

Bir Boyutlu Periyodik Kavite İçeren Fononik Kristaller ile Akustik Ekle-Bırak Filtresi Tasarımı

Ahmet BİÇER* 

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Gölhisar Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Optisyenlik Programı, 15400, Gölhisar/Burdur

Geliş / Received: 21.11.2019, Kabul / Accepted: 19.12.2019

Öz

Katı yüzeyde bir boyutta periyodik silindirik kavite içeren dalga kılavuzları ve halka çınlaç kullanılarak tasarlanan bir akustik ekle-bırak filtresinin hava ortamında çalışması ve performansı sayısal olarak incelenmiştir. 20 kHz civarında çalışma hedeflendiğinde, periyodu 5.0 mm olan 2.0 mm yarıçaplı kavite yüzeye merkezlerinden itibaren yarıçapın %30'u kadar gömüldüğünde, Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak yapılan band yapısı hesaplamaları sonucunda hedef çalışma frekansını kapsayan geniş dispersiyon sergileyen yüzey bandı belirlenmiştir. Kaviteye ve komşuluğundaki dar bir hava bölgesine lokalize olan etkileşimli Bloch yüzey akustik dalgaları, birbirine bakan ve periyodun 1.5 katı uzaklıkta iki yüzey için birbirinden ayrılan ve belirli bir frekans aralığında örtüşen iki adet yüzey bandındaki simetrik ve asimetrik kipler halini almaktadır. Dalga kılavuzları arasında her bir kılavuz ile mesafesi 1.5 periyot olan ve toplam 85 kavite içeren 67.6 mm yarıçaplı dairesel halka çınlaç konulduğunda, frekansa bağlı Sonlu Elemanlar Yöntemi simülasyonları ile 20 kHz frekansında bırak portu çıkışında maksimum gözlenirken, direkt ve ekle portlarından minimum çıkış belirlenmiştir. Port çıkışları frekansa bağlı olarak dalgalı seyir izlemekte ve gözlenen pikler artan frekans ile sıklaşmaktadır. 22.08 kHz frekansında bırak portu çıkışında genişliği 57 Hz ve kalite faktörü 387 olan pik gözlenmektedir. Önerilen akustik ekle-bırak filtresi akustik sinyal işleme, akustik mantık ve ultrasonik sensörler gibi alanlarda kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Yüzey akustik dalgaları, halka çınlaç, ekle-bırak filtresi, kip eşleşmesi, vuru, Sonlu Elemanlar Yöntemi.

Acoustic Add-Drop Filter Design With Phononic Crystals Containing One-Dimensional Periodic Cavities

Abstract

Operation and performance of an acoustic add-drop filter which incorporates one-dimensional cylindrical periodic cavities on a solid surface in air environment are numerically investigated. In case of 20 kHz target operation frequency, a surface band covering this frequency with broad dispersion is determined through band structure calculations via the Finite-Element Method when cavities with 5.0 mm period and 2.0 mm radii are embedded into the surface by 30% from their centers. Interacting Bloch surface acoustic waves localized in the cavity and neighboring narrow air region become symmetric and asymmetric modes of two distinct surface bands overlapping in a particular frequency range for two facing surfaces 1.5 periods apart. When a circular ring resonator with 67.6 mm radius, incorporating 85 cavities, is placed between the waveguides so that it is 1.5 period away from each, frequency-domain Finite-Element simulations at 20 kHz reveal that drop port output maximum is observed, whereas through and add outputs are minimum. Port outputs exhibit a fluctuating behavior where the observed peaks appear more frequently with increasing frequency. A peak of the drop port with 57 Hz width and a quality factor of 387 is observed at 22.08 kHz. The proposed acoustic add-drop filter can be utilized in areas such as acoustic signal processing, acoustic logic and ultrasonic sensors.

Keywords: Surface acoustic waves, ring resonator, add-drop filter, mode coupling, beat, Finite Element Method.

1. Giriş

Akustik dalgaların düzlemsel bölgelere hapsedildiği ve yönlendirildiği iki boyutlu (2B) yapay malzemeler son yıllarda yoğun ilgi çekmektedir. Bunun için, fononik kristaller olarak adlandırılan periyodik yapılar kullanılmaktadır (Khelif vd., 2006). Örneđin, ince bir levhaya bal peteği örgü düzeninde açılan silindirik deliklerden oluşan 2B fononik kristal grafende olduğu gibi band yapısında Dirac konisi sergilemektedir (Torrent ve Sánchez-Dehesa, 2012). Ayrıca, kare örgü düzeninde küresel kavite İçeren fononik kristal ile yüzey akustik dalgalarının (YAD) kendiliğinden yönelme ile kılavuzlanması gösterilmiştir (Korozlu vd., 2019). 2B YAD kontrolü düzlemsel akustik alanında geniş uygulama potansiyeline sahiptir.

Yukarıda bahsedilen YAD kipleri değişik şekillerde elde edilebilmektedir. Örneğin, bir katı yüzeyine açılan bir boyutlu (1B) oyuklar ile bu tür dalgalar elde edilebilmektedir (Christensen vd., 2007; Christensen vd., 2010; Cui vd., 2017; He vd., 2011; Jia vd., 2014; Kelders vd., 1998; Lu vd., 2015; Zhou vd., 2010; Zhu vd., 2013). Bunun yanı sıra, yüzeylere açılan kare prizma veya silindirik kesitli 2B kavite İçer de YAD elde edilmesi için kullanılmaktadır (Jia vd., 2013; Schwan vd., 2017; Xie vd., 2018; Ye vd., 2013). 1B ve 2B fononik kristaller ile elde edilen YAD kiplerinde akustik basınç dağılımı ve bu kiplerin dispersiyon davranışları temel olarak yüzeydeki girintilerin veya kavite İerin

geometrik parametrelerine bağlıdır (Lu vd., 2015).

Ekle-bırak filtre İçer için çınlanım için merkezlerinde bir halka çınlaç ve dalgaların bu ınlaca veya ınlatan kendilerine eşleştiiği paralel dalga kılavuzları İçeren yapılarıdır (Yaffe vd., 1994). Bu filtre İçer dalgaların kılavuzlar ile çınlaç arasında enerji değişimi ve çınlaç rezonansı birbirinden ayrı dar frekans aralıklarında gözleendiğinden, özellikle nanofotonik alanında ortamdaki kırılma indisindeki değişimlere duyarlı optik sensörlerin geliştirilmesinde kullanılmaktadır (Mai vd., 2011; Sarkaleh vd., 2017). Optik ekle-bırak filtre İçer 2B fononik kristaller ile elde edilebilmektedir (Qiang vd., 2007). Akustik alanında ise ekle-bırak filtre İçer kendilerine henüz kısıtlı yer bulabilmiştir. Örneğin, Rostami-Dogolsara vd. (2017) hava ortamında periyodik silindirik çubuklardan oluşan 2B fononik kristaller ile gerçekleştirilen ekle-bırak filtresini sayısal olarak incelemiştir. Ancak, deneysel olarak gerçekleştirilmiş bir akustik ekle-bırak filtresi mevcut değildir.

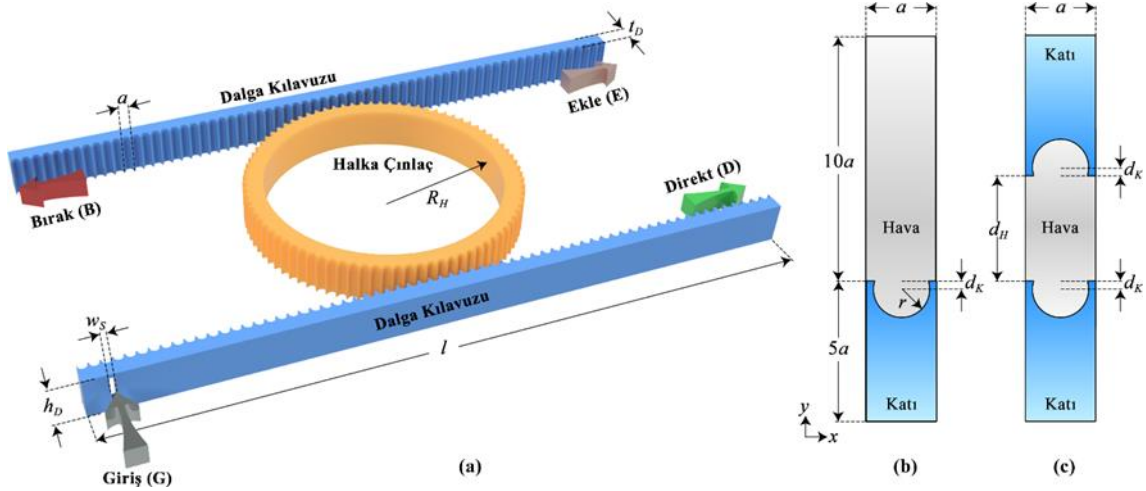
Bu çalışmada katı yüzeyinde 1B periyodik kavite İçer İçeren fononik kristallere dayalı olarak akustik ekle-bırak filtresi tasarımı sayısal olarak incelenmiştir. Ekle-bırak filtresi 1B fononik kristal YAD kipleri için doğrusal iki dalga kılavuzu ve bunlar arasında dairesel halka ınlatan oluşmaktadır. 1B fononik kristalin ve etkileşimli yüzeylerin band analizleri detaylı olarak yapılmıştır. Ekle-bırak filtresinin çıkış portlarında akustik alan dağılımı çınlaç yarıçapına ve frekansa bağlı

olarak incelenmiştir. Bırak portunda yüksek kalite faktörüne sahip çıkış piki gözlenmesi için çalışma frekansı belirlenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada tasarlanan YAD Ekle-Bırak filtresinin şematik görünümü Şekil 1(a)'da verilmiştir. Burada merkezde R_H yarıçaplı halka çınlaç ve yüzeyi ile aralarında d_H mesafe bulunan iki adet dalga kılavuzu vardır. ınla ve dalga kılavuzlarının yükseklikleri h_D ve kalınlıkları t_D olup, yüzeylerine a periyot arası ile r yarıçaplı ve merkezden itibaren katı içerisine d_K kadar kaydırılmış silindirik kaviteler açılmış ve 1B fononik kristaller oluşturulmuştur. Dalga kılavuzlarının toplam uzunlukları $l=N.a$ 'dır. Şekil 1(a)'da alttaki dalga kılavuzunun bir tarafına w_S genişlikli bir yarık açılmıştır. Giriş (G) portunda bu dalga kılavuzuna gönderilen dalgalar yarık içerisinde ilerleyerek kavitelerin bulunduğu

yüzeye çizgisel kaynaktan çıkan dalgalar gibi ulaşmakta ve momentum eşlenimi sayesinde dalga kılavuzunun YAD kiplerini uyararak yüzeyde ilerleyen dalgalar oluşturmaktadır (Cicek vd., 2019). 1B fononik kristalde periyodik kavite tasarımına, d_H ve R_H değerlerine bağlı olarak, alttaki dalga kılavuzunda ilerleyen dalgalar belirli frekanslarda halka ınlaa eşleşerek çınlaç yüzeyinde ilerleyen dalgalar oluşturmaktadır. Bu dalgalar, frekansa bağlı olarak alttaki dalga kılavuzunun Direkt (D) olarak adlandırılan portundan ve/veya üstteki dalga kılavuzunun Ekle (E) ve Bırak (B) portlarından değişen oranlarda çıkış yapmaktadır. Akustik enerjinin çıkış portları arasındaki dağılımı ekle-bırak filtresinin geometrik tasarımına bağlı olarak kılavuz-çınlaç eşlenim ve/veya halka çınlaç rezonanslarının uyarılmaları neticesinde değişmektedir.



Şekil 1: (a) Tasarlanan YAD ekle-bırak filtresinin şematik gösterimi, (b) 1B fononik kristalin band yapısını ve (c) eşlenimli yüzey kiplerini belirlemede kullanılan 2B hesaplama modeli.

Ekle-bırak filtresinde akustik enerjinin çıkış portları arasındaki dağılımı dalga kılavuzları ile halka çınlaç arasında eşlenim oluşup oluşmamasına ve halka ınlata uygun frekanslarda rezonans koşulunun sağlanmasına bağlı olarak değişmektedir. Dalga kılavuzundan halka ınlaa eşlenimin

sağlanmadığı frekanslarda alttaki kılavuzdan çıkan dalga bu kılavuz yüzeyinde ilerleyerek tamamen Direkt (D) portundan çıkmaktadır. Buna karşın, kılavuz-çınlaç eşlenimin sağlandığı ancak halka ınlala rezonans koşulunu sağlamadığı frekanslarda ilerleyen dalgalar

ınla yüzeyinde yarım tur ilerleyerek kısmen Ekle (E) kısmen de Bırak (B) portundan sistemi terk etmektedir. Son olarak, hem elenim hem de çınlaç rezonans koşullarının sağlandığı frekanslarda dalgalar ınlata bir tam tur ilerleyerek sistemi yine ağırlıklı olarak D portundan terk etmektedir. Böylelikle alışma frekansı değiştirilerek ekle-bırak filtresinde portlardan çıkış oranları ayarlanabilmektedir. Sistemde iki farklı rezonans koşulu bulunduğundan bireysel port ıkışları frekansa bağlı olarak keskin pikler şeklinde gözlenmektedir.

Ekle-bırak filtresi tasarımında 1B fononik kristal YAD kiplerinin belirlenmesi için Sonlu Elemanlar Yöntemine (Finite-Element-Method, FEM) dayalı band yapısı (dalga vektörü-frekans öz değerleri) simülasyonları yapılmıştır. Bunun için, COMSOL Multiphysics yazılımının akustik modülü kullanılmıştır. Hesaplamalarda iki boyutlu (2B) hesaplama modelleri kullanılmıştır. Örneğin, elenimli yüzeylerin band yapısı hesaplarında şekil 1(b)'deki hesaplama modeli kullanılmıştır. Burada, hava ile katı arasında akustik empedans farkı çok büyük olduğundan, hava-katı ara kesitleri sonsuz rijit (sound hard) sınır koşulu ile tanımlanmıştır. Bunun için, COMSOL Multiphysics akustik modülü ile hesaplamalarda yalnızca şekil 1(b) ve (c)'deki hava içeren bölgeler dikkate alınmıştır. Periyodik birim hücrenin düşey sınırları birbirlerine Bloch-Floquet periyodik sınır koşulları ile ilişkilendirilmiştir. Bütün hesaplamalarda hava yoğunluğu $r=1.21 \text{ kg/m}^3$ ve havada ses hızı $c_a=343 \text{ m/s}$ alınmıştır. Tek bir fononik kristalin band yapısı hesaplarında kavite üzerinde $10a$ kalınlığında hava katmanı dikkate alınmıştır. Tasarlanan ekle-bırak

filtrelerinin performansları frekansa bağlı FEM simülasyonları ile incelenmiştir.

şekil 1 (b)'de 1B fononik kristal band yapısı hesaplamada kullanılan birim hücre grlmektedir. Burada katı ve hava katman kalınlıkları sırasıyla $5a$ ve $10a$ alınmıştır. x eksenine dik kenarlar periyodik sınır koşulu ile ilişkilendirilmiştir. şekil 1 (c)'de ise elenimli iki fononik kristalin band yapısı hesabında kullanılan hesaplama modeli grlmektedir. Birim hücre genişliği yine a iken, kavite yüzeyleri arasındaki mesafe de d_H olarak seçilmiştir. Etkileşimli YAD bandlarının dispersiyon eğrilerinin d_H 'a bağlı değişimi incelenmiştir.

3. Bulgular

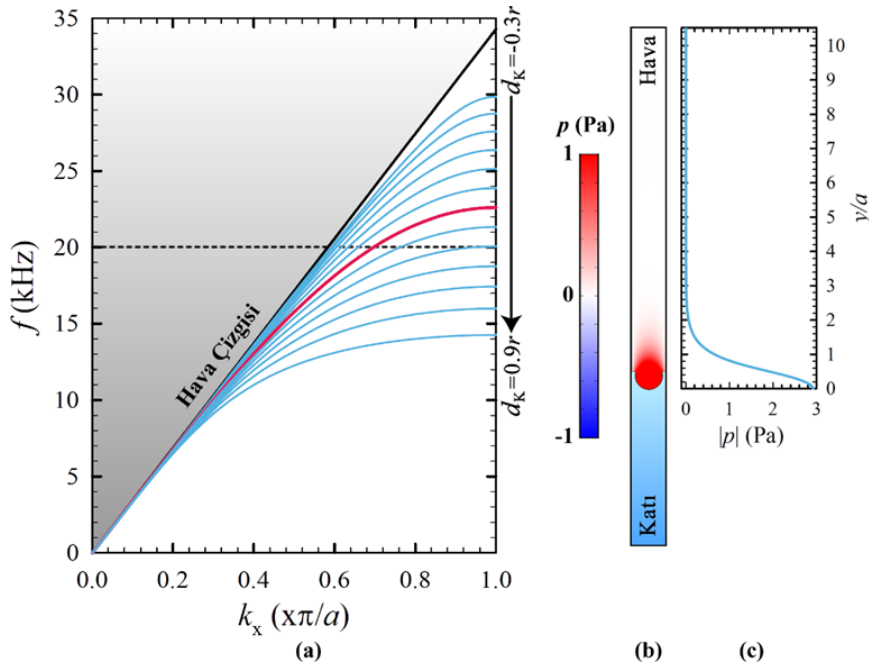
Çalışmada 20 kHz civarındaki frekanslarda çalışan ekle-bırak filtreleri elde etmek için $a=5.0 \text{ mm}$ alınmıştır. Ayrıca, r/a oranının 0.5'e yaklaştığı kavite yarıçapları (r) için birbirleri ile etkileşen ilerleyen Bloch kipleri elde edilirken, kk yarıçaplarda birbirlerinden görece yalıtılmış durağan kipler elde edilmektedir (Korozlu vd., 2019). Bu nedenle, hesaplamalarda $r=0.4a$ olarak sabitlenmiştir. Çalışmada hem kavite içerisine yeterince lokalize olan hem de güçlü etkileşip geniş dispersiyona sahip YAD kip bandlarının elde edilmesini sağlayan $d_K=0.3r$ değeri seçilmiştir.

$a=5.0 \text{ mm}$ ve $r=0.4a=2.0 \text{ mm}$ olacak biçimde periyodik silindirik kavite içeren 1B fononik kristal band yapısının d_K ile değişimi şekil 2(a)'da verilmiştir. Band hesabında yüzeye paralel dalga vektörü büyüklüğü (k_x) $[0, \pi/a]$ arağında 50 adımda taranarak her bir k_x değeri için frekans öz değerleri belirlenmiş ve k_x 'e bağlı olarak değişimleri çizilmiştir, şekil 2(a). Burada, apraz katı siyah çizgi hava ortamında akustik dalgaların $\omega=c_a k_x$ biçiminde

tanımlanan dispersiyon eğrisidir ve Hava izgisi olarak adlandırılmıştır. Bu çizginin önemi kavitelere lokalize olan Bloch kipleri ile hava ortamında yığın (Bulk) dalga olarak ilerleyen kipleri birbirinden ayırmasıdır (Khelif vd., 2006; Korozlu vd., 2019). Bu çizginin üzerindeki kipler dikkate alınmamış olup, bu bölge gri renkli taranmıştır.

Şekil 2(a)'da $-0.3r \leq d_K \leq 0.9r$ aralığında $0.1r$ adımlarla artırılan tüm d_K değerlerinde hava çizgisinin altında yalnızca bir YAD bandı gözlenmektedir. Bundan sonra yüzey bandı olarak bahsedilecek olan bu bandın dispersiyon eğrisi, hava çizgisine çok yakın seyretmekte, hava çizgisinden ancak $k_x \sim \pi/a$ değerlerinde ayrılmaktadır. Bir başka deyişle, kaviteyin yüzeye merkezlerine kadar gömülmediği $d_K < 0$ olan durumlarda yüzeye zayıf bağı Bloch YAD kipleri elde

edilmektedir (Korozlu vd., 2019). Bu kiplerde akustik alan hava bölgesine doğru birkaç örgü sabiti boyunca genişleyebilmektedir. Öte yandan, yüzey bandı d_K büyüdükçe daha geniş bir k_x aralığında hava çizgisinden ayrılmakta ve maksimum frekans değeri aşağıya kaymaktadır. Şekil 2(a)'da $d_K=0.9r$ için yüzey bandının $k_x > 0.6\pi/a$ aralığında düzleştiği ve dispersiyonunun azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni, $d_K \sim r$ olan durumlarda kaviteyin hemen hemen tamamı yüzeye gömüldüğünden zayıf etkileşimli lokalize Helmholtz rezonatör durumları elde edilmesidir (Korozlu vd., 2019). Ayrıca, $d_K > 0.5r$ için yüzey bandının maksimum frekansı referans frekansı olan 20 kHz'in altında kalmaktadır. Yukarıda anılan nedenlerle Şekil 2(a)'da kalın kırmızı çizgi ile gösterilen $d_K=0.3r$ tercih edilmiştir.



Şekil 2: (a) 1B fononik kristal yüzey için yüzey kip bandının kavite gömülme oranıyla (d_K) değışimi, (b) $d_K=0.3r$ için $k_x=\pi/a$ noktasındaki kip profili ve (c) yüzey kipinde akustik basıncın düşey doğrultuda değışimi.

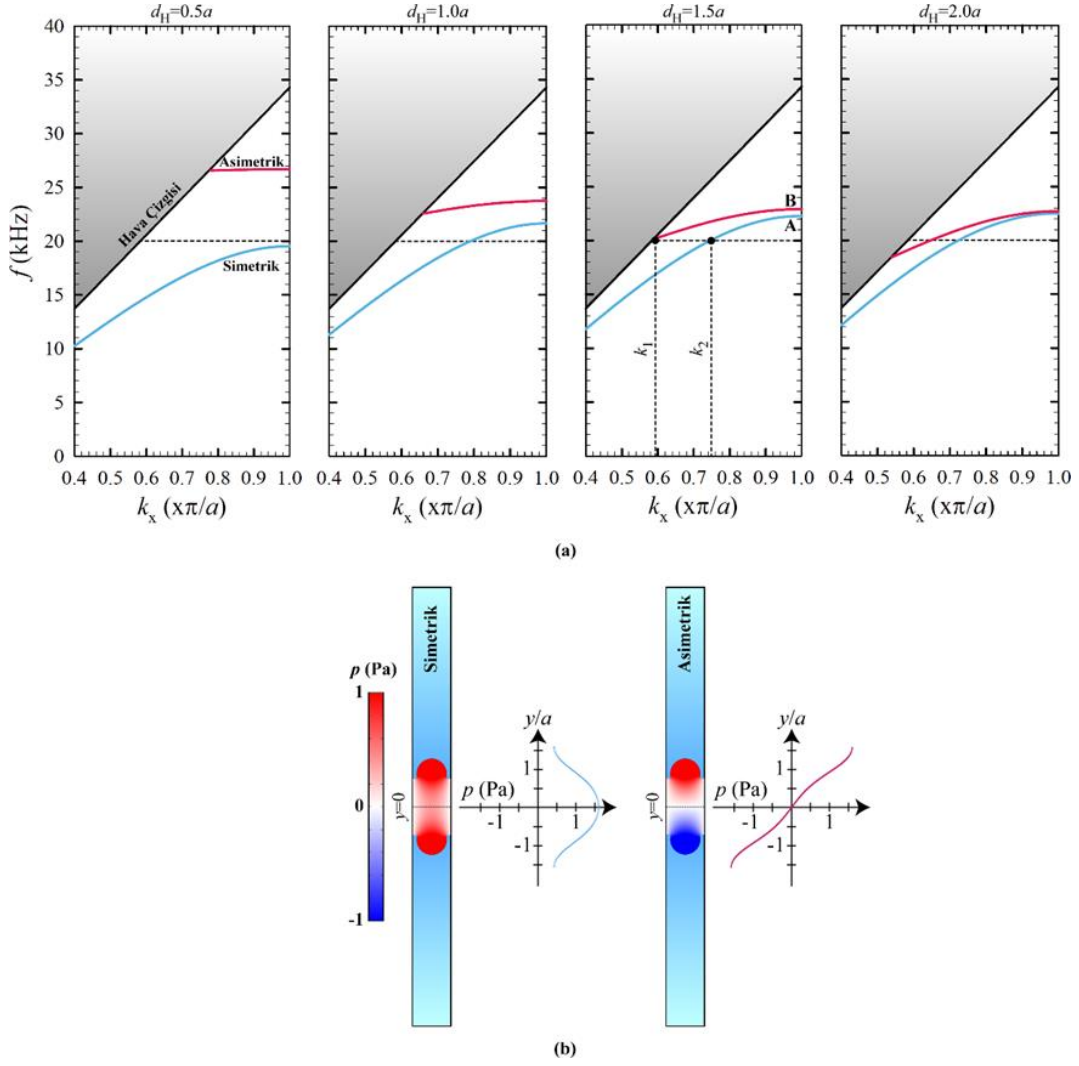
$a=5.0$ mm, $r=0.4a=2.0$ mm ve $d_K=0.3r=0.6$ mm olacak biçimde 1B periyodik kaviteyin

içeren yüzeyde $k_x=\pi/a$ noktasında Bloch YAD kipi şekillenimi Şekil 2(b)'de

verilmiştir. Burada, akustik alanın kavite içerisinde ve etrafında yoğunlaştığı ve akustik basıncın kaviteden uzaklaştıkça hızla azalıp sıfıra düştüğü görülmektedir. Bir başka deyişle, yukarıdaki parametreler için hem kavitelere lokalize olmuş hem de yeterince geniş bir aralıkta dispersiyon sergileyen YAD kipleri elde edilebilmektedir. Şekil 2(c)'de Şekil 2(b)'deki YAD kipinde akustik basıncın mutlak değerinin ($|p|$) düşey doğrultuda değişimi görülmektedir. Burada basınç kavite tabanında ($y=0$) maksimum iken, düşey doğrultuda üstel olarak azalmaktadır. Ayrıca, basıncın kavite tavanından yaklaşık a kadar uzaklıkta yarıya düştüğü görülmektedir, Şekil 2(c).

Yukarıdaki geometrik parametreler kullanılarak Şekil 1(b)'deki birbirinden d_H kadar ayrı etkileşimli yüzeyler için band yapısının d_H ile değişimi Şekil 3(a)'da verilmiştir. $d_H=2.0a$ için (en sağdaki grafik) Şekil 2(a)'dan farklı olarak iki adet yüzey bandı görülmektedir. Bu bandlar, $d_H \gg a$ için birbirine yaklaşılarak pratik olarak etkileşimsiz iki bağımsız yüzeyin Şekil 2(a)'daki gibi yüzey bandına dönüşen iki katlı çakışık tek banda indirgenmektedir. Öte yandan, d_H azaldıkça (Şekil 3(a)'da sola doğru gidildikçe) akışıklık belirgin şekilde ortadan kalkmakta ve iki yüzey bandı birbirinden uzaklaşmaktadır. Örneğin, $d_H=0.5a$ için tamamen 20 kHz'in üzerindeki frekanslarda zayıf dispersiyon sergileyen bir band (kırmızı çizgi) ile 20 kHz'in altındaki frekanslarda daha geniş dispersiyon sergileyen başka bir band (mavi

çizgi) gözlenmektedir, Şekil 3(a). Bu iki band $d_H=1.0a$ için birbirine yaklaşılar da hiçbir k_x değerinde örtüşmemektedir. Buna karşın, bandlar $d_H \geq 1.5a$ değerlerinde 20 kHz'i kapsayacak biçimde birbirleri ile örtüşmektedir. Bandlarda gözlenen bu örtüşme birbirlerine paralel yüzeylerde YAD kiplerinin yüzeyler arasında vuru sergileyecek biçimde transferi için önemlidir (Cicek vd., 2019). Burada vuru kavramı paralel iki adet 1B fononik kristalde akustik enerjinin bir kristalden diğerine ve sonra yine başlangıçtaki kristale aktarılması için gerekli mesafeyi ifade etmektedir. Belirli bir f frekansında vuru periyodu, $L_V=2\pi/\Delta k_x$ olmaktadır (Cicek vd., 2019). Örneğin $f=20$ kHz'te Şekil 3(a)'da üstteki ve alttaki yüzey bandları örtüşürken, $\Delta k=k_2-k_1=0.18\pi/a$ olup, vuru periyodu $L_V=11.1a$ değerini alır ve $d_H=1.5a$ kadar birbirinden uzakta iki yüzey arasında akustik enerji transferinin bir tam çevirimi bu mesafede gerçekleşir. $d_H=1.5a$ için $f=20$ kHz de hesaplanan $L_V=11.1a$ değeri dalga kılavuzları ile halka çınlaç arasındaki minimum mesafe konumuyla değiştiiğinden kılavuz-çınlaç arasında tam eşlenim sağlanması için yeterli bir mesafedir. Şekil 3(a)'da frekans $f > 20$ kHz olacak biçimde arttırıldıkça Δk yaklaşık 21 kHz'e kadar azalmakta, 21 kHz-22.5 kHz aralığında ise artmaktadır ve dolayısıyla bu aralıkta L_V azalmaktadır. Bu nedenle, 21 kHz'ten büyük frekanslarda Şekil 1(a)'daki ekle-birak filtresinde dalga kılavuzları ile halka çınlaç arasındaki etkin enerji transferi daha kısa mesafelerde gerçekleşmektedir.



Şekil 3: (a) Eşlenimli yüzeylerde simetrik ve asimetric yüzey kiplerini içeren bandların yüzeyler arasındaki mesafe (d_H) ile değışimi, (b) $d_H=1.5a$ ve $d_K=0.3r$ için $k_x=\pi/a$ noktasında simetrik (sol) ve asimetric (sağ) yüzey kip şekillenimleri. (b)'de sağdaki grafikler düşey doğrultuda basınç değışimini göstermektedir.

Şekil 3(a)'da mavi ve kırmızı renkli yüzey bandları sırasıyla simetrik ve asimetric bandlar olarak isimlendirilmiştir. Bunun nedeni, Şekil 3(b)'de $d_H=1.5a$ için Şekil 3(a)'daki band yapısında A ve B noktalarında kip şekillenimleri incelendiğinde anlaşılmaktadır. Sol tarafta A noktasında simetrik banddaki etkileşimli yüzey kipinin $y=0$ doğrusuna göre simetrik olduğu ancak, B noktasındaki kipin bu doğruya göre asimetric olduğu görülmektedir, Şekil 3(b). Bu durum, Şekil 3(b)'de 2B basınç dağılım grafiklerinin yanında verilen y eksenı boyunca akustik basınç değışim grafiklerinde de açıkça

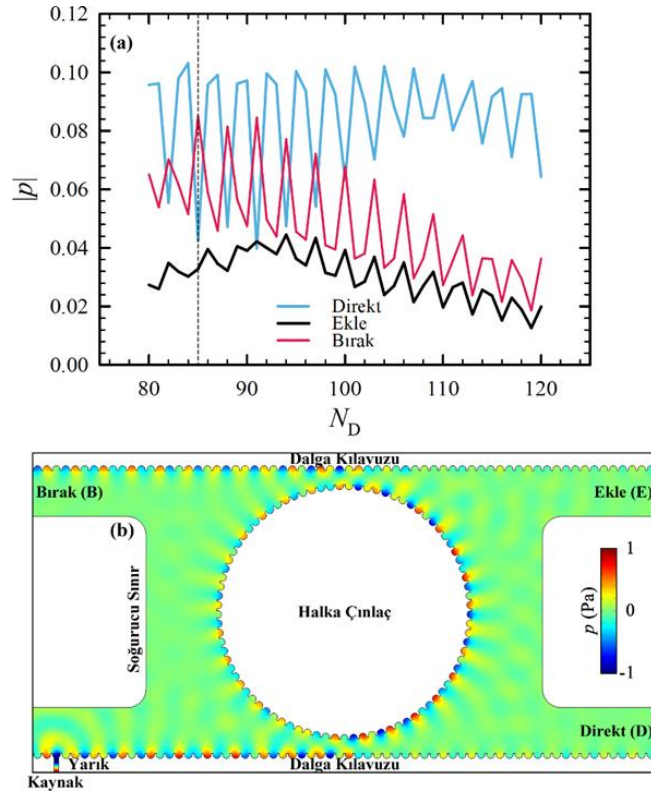
görülmektedir. Etkileşimli yüzeylerde birbirlerinden Δk kadar ayrı bu kipler arasında enerji transferi gerçekleşmektedir.

Ekle-bırak filtresi tasarımında birbirinden izole etkileşimli yüzeylerin tasarımından sonra, iki dalga kılavuzu ve halka çınlaçtan oluşan filtre tasarımına geçilmiştir. Burada, kılavuz ve çınlaç yükseklikleri ve genişlikleri $h_D=t_D=2a=10.0$ mm alınmıştır. Giriş dalgasının ilerlediği yarık genişliği ise $w_S=0.5a=2.5$ mm alınmıştır. Ayrıca, kılavuzların uzunlukları $l=66a=33$ cm olarak belirlenmiştir. Kılavuzlar ile halka çınlaç arasında $d_H=1.5a=7.5$ mm mesafe

bulunmaktadır. Şekil 4(a)'da $f=20$ kHz frekansında D, E, B portlarında akustik basıncın mutlak değerinin ortalaması alınarak elde edilen $|p|$ değerlerinin halka ınlataki kavite sayısı (N_D) ile deęiŐimini grlmektedir. Her üç portta N_D ile dalgalı deęiŐen çıkış gözlenmektedir. Genel olarak, D portunda çıkış minimum iken B portunda maksimumdur, Şekil 4(a). E portu çıkıŐındaki dalgalanmalar ise B portu çıkıŐına benzer seyir izlemektedir. B portundan çıkış düzeyi baz alındığında, $N_D=85$ için $f=20$ kHz frekansında maksimum çıkış elde edilmektedir. Ayrıca, D portundan çıkıŐta minimum olmaktadır.

Şekil 4(a)'da düşey kesikli çizgiyle gösterilen $N_D=85$ ve yarıçapı $R_H=N_D a/2\pi=67.6$ mm olan halka çınlaç içeren ekle-bırak filtresinin $f=20$ kHz frekansında FEM simülasyon sonucu Şekil

4(b)'de grlmektedir. Burada, yarıktan çıkan dalga alttaki dalga kılavuzunun YAD kipi ile eşleşerek yüzeyde ilerleyip, kılavuzun ınlaca en yakın olduğu bölgede ınlaca aktarılıp, son olarak da ınlata yarı tur döndükten sonra üstteki dalga kılavuzuna eŐleŐip B portundan sistemi terk etmektedir. ınlacın dairesel yapısından dolayı, kılavuz-çınlaç mesafesi deęiŐtięinden, akustik enerji aktarımı kısmen gerçekleŐmekte ve D ile E portlarından az da olsa çıkış gözlenmektedir. Şekil 4(b)'de hesaplama alanının sağ ve sol kenarlarında sınırları düzlem dalgalar için soğurucu sınır koŐulu (COMSOL, 2019) ile tanımlanan dikdörtgensel girintiler yarıktan çıkan ve halka ınlatan saçılan dalgaların doğrudan portlara ulaŐmasını engelleyip; portlara yalnızca kılavuzlar üzerinde ilerleyen dalgaların eriŐmesini sağlamaktadır.

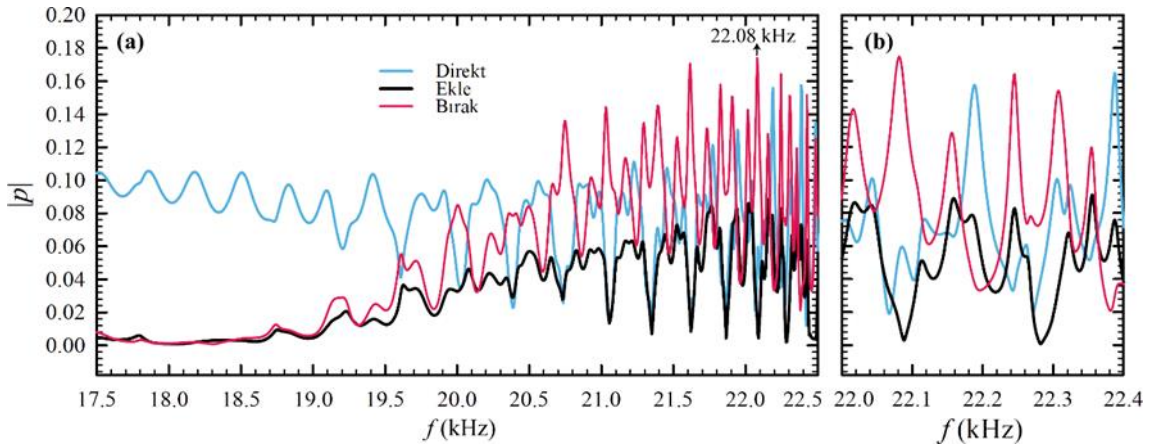


Şekil 4: (a) YAD ekle bırak filtresinde $f=20.00$ kHz frekansında Direkt (D), Ekle (E) ve Bırak (B) portlarında akustik basıncın mutlak değerinin halka çınlaç yüzeyindeki kovuk sayısıyla (N_D) deęiŐimini ve (b) $d_H=1.5a$ ve $d_K=0.3r$ için f frekansında FEM simülasyon sonucu.

Şekil 4(b)'deki simülasyon sonucunda kılavuz-çınlaç arasındaki vuru mesafesinin (L_v) yanı sıra, ınlacın rezonans frekansları da etkilidir. Burada, $R_{Hk_x}=m=tam$ sayı koşulunu sağlayan frekanslarda çınlaç rezonansı görölmektedir. Bu ifade frekansa bağlı olarak, $N_D.a.f/c_a=m=tam$ sayı halini alır. Şekil 4(b)'deki halka çınlaç için bu $m \in [25, 30]$ aralığında 20.18 kHz, 20.89 kHz, 21.79 kHz, 22.60 kHz, 23.41 kHz ve 24.22 kHz frekanslarında rezonans gözlenmesi anlamına gelmektedir.

$N_D=85$ olan ekle-bırak filtresinde çıkış portlarında akustik basıncın mutlak değerinin frekansla değişimi Şekil 5(a)'da verilmiştir. 20 kHz'in altındaki frekanslarda

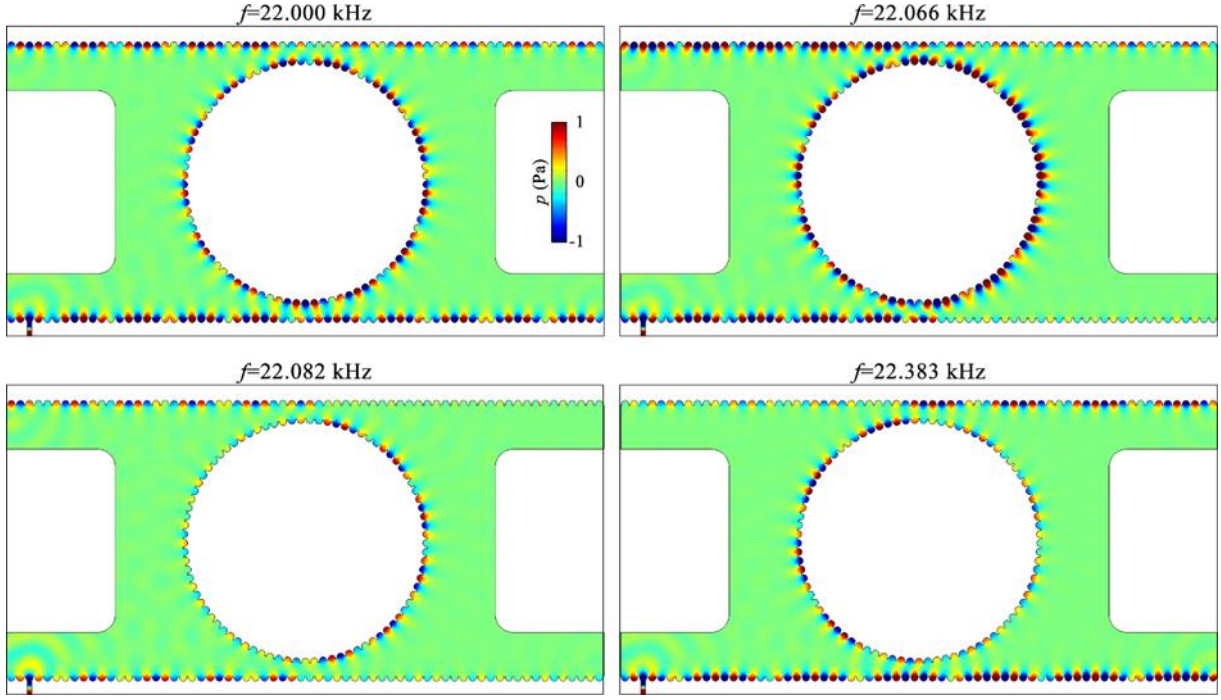
asimetrik bandın kipi bulunmadığından YAD yalnızca alttaki dalga kılavuzunda ilerlemekte ve filtreyi doğrudan D portundan terk etmektedir. Ancak, simetrik ve asimetrik bandların örtüştüğü 20 kHz'in üzerindeki frekanslarda her üç port çıkışında artan frekansla sıklaşacak biçimde dalgalanmalar görölmektedir. Şekil 5(b)'de 22.0-22.4 kHz aralığında 1 Hz adımlarla hesaplanan port ıkışları görölmektedir. Burada, B port çıkışı maksimumken D port çıkışı minimumdur. Şekil 5(a)'da B port çıkışının maksimum olduğu 22.08 kHz değeri işaretlenmiştir. Burada, B ıkış pikinin yarı yükseklikte tam genişliği (FWHM) 57 Hz olup, pik değerinin kalite faktörü $Q=387$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 5: (a) $N_D=85$ olan YAD ekle-bırak filtresinde D, E ve B portlarında akustik basıncın mutlak değerinin frekansla değişimi, (b) 22.0-22.4 kHz aralığında yakından görünum.

Tasarlanan ekle-bırak filtresinin farklı frekanslardaki FEM simülasyon sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Çalışmada, B ile D portları arasındaki kontrastın maksimum olduğu Şekil 5(a)'da ok ile gösterilen 22.08 kHz etrafındaki davranış dikkate alınmıştır. 20 kHz'te bu portlardan çıkış kontrastı düşük ve rezonans pikleri geniş olduğundan ekle-bırak filtresi performansı incelenirken bu frekans aralığı dikkate alınmamıştır. Şekil 6'da $f=22.000$ kHz frekansında her üç porttan birbirine yakın çıkış

gözlenmektedir. Buna karşın, $f=22.066$ kHz frekansında D portundan çıkış minimum düzeyde iken B portundan çıkış baskın olarak gözlenmektedir. Şekil 6'daki B portu için pik frekansı olan $f=22.082$ kHz frekansında B portundan çıkış maksimumken diğer portlarda minimum düzeydedir. Son olarak 22.383 kHz frekansında Şekil 6'da da görüldüğü gibi D portundan çıkış maksimumken B portundan çıkış minimumdur.



Şekil 6: $N_D=85$ olan YAD ekle-bırak filtresinde farklı frekanslarda FEM simülasyonu sonuçları.

4. Sonuç ve Tartışma

Sonuç olarak, katı yüzeylerde periyodik silindirik kavite İçeren 1 boyutlu fononik kristaller kullanılarak periyot, kavite yarıçapı ve kavitenin katı İçerisine gömölme oranına bağlı olarak dispersiyon davranışları değişen yüzey akustik dalgası kiplerinin İki dalga kılavuzu ve bir dairesel halka çınlaç İçeren ekle-bırak filtresi tasarımında kullanılabileceği sayısal hesaplamalarla gösterilmiştir. Kılavuz yüzeylerinde ilerleyen ve geniş dispersiyon sergileyen yüzey kiplerinin eldesi İçin yarıçap/periyot oranının $\frac{1}{2}$ değerine yakın olması ve silindirik kavite İçerinin merkezlerinden itibaren yüzeye gömölme oranlarının 0 ile yarıçapın yarısı arasında değişmesi gerekmektedir. Örneğin bu değer $0.3x$ yarıçap olduğunda, yüzeye periyoda yakın bir uzanımda lokalize olmuş ilerleyen Bloch YAD kipleri elde edilebilmektedir.

Kavite İçeren ve birbirine bakan İki özdeş yüzey birbirlerinden sonsuz uzaklıkta İken,

tamamen örtüşen İki katlı çakışık yüzey bandları gözlenmektedir. Buna karşın, yüzeyler birbirlerine bir periyot ya da daha yakın olacak biçimde yaklaştırıldığında çakışıklık ortadan kalkarak bandlar birbirlerinden ayrılmakta ve hiçbir frekans aralığında örtüşmeyen dispersiyon sergilemektedir. Ancak, yüzeyler arasındaki mesafe periyodun bir buçuk katı olduğunda hem yüzey bandları yeterince birbirinden ayrılabilen hem de referans seçilen bir frekans civarında örtüşmektedir. Bu İki yüzey kipleri yüzeyleri ortadan ayıran doğruya göre simetrik veya asimetrik akustik basınç dağılımı sergilemektedir. Yüzeyler arasında akustik dalgalar bu kiplerin dalga vektörlerinin büyüklüklerinin farkı ile ters orantılı olarak değişen bir mesafede yüzeylerin ilerleme doğrultusundaki uzunluklarına bağlı olarak değişen sayılarda vuru gözlenecek biçimde bir yüzeyden diğerine transfer edilerek ilerlemektedir. Dalga vektörü büyüklükleri

arasındaki fark arttığında vuru mesafesi periyotla karşılaştırılabilecek büyüklüklerde olacak biçimde ayarlanabildiğinden, uygun frekanslarda dalga kılavuzları ile dairesel halka çınlaç arasında YAD enerjisinin tamamen transferi sağlanabilmektedir.

Yüzeyinde silindirik kavite İeren dairesel halka çınlaç ile bu ınlatan 1.5x periyot kadar uzakta 2 dalga kılavuzu İeren ekle-bırak filtresinde direkt ve bırak portlarından çıkış oraları çınlaç yüzeyindeki kavite sayısına, dolayısıyla çınlaç yarıçapına, bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, 20 kHz frekansında bırak portundan maksimum ve direkt ile ekle portlarından minimum çıkış isteniyorsa, çınlaç yüzeyinde toplam 85 kavite bulunması gerekmektedir. Portlar arasında çıkış oranlarının dağlımları vuru mesafesinin yanı sıra, halka çınlaç rezonans frekansına da bağlıdır. Rezonans koşulu sağlandığında, yüzey akustik dalgaları ınlata tam tur dolanırken direkt portunda çıkış maksimum, bırak portunda ise minimum olmaktadır. Örneğin, Şekil (6)'da halka çınlaç rezonans frekanslarından biri olan 21.79 kHz'e yakın 22.000 kHz ve 22.066 kHz frekanslarında YAD halka ınlacı tam turlarken, bırak portunda pik gözlenen 22.082 kHz frekansında yarım tur dönerek ağırlıklı olarak filtreyi bu çıkıştan terk etmektedir.

Bu çalışmada tasarlan akustik ekle-bırak filtresi 20 kHz civarındaki frekanslar İin optimize edilmiş olup, yaklaşık 330 mm x 150 mm boyutlara sahiptir. Filtre boyutları tasarım frekansı arttırılarak düşürülebilir ve pratik uygulamalar İin kompakt cihazlar elde edilebilir. Bu çalışmada yalnızca giriş portundan akustik dalga uygulanmıştır. Ancak, ekle portundan farklı frekansta

dalga girişi ile çift yönlü çalışan filtre elde edilebilir. Filtre doğrusal çalıştığından, farklı frekanslardaki dalgalar birbirleri ile etkileşmeden işlenebilir. Ekle-bırak filtresi akustik sinyal işleme, akustik mantık ve ultrasonik gaz sensörleri gibi uygulamalarda kullanılabilir.

5. Teşekkür

Çalışmada hesaplama kaynaklarını kullanma imkanı veren Prof. Dr. Ahmet ÇİÇEK ve Doç. Dr. Nurettin KRZL'ye teşekkür ederim.

6. Kaynaklar

Christensen, J., Fernandez-Dominguez, A. I., de Leon-Perez, F., Martin-Moreno, L., ve Garcia-Vidal, F. J. 2007. "Collimation of sound assisted by acoustic surface waves", *Nature Physics* 3(12), 851.

Christensen, J., Martın-Moreno, L., ve Garcia-Vidal, F. J. 2010. "Enhanced acoustical transmission and beaming effect through a single aperture", *Physical Review B*, 81(17), 174104.

Cicek, A., Arslan, Y., Trak, D., Okay, F. C., Kaya, O. A., Korozlu, N., ve Ulug, B. 2019. "Gas sensing through evanescent coupling of spoof surface acoustic waves", *Sensors and Actuators B: Chemical*, 288, 259-265.

COMSOL, Inc. 2019. COMSOL Multiphysics Modeling Software, URL: <https://comsol.com> , Son erişim tarihi: 21/11/2019.

Cui, J., Liu, J., Mao, Y., Li, Y., ve Liu, X. 2017. "Realization of manipulating acoustic surface waves radiation direction with rectangular-groove structure", *AIP Advances*, 7(11), 115301.

He, Z., Jia, H., Qiu, C., Ye, Y., Hao, R., Ke, M., ve Liu, Z. 2011. "Nonleaky surface acoustic waves on a textured rigid surface", *Physical Review B*, 83(13), 132101.

Jia, H., Lu, M., Ni, X., Bao, M., ve Li, X. 2014. "Spatial separation of spoof surface

- acoustic waves on the graded groove grating”, *Journal of Applied Physics*, 116(12), 124504.
- Jia, H., Lu, M., Wang, Q., Bao, M., ve Li, X. 2013. “Subwavelength imaging through spoof surface acoustic waves on a two-dimensional structured rigid surface”, *Applied Physics Letters*, 103(10), 103505.
- Kelders, L., Allard, J. F., ve Lauriks, W. 1998. “Ultrasonic surface waves above rectangular-groove gratings”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 103(5), 2730-2733.
- Khelif, A., Aoubiza, B., Mohammadi, S., Adibi, A., ve Laude, V. 2006. “Complete band gaps in two-dimensional phononic crystal slabs”, *Physical Review E*, 74(4), 046610.
- Korozlu, N., Kaya, O. A., Cicek, A., ve Ulug, B. 2019. “Self-collimation and slow-sound effect of spoof surface acoustic waves”, *Journal of Applied Physics*, 125(7), 074901.
- Lu, J., Qiu, C., Ke, M., ve Liu, Z. 2015. “Directional excitation of the designer surface acoustic waves”, *Applied Physics Letters*, 106(20), 201901.
- Mai, T. T., Hsiao, F. L., Lee, C., Xiang, W., Chen, C. C., ve Choi, W. K. 2011. “Optimization and comparison of photonic crystal resonators for silicon microcantilever sensors”, *Sensors and Actuators A: Physical*, 165(1), 16-25.
- Qiang, Z., Zhou, W., ve Soref, R. A. 2007. “Optical add-drop filters based on photonic crystal ring resonators”, *Optics Express*, 15(4), 1823-1831.
- Rostami-Dogolsara, B., Moravvej-Farshi, M. K., ve Nazari, F. 2016. “Acoustic add-drop filters based on phononic crystal ring resonators”, *Physical Review B*, 93(1), 014304.
- Sarkaleh, A. K., Lahijani, B. V., Saberhari, H., ve Esmaeeli, A. 2017. “Optical ring resonators: a platform for biological sensing applications”, *Journal of Medical Signals and Sensors*, 7(3), 185.
- Schwan, L., Geslain, A., Romero-García, V., ve Groby, J. P. 2017. “Complex dispersion relation of surface acoustic waves at a lossy metasurface”, *Applied Physics Letters*, 110(5), 051902.
- Torrent, D., ve Sánchez-Dehesa, J. 2012. “Acoustic analogue of graphene: observation of Dirac cones in acoustic surface waves”, *Physical Review Letters*, 108(17), 174301.
- Xie, S., Ouyang, S., He, Z., Wang, X., Deng, K., ve Zhao, H. 2018. “Bending and splitting of spoof surface acoustic waves through structured rigid surface”, *Results in Physics*, 8, 52-56.
- Yaffe, H. H., Henry, C. H., Serbin, M. R., ve Cohen, L. G. 1994. “Resonant couplers acting as add-drop filters made with silicon-silicon waveguide technology”, *Journal of Lightwave Technology*, 12(6), 1010-1014.
- Ye, Y., Ke, M., Li, Y., Wang, T., ve Liu, Z. 2011. “Focusing of spoof surface-acoustic-waves by a gradient-index structure”, *Journal of Applied Physics*, 114(15), 154504.
- Zhou, Y., Lu, M. H., Feng, L., Ni, X., Chen, Y. F., Zhu, Y. Y., Zhu, S. N., ve Ming, N. B. 2010. “Acoustic surface evanescent wave and its dominant contribution to extraordinary acoustic transmission and collimation of sound”, *Physical Review Letters*, 104(16), 164301.
- Zhu, J., Chen, Y., Zhu, X., Garcia-Vidal, F. J., Yin, X., Zhang, W., ve Zhang, X. 2013. “Acoustic rainbow trapping”, *Scientific Reports*, 3, 1728.