *Escherichia coli* bacteria from peripheral blood mononuclear cells using standing surface acoustic waves. *Analytical Chemistry*, 85, 9126-34. DOI: 10.1021/ac4017715
- [9] Li P, Mao Z, Peng Z, Zhou L, Chen Y, Huang P-H, et al. 2015. Acoustic separation of circulating tumor cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112, 4970-5. DOI: 10.1073/pnas.1504484112
- [10] Lee K, Shao H, Weissleder R, Lee H. 2015. Acoustic purification of extracellular microvesicles. *ACS Nano*, 9, 2321-7. DOI: 10.1021/nn506538f
- [11] Whymark R. 1975. Acoustic field positioning for containerless processing. *Ultrasonics*, 13, 251-61. DOI: 10.1016/0041-624X(75)90072-4
- [12] Wu J. 1991. Acoustical tweezers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 89, 2140-3. DOI: 10.1121/1.400907
- [13] Polychronopoulos S, Memoli G. 2020. Acoustic levitation with optimized reflective metamaterials. *Scientific Reports*, 10, 1-10. DOI: 10.1038/s41598-020-60978-4
- [14] Tsujino S, Tomizaki T. 2016. Ultrasonic acoustic levitation for fast frame rate X-ray protein crystallography at room temperature. *Scientific Reports*, 6, 1-9. DOI: 10.1038/srep25558
- [15] Brandt E. 2001. Suspended by sound. *Nature*, 413, 474-5. DOI: 10.1038/35097192
- [16] Lee J, Teh S-Y, Lee A, Kim HH, Lee C, Shung KK. 2009. Single beam acoustic trapping. *Applied Physics Letters*, 95, 073701. DOI: 10.1063/1.3206910
- [17] Silva GT, Baggio AL. 2015. Designing single-beam multitrapping acoustical tweezers. *Ultrasonics*, 56, 449-55. DOI: 10.1016/j.ultras.2014.09.010
- [18] Baresch D, Thomas J-L, Marchiano R. 2016. Observation of a single-beam gradient force acoustical trap for elastic particles: acoustical tweezers. *Physical Review Letters*, 116, 024301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.024301
- [19] Seah SA, Drinkwater BW, Carter T, Malkin R, Subramanian S. 2014. Correspondence: Dexterous ultrasonic levitation of millimeter-sized objects in air. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 61, 1233-6. DOI: 10.1109/TUFFC.2014.3022
- [20] Andrade MA, Bernassau AL, Adamowski JC. 2016. Acoustic levitation of a large solid sphere. *Applied Physics Letters*, 109, 044101. DOI: 10.1063/1.4959862
- [21] Marston PL. 2006. Axial radiation force of a Bessel beam on a sphere and direction reversal of the force. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120, 3518-24. DOI: 10.1121/1.2361185
- [22] Zhang L, Marston PL. 2013. Optical theorem for acoustic non-diffracting beams and application to radiation force and torque. *Biomedical Optics Express*, 4, 1610-7. DOI: 10.1364/BOE.4.001610
- [23] Choe Y, Kim JW, Shung KK, Kim ES. 2011. Microparticle trapping in an ultrasonic Bessel beam. *Applied Physics Letters*, 99, 233704. DOI: 10.1063/1.3665615
- [24] Foresti D, Nabavi M, Klingauf M, Ferrari A, Poulikakos D. 2013. Acoustophoretic contactless transport and handling of matter in air. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, 12549-54. DOI: 10.1073/pnas.1301860110
- [25] Foresti D, Poulikakos D. 2014. Acoustophoretic contactless elevation, orbital transport and spinning of matter in air. *Physical Review Letters*, 112, 024301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.024301
- [26] Marzo A, Seah SA, Drinkwater BW, Sahoo DR, Long B, Subramanian S. 2015. Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects. *Nature Communications*, 6, 1-7. DOI: 10.1038/ncomms9661
- [27] Bjelobrck N, Foresti D, Dorrestijn M, Nabavi M, Poulikakos D. 2010. Contactless transport of acoustically levitated particles. *Applied Physics Letters*, 97, 161904. DOI: 10.1063/1.3504191
- [28] Koyama D, Nakamura K. 2010. Noncontact ultrasonic transportation of small objects over long distances in air using a bending vibrator and a reflector. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 57, 1152-9. DOI: 10.1109/TUFFC.2010.1527
- [29] Kaya OA, Korozlu N, Trak D, Arslan Y, Cicek A. 2019. One-dimensional surface phononic crystal ring resonator and its application in gas sensing. *Applied Physics Letters*, 115, 041902. DOI: 10.1063/1.5090592
- [30] Cicek A, Gungor T, Kaya OA, Ulug B. 2015. Guiding airborne sound through surface modes of a two-dimensional phononic crystal. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 48, 235303. DOI: 10.1088/0022-3727/48/23/235303
- [31] Rongrong W, Xiaozhou L, Jiehui L, Xiufen G. Calculation of acoustical radiation force on microsphere by spherically-focused source. *Ultrasonics*, 54, 7. DOI: 10.1016/j.ultras.2014.05.005
- [32] Korozlu N, Kaya OA, Cicek A, Ulug B. 2018. Acoustic Tamm states of three-dimensional solid-fluid phononic crystals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 143, 756-64. DOI: 10.1121/1.5023334
- [33] Cicek A, Adem Kaya O, Yilmaz M, Ulug B. 2012. Slow sound propagation in a sonic crystal linear

- waveguide. *Journal of Applied Physics*, 111, 013522. DOI: 10.1063/1.3676581
- [34] Gor'kov LP. On the forces acting on a small particle in an acoustical field in an ideal fluid. *Soviet Physics Doklady*, 1962. p. 773-775.
- [35] Bruus H. 2012. Acoustofluidics 7: The acoustic radiation force on small particles. *Lab on a Chip*, 12, 1014-21. DOI: 10.1039/C2LC21068A
- [36] Shi J, Yazdi S, Lin S-CS, Ding X, Chiang I-K, Sharp K, et al. 2011. Three-dimensional continuous particle focusing in a microfluidic channel via standing surface acoustic waves (SSAW). *Lab on a Chip*, 11, 2319-24. DOI: 10.1039/C1LC20042A
- [37] Korozlu N, Kaya O, Cicek A, Ulug B. 2019. Self-collimation and slow-sound effect of spoof surface acoustic waves. *Journal of Applied Physics*, 125, 074901. DOI: 10.1063/1.5061770