



**T.C.
BURDUR MEHMET AKİF ERSOY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
NANOBİLİM VE NANOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**FONONİK KRİSTALLERİN YÜZEY AKUSTİK
DALGALARI İLE NANOPARÇACIK
AYRIŞTIRMADA KULLANIMI**

ALİ ERTUĞRUL

BURDUR, 2020

T.C.
BURDUR MEHMET AKİF ERSOY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
NANOBİLİM VE NANOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

FONONİK KRİSTALLERİN YÜZEY AKUSTİK
DALGALARI İLE NANOPARÇACIK
AYRIŞTIRMADA KULLANIMI

ALİ ERTUĞRUL

Danışman: PROF. DR. AHMET ÇİÇEK

BURDUR, 2020

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

ALİ ERTUĞRUL tarafından Prof. Dr. AHMET ÇİÇEK yönetiminde hazırlanan “Fononik Kristallerin Yüzey Akustik Dalgaları ile Nanoparçacık Ayrıştırma Kullanımı” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 23/09/2020

Prof. Dr. Olgun Adem KAYA

(Başkan)

İnönü Üniversitesi

(İmza)

Prof. Dr. Ahmet ÇİÇEK

(Jüri Üyesi)

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi

(İmza)

Doç. Dr. Nurettin KÖRÖZLÜ

(Jüri Üyesi)

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi

(İmza)

ONAY

Bu Tez, Enstitü Yönetim Kurulu’nun _____ Tarih ve _____ Sayılı Kararı ile Kabul Edilmiştir.

(İmza)

Prof. Dr. Ayşe Gül MUTLU GÜLMEMİŞ

Müdür
Fen Bilimleri Enstitüsü

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum **“Fononik Kristallerin Yüzey Akustik Dalgaları ile Nanoparçacık Ayrıştırma Kullanımı”** başlıklı bu tezin;

- Kendi çalışmam olduğunu,
- Sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi,
- Bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi,
- Kullandığım verilerde değişiklik yapmadığımı,
- Tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını,
- Bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı,
- Bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı,

bildirir, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

23/09/2020

(İmza)

ALİ ERTUĞRUL

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Prof. Dr. Ahmet ÇİÇEK'e, çalışmamı yapabilmem için bilgisayar ve gerekli materyaller konusunda yardımcı olan Doç. Dr. Nurettin KÖRÖZLÜ ve Ahmet BİÇER'e çalışma sürecinde bana her türlü desteği olan aileme ve sevgili eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 116F085 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

Eylül, 2020

Ali ERTUĞRUL

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL DİZİNİ.....	iii
ÇİZELGE DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. Mikro akışkan Sistemler	3
2.1.1. Doğada Mikro akışkanlık	4
2.2. Yonga Üstü Laboratuvar Sistemler.....	5
2.2.1. Akış Sistometrisinin Tanımı, Çalışma Prensibi ve Uygulama Alanları.....	6
2.2.2. Yonga Üstü Organ (Organ-on-a-Chip) Sistemler	7
2.2.3. LoC ile dolaşımdaki kandan erken tanı uygulamaları	8
2.3. Yüzey Akustik Dalgası (YAD) Mikro akışkan Sistemler	9
2.3.1. Dalga hareketi	9
2.3.2. Elastik dalga denklemi	10
2.3.3. Katılarda yüzey dalgaları	10
2.3.4. Piezoelektrik malzemeler	12
2.3.5. YAD Mikro akışkan sistemlerin çalışma prensibi	15
2.4. Fononik Kristaller	19
2.4.1. Piezoelektrik Fononik Kristaller	21
2.4.2. Fononik Kristallerin Mikro akışkan Uygulamaları	22
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	24
3.1. Piezoelektrik Fononik Kristal Tasarımı	24
3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM).....	27
3.3. YAD Mikro Akışkan Sistemde COMSOL Multiphysics ile FEM uygulamaları.....	31
3.4. Mikro akışkan Aygıt Simülasyonları	31
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	33
4.1. Değişken parmak genişlikli ve aralıklı (chirped) IDT optimizasyonu	33
4.2. Kare PFK Band Yapısı	35
4.3. Kare PFK ile Durağan YAD Eldesi	36
4.4. Üçgen PFK Band Yapısı.....	37
4.5. PFK Geçirim Spektrumları	38
4.6. PFK ile Nanoparçacık Ayırıştırma.....	40
5. SONUÇ.....	45
KAYNAKLAR.....	47
ÖZGEÇMİŞ.....	52

ŞEKİL DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Türbülanslı akış ve laminar akış.	4
Şekil 2.2. (a) Memeli vücudunda kılcal damarlar ve (b) ağaç yaprağında kılcal damarlar.	4
Şekil 2.3. (a) Bir LoC mikro akışkan sistem ile bir laboratuvarında yürütülen çeşitli testler yapılabilir (URL-1, 2020), (b) beş farklı işlemi bir arada gerçekleştiren LoC sistem (Primiceri vd., 2013).	5
Şekil 2.4. (a) Bir akış sitometresinin şematik görünümü (IDEX Health & Science, 2020), (b) laboratuvarlarda kullanılan bir akış sitometresi (Biocompare, 2020), (c) bir LoC mikro akışkan akış sitometresi (Choi vd., 2014, Yang vd., 2018).	6
Şekil 2.5. Bir yonga üstü akciğerin yakından görünümü (Wyss Institute, 2018).	8
Şekil 2.6. Dolaşımdaki kandaki bazı mikro organizmalara örnekler: (a) kırmızı ve beyaz kan hücreleri, (b) bakteriler, (c) virüsler, (d) dolaşımdaki tümör hücreleri ve (e) eksozomlar gibi nano/mikrokesecekler.	8
Şekil 2.7. Boyuna ve enine dalgalara örnekler: (a) ses dalgalarının ve (b) elektromanyetik dalgaların yayılımı.	9
Şekil 2.8. Katı ortamda ilerleyen yüzey dalgalarına örnekler: (a) P ve S dalgaları (UPSeis, 2006), (b) Rayleigh dalgası (URL-2, 2020), (c) ince levhada Lamb dalgaları (Torkamani vd., 2014).	11
Şekil 2.9. (a) Piezoelektrik etki, (b) ters piezoelektrik etki.	12
Şekil 2.10. Bazı piezoelektrik malzemeler: (a) kurşun zirkonat titanat (PZT) 5H Seramik, (b) kuvars, (c) lityum niyobat.	13
Şekil 2.11. (a) LiNbO_3 kristal yapısı ve (b) YX-128° kesimli LiNbO_3 yonga plakası.	14
Şekil 2.12. IDT ile YAD üretimi ve geçirim spektrumunun eldesi için elektriksel düzenek.	15
Şekil 2.13. (a) Durağan YAD ile biyo parçacıkların boyutlarına göre ayrıştırılmasında kullanılan düzenek, (b) mikro kanal kesitinin üstten görünümü, (c) zıt yönlerde ilerleyen özdeş YAD'ların mikro kanal içerisine kırılması, (d) boyutsal ayrıştırma mekanizması.	18

Şekil 2.14. (a) 1, (b) 2 ve (c) 3 boyutlu fononik kristallerin şematik gösterimi (Maldovan, 2013).	20
Şekil 2.15. Eusebio Sempere'nin Madrid parkındaki heykeli, kHz frekanslarında ses dalgalarını bloke etmek için 2.9 cm periyotlubir 2B FK'dan oluşmaktadır.....	20
Şekil 2.16. (a) YX-128° LiNbO ₃ piezoelektrik altaş üzerinde Ni çubuklardan (Achaoui vd., 2011), (b) dairesel oyuklardan (Benchabane vd., 2006) ve (c) halkasal oyuklardan (Ash vd., 2017) oluşan 2B FK'ların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.	21
Şekil 2.17. (a) YX-128° LiNbO ₃ piezoelektrik altaş üzerinde Ni çubuklardan (Achaoui vd., 2011) ve (b) halkasal oyuklardan (Ash vd., 2017) oluşan 2B FK band yapıları.....	22
Şekil 2.18. FK içeren YAD mikro akışkan sistemlere örnekler: 2B FK ile (a) damlacık nebulizasyonu (Reboud vd., 2012), (b) damlacık jeti oluşturma (Bourquin vd., 2011).....	22
Şekil 3.1. (a) Kare ve (b) üçgen örgü yapısındaki PFK birim hücreleri ve (c) PFK geometrik parametreleri.....	24
Şekil 3.2. (a) Kare ve (b) üçgen örgü yapısındaki PFK'nın üstten görünümü, (c) ve (d) karşılık gelen birinci Brillouin bölgeleri.	25
Şekil 3.3. Geniş frekans aralığında ilerleyen YAD elde etmek için kullanılan değişken parmak genişlikli IDT tasarımı ve tasarlanan IDT için piezoelektrik altaş geçirim spektrumunu hesaplamada kullanılan sayısal hesaplama modeli.	26
Şekil 3.4. Kare ve üçgen örgü yapısındaki PFK'nın [10] ve [11] doğrultularında geçirim spektrumlarının elde edilmesi için kullanılan 3B hesaplama modellerinin üstten görünüşü.	26
Şekil 3.5. (a) Tez çalışmasında incelenen IDT-PFK çifti ile durağan YAD elde etmeye dayalı mikro akışkan sistemin ve (b) bu sistemde farklı büyüklüklere sahip nanoparçacıkların boyutlarına göre ayrıştırılma mekanizmasının şematik görünümü.....	27
Şekil 3.6. Problem alanının ayrıklaştırılması (Logan, 2007).	28
Şekil 3.7. FEM hesaplamalarında kullanılan (a) doğrusal ve (b) eğrisel 1B elemanlar (Logan, 2007).	29
Şekil 3.8. İki boyutlu elemanlar: (a) üçgen ve (b) dörtgen şekilli eleman (Logan, 2007). .	30
Şekil 3.9. Üç boyutlu elemanlar: (a) dört yüzlü ve (b) düzensiz altı yüzlü eleman (Logan, 2007).	30

Şekil 3.10. Piezoelektrik altaş, IDT çifti, PDMS kalıp ve mikro kanalı bir arada içeren 2B FEM hesaplama modelindeki geometrik parametrelerin tanımları.	32
Şekil 4.1. $w=10\ \mu\text{m}$ ve $\Delta w=0.5\ \mu\text{m}$ olan $N=11$ çift parmak sayılı IDT'ler tek taraflı ve çift taraflı olarak $f=104.5\ \text{MHz}$ frekanslı RF sinyali ile uyarıldığında oluşan (a) ilerleyen ve (b) durağan Rayleigh YAD.	33
Şekil 4.2. (a) $N=11$ çift parmaklı IDT'nin geçirim (S_{21}) spektrumunun parmak genişliği ve aralığı değişim miktarına (Δw) ve (b) toplam piezoelektrik altaş uzunluğuna (l_s) bağlı değişimi.	34
Şekil 4.3. YX-128° LiNbO ₃ üzerinde (a) halkasal oyuklardan (Ash vd., 2017) oluşan 2B PFK band yapısı ve (b) A ve B noktalarındaki mod şekillenimleri.	35
Şekil 4.4. YX-128° LiNbO ₃ üzerinde duvar eğimi (a) $\theta=10.2^\circ$ ve (a) $\theta=0^\circ$ olan halkasal oyuklardan oluşan 2B PFK band yapısı.	36
Şekil 4.5. $a=12.0\ \mu\text{m}$, $r_i=3.1\ \mu\text{m}$, $r_d=5.1\ \mu\text{m}$ ve $h=6.0\ \mu\text{m}$ olan PFK ile durağan YAD eldesinin FEM simülasyon sonucu.	37
Şekil 4.6. YX-128° LiNbO ₃ üzerinde halkasal oyuklardan oluşan üçgen örgü yapısındaki 2B PFK için elde edilen band yapısı.	38
Şekil 4.7. YX-128° LiNbO ₃ üzerinde halkasal oyuklardan oluşan 2B PFK geçirim spektrumları.	39
Şekil 4.8. $a=12.0\ \mu\text{m}$, $r_i=3.1\ \mu\text{m}$, $r_d=5.1\ \mu\text{m}$ ve $h=6.0\ \mu\text{m}$ olan PFK ile durağan YAD eldesinin FEM simülasyon sonucu.	40
Şekil 4.9. f_0 frekansında oluşturulan durağan YAD'ın PDMS içerisindeki $h_{\text{ch}}=25\ \mu\text{m}$ ve $w_{\text{ch}}=35\ \mu\text{m}$ boyutlarında mikro kanalda oluşturduğu akustik basınç alanı.	41
Şekil 4.10. (a) PFK ile nanoparçacık ayrıştırma özelliklerinin incelenmesinde kullanılan 2B hesaplama modeli, (b) mikro kanal kesitinde akım hızı dağılımı ve (c) $p_0=100\ \text{kPa}$ genlik için akustik bölgede akustik basınç alanı dağılımı.	42
Şekil 4.10. Yarıçapı (a) 100 nm, (b) 150 nm, (c) 200 nm ve (d) 250 nm olan nanoparçacıkların 100-500 kPa arasındaki akustik basınç genlikleri için mikro kanaldaki yörüngeleri. Yatay kesikli çizgiler merkez akım bölgesi sınırlarını göstermektedir.	44

ÇİZELGE DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. YAD sistemlerde kullanılan bazı piezoelektrik kristallerin fiziksel özellikleri...	13
Tablo 2.2. Lityum niyobatin bazı fiziksel özellikleri.	14
Tablo 2.3. Farklı kesimlere sahip LiNbO ₃ kristallerinin YAD özellikleri.	15



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a	: Örgü sabiti (m)
β	: Sıkıştırılabilirlik (Pa^{-1})
c	: Ses hızı (m/s)
f	: Frekans (Hz)
$\mathbf{F}_a$	: Akustik ışıma kuvvet vektörü (N)
$\mathbf{F}_d$	: Sürüklenme kuvvet vektörü (N)
Φ	: Karşıtlık faktörü
h	: Yükseklik (m)
k^2	: Piezoelektrik malzemede elektromekanik eşlenim katsayısı
$\mathbf{k}$	: Dalga vektörü (rad/m)
k_x, k_y, k_z	: Dalga vektörü bileşenleri (rad/m)
L	: Karakteristik uzunluk (m)
λ	: Dalga boyu (m)
μ	: Akışkanın dinamik viskozitesi (N.s/m^2)
ν	: Akışkanın kinematik viskozitesi (m^2/s)
p	: Akustik basınç (Pa)
r	: Yarıçap (m)
$\mathbf{r}$	: Konum vektörü (m)
r, φ, z	: Silindirik koordinatlarda konum bileşenleri (m)
ρ	: Yoğunluk (kg/m^3)
t	: Zaman (s)
$\mathbf{u}$	: Katıda yer değiştirme vektörü (m)
U_a	: Akustik radyasyon potansiyeli (J)
$\mathbf{v}$	: Akış Hız vektörü (m/s)
V_p	: Parçacık hacmi (m^3)
ω	: Açısal frekans (rad/s)
x, y, z	: Kartezyen koordinatlarda konum bileşenleri (m)

1B	: Bir boyutlu
2B	: İki boyutlu
3B	: Üç boyutlu
CTC	: Circulating Tumor Cells (Dolaşımdaki Tümör Hücreleri)
FEM	: Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
FK	: Fononik kristal
IDT	: Interdigital transducer (İç içe geçmiş taraklı transdüser)
LiNbO ₃	: Lityum niyobat
LoC	: Lab on chip
MÇ	: Merkez çıkış
MEMS	: Mikroelektromekanik sistem
NP	: Nanoparçacık
PFK	: Piezoelektrik fononik kristal
PDMS	: Polidimetilsiloksan
PML	: Perfectly-Matched Layer (Kusursuz Uyuşan Katman)
PSK	: Periyodik sınır koşulu
PZT	: Kurşun zirkonyum titanyum
Re	: Reynold Sayısı
RF	: Radyo frekanslı sinyal
Si	: Silisyum
YAD	: Yüzey akustik dalgası
YÇ	: Yanal çıkış
YKBA	: Yerelleşmiş kip band aralığı

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Fononik Kristallerin Yüzey Akustik Dalgaları ile Nanoparçacık Ayırıştırma Kullanımı

Ali Ertuğrul

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Nanobilim ve Nanoteknoloji Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Çiçek

Eylül, 2020

Bu tez çalışmasında bir piezoelektrik malzeme yüzeyine kare veya üçgen örgü düzeninde açılan halka şekilli oyuklardan oluşan iki boyutlu piezoelektrik fononik kristaller ile 100 nm mertebesinde boyutlara sahip küresel parçacıkların boyutlarına göre ayırıştırılıp sınıflandırılması sayısal olarak incelenmiştir. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) kullanılarak yapılan hesaplamalar ile 10 μm civarında periyoda sahip fononik kristalin 100 MHz civarında %5 genişliğe sahip band aralığı sergilediği belirlenmiştir. Genişlikleri 5 μm ile 15 μm arasında doğrusal değişen 11 çift parmağa sahip iç içe geçmiş taraklı transdüser (IDT) kullanılarak 100 MHz etrafında yaklaşık 10 MHz band genişliğinde Rayleigh yüzey akustik dalgası (YAD) üretilebileceği FEM simülasyonları ile gösterilmiştir. IDT ile fononik kristal arasında dalga boyunun (yaklaşık 40 μm) tam katı olacak biçimde boşluk bırakılarak yapılan hesaplamalarda IDT-fononik kristal arasında durağan YAD oluşumu ortaya konulmuştur. Piezoelektrik yüzeyine 35 μm genişliğe ve yüksekliğe sahip mikro kanal içeren polidimetilsiloksan (PDMS) kalıp konulduğunda, mikro kanaldaki akışkan içerisinde enine kesitte akustik alan kanal merkezinde maksimum basınç sergilerken, merkez etrafında simetrik düğüm noktaları oluşmaktadır. Mikro kanala gönderilen farklı büyüklüklerde küresel nanoparçacıklara etkiyen akustik ısıma ve sürüklenme kuvvetleri bir arada hesaplanarak parçacıkların yörüngeleri zamana bağlı elde edilmiştir. Kanal uzunluğu boyunca düğüm noktalarına doğru itilen ve merkez bölgede kalan parçacıkların yarıçap dağılımı analiz edilerek mikro akışkan sistemin ayırım gücü ve ayırım için kesme yarıçapı hesaplanmıştır. Tez çalışması sonuçları, eksozomlar gibi hücrelerden salınan nanokeseceklerin ve nanoölçekli diğer biyomateryalin tespit ve analiz edilmesinde kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Mikro akışkanlık, akustik ısıma kuvveti, yüzey akustik dalgası, boyutsal ayırıcılık, piezoelektrik, fononik kristal, band aralığı, Sonlu Elemanlar Yöntemi.

Hazırlanan bu yüksek lisans tez çalışması Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 116F085 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

SUMMARY

M.Sc. Thesis

Utilization of Phononic Crystals in Nanoparticle Sorting via Surface Acoustic Waves

Ali Ertuğrul

**Burdur Mehmet Akif Ersoy University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Nanoscience and Nanotechnology**

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet Çiçek

September, 2020

In this thesis, size-based separation and classification of spherical particles with dimension on the order of 100 nm by means of two-dimensional phononic crystals, which are composed of annular grooves on a piezoelectric substance with square or triangular lattice geometry, are numerically investigated. Through calculations employing the Finite Element Method (FEM), it is determined that the phononic crystal with a period around 10 μm exhibits a band gap with 5% width around 100 MHz. It is also demonstrated through FEM simulations that Rayleigh surface acoustic waves (SAWs) with 10 MHz band width around 100 MHz can be generated via an interdigital transducer (IDT) having 11 finger pairs whose widths linearly vary between 5 μm and 15 μm . As a result of calculations where the IDT-phononic crystal spacing is set to an integer multiple of the wavelength (approximately 40 μm), standing SAW formation in the IDT-phononic crystal gap is exhibited. When a polydimethylsiloxane (PDMS) mold containing a microchannel whose width and height are 35 μm is placed on piezoelectric surface, symmetric nodes are observed around the center, while the acoustic field in the cross-section of the fluid in the microchannel has maximum pressure at the channel center. By simultaneously calculating the acoustic radiation and drag forces acting on spherical nanoparticles with different sizes released to the microchannel, time-dependent trajectories of the particles are obtained. Radius distribution of particles that are pushed towards the nodes along the length of the channel and of the ones remaining in the central region are analyzed, where the separation efficiency of the microfluidic system and the threshold radius for separation are calculated. Thesis results can be used to detect and analyze nanovesicles such as exosomes released from cells, as well as other nanoscale biomaterials.

Keywords: Microfluidics, acoustic radiation force, surface acoustic wave, size-based sorting, piezoelectric, phononic crystal, band gap, Finite Element Method.

This master's thesis was supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK) under the grant number 116F085.

1. GİRİŞ

Mikro akışkan sistemler akışkanlar mekaniği, fizik, yaşam bilimleri ve nanoteknoloji gibi farklı alanları bir araya getiren sistemlerdir. Bir materyalin içerisinde mikro kanallar oluşturarak bu kanallardan belirli hızda biyolojik sıvıların ve hücre, mikroorganizma gibi biyolojik parçacıkların analizine olanak sağlamaktadır. Mikroeletromekanik sistemlerin (MEMS) ve bunların üretimine yönelik yöntemlerin gelişmesiyle (Kim vd., 2008) mikro akışkanlık daha yaygın kullanım alanları bulmaktadır (Gravesen vd., 1993). Mikrolitre ve altı ölçekte damlacık formundaki ve sürekli sıvıların davranışı ile ilgilenen mikro akışkanlık, doğada kılcal damarlar gibi yapılarda kendini göstermektedir (Tabeling, 2005).

Yaygın uygulama alanı bulunan mikro akışkan sistemler ile mikrometre ve nanometre ölçeğinde akışkanlar dinamiği problemleri çözülerek metrenin milyonda/milyarda biri boyutlarında mühendislik yapılabiliyor. Mikro akışkanların en heyecanlandırıcı uygulamalarından biri, çip üzerinde laboratuvar (Lab on a Chip, LoC) teknolojisidir. LoC, laboratuvardaki birçok işlevin birkaç milimetre düzeyinde boyutlu çiplerde gerçekleştirilebilmesini sağlar.

Bu tez çalışmasında, yaygın bir araştırma konusu olan mikro akışkan yüzey akustik dalgası (YAD) nanoparçacık ayrıştırma sistemlerine fononik kristalleri (FK) entegre ederek, bu sistemlerin sonlu elemanlar yöntemi (finite-element method, FEM) simülasyonları aracılığı ile sayısal tasarımı yapılmış ve nanoparçacık ayrıştırma performansları incelenmiştir. Bunun için, bir YAD mikro akışkan sistemi oluşturan piezoelektrik alttaş ve üzerindeki metal elektrotların, alttaşı periyodik halkasal oyuklar şeklinde tanımlanan 2 boyutlu (2B) fononik kristallerin band yapılarının ve geçirim özelliklerinin, mikro kanalı barındıran polidimetilsiloksan (PDMS) kalıbın ve mikro kanal içerisindeki sıvı ile nanoparçacıkların davranışlarının incelenmesi için çoklu fizik simülasyon yaklaşımları ile ilgili araştırmalar yapılmıştır. Tez çalışmasının hedefleri şunlardır;

- i. YX-128° kesimli lityum niyobat (LiNbO_3) piezoelektrik alttaş üzerindeki iç içe geçmiş taraklı transdüserler (inter-digital transducers, IDT) sayısal olarak tasarlanmıştır.

- ii. Kare ve üçgen örgü yapısında 2B FK band yapılarının geometrik parametrelere bağılılığı incelenmiş ve çalışma frekansında en geniş band aralığı sergileyen FK geometrileri belirlenmiştir.
- iii. Daha sonra, optimize edilen FK geçirim spektrumları FEM simülasyonları ile elde edilmiştir.
- iv. YAD mikro akışkan parçacık ayrıştırma sisteminde IDT'lerden biri 2B FK ile değiştirilerek durağan YAD eldesi benzetimsel olarak gösterilmiştir. PDMS kalıbının FEM simülasyonlarında modellenmesi için doğrusal olmayan (hiperelastik) yaklaşımlar araştırılmıştır.
- v. Mikro kanalda oluşan basınç alanının kanalda ilerleyen nanoparçacıkların davranışına etkileri zamana bağlı 3 boyutlu (3B) FEM simülasyonları ile incelenmiştir.
- vi. IDT, 2B FK, PDMS kalıp ve mikro kanal tasarım parametreleri istenilen boyutsal parçacık ayırıcılığını sağlayabilmek için optimize edilip parçacık ayrıştırma FEM simülasyonları ile gösterilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

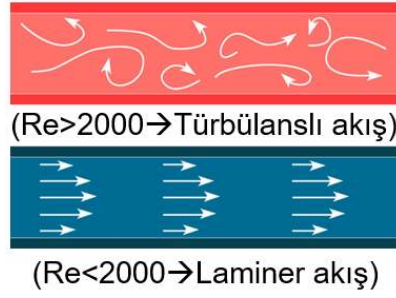
2.1. Mikro akışkan Sistemler

MEMS tekniklerinin gelişmesiyle (Kim vd., 2008) mikro akışkanlık daha yaygın kullanım alanları bulmaya başlamıştır (Gravesen vd., 1993). Mikrolitre ve altı ölçekte damlacık formundaki ve sürekli sıvıların davranışı ile ilgilenen mikro akışkanlık, doğada kılcal damarlar gibi yapılarda kendini göstermektedir. Bir kanalda akan sıvı için, kanal boyutları küçüldükçe viskoz kuvvetlerin eylemsizlik kuvvetlerine oranını ifade eden Reynolds sayısı (Re) artarken, düşük Reynolds sayıları ile laminar, yani sıvı kesitlerinin hareketleri öngörülebilir biçimde filamanlar halinde ilerlediği, akış rejimleri ortaya çıkmaktadır (Tabeling, 2005). Reynolds sayısı,

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (2.1)$$

akışkanlar mekaniğindeki önemli birimsiz niceliklerden biridir. Burada, ρ , v ve μ sırasıyla bir kanalda ilerleyen akışkanın yoğunluğu, akış hızı ve dinamik viskozitesi olup, L de kanalın hidrolik yarıçapıdır (Young vd., 2010).

Akışkanların akış modelini matematiksel olarak tahmin etme kavramı ilk kez 1851’de George Gabriel Stokes tarafından ortaya atılmıştır (Stokes, 1851). Ancak, daha sonra Osbourne Reynolds tarafından 1883’te araştırılmış, geliştirilmiş ve yaygınlaştırılmıştır. Böylece Eşitlik (2.1)’deki birimsiz nicelik, Reynolds sayısı olarak anılmaya başlanmıştır. Reynold sayısının ne olduğunu kavramak için öncelikle türbülanslı akış ve laminar akış kavramları hakkında bilgi sahibi olmalıyız. Şekil 2.1’de farklı Reynolds sayıları için türbülanslı ve laminar akış şematik olarak gösterilmiştir. Laminer-türbülanslı akış geçişi için kesin bir Re değeri bulunmasa da literatürde genellikle $Re > 2000$ olan değerler türbülanslı akış rejiminde değerlendirilmektedir (Tabeling, 2005). Mikro akışkan sistemler, sıvı akış hızı ve mikro kanalın hidrolik yarıçapı küçültülerek $Re \sim 1$ mertebesinde Reynolds sayıları ile akış koşullarında çalışmaktadır.

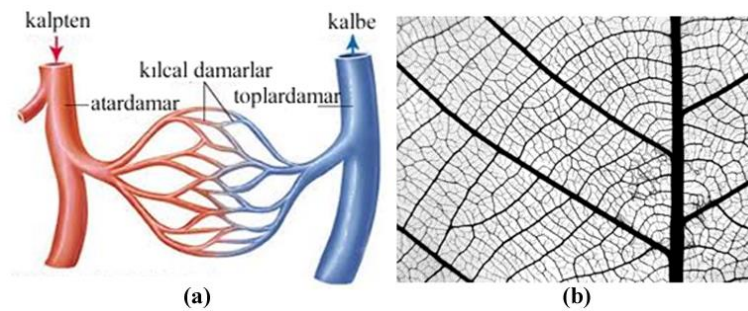


Şekil 2.1. Türbülanslı akış ve laminer akış.

Reynold sayısı, Darcy-Weisbach denklemi de dahil olmak üzere akışkanlar mekaniğindeki birkaç denklemdeki sürtünme faktörünün hesaplanmasında önemli bir rol oynamaktadır (Song, 2018). Suda yüzen organizmaların hareketlerini modellerken kullanılır. Atmosferik hava bir akışkan olarak kabul edilir. Dolayısıyla, bunun için Reynolds sayısı hesaplanabilir. Bu, çeşitli yüzeylerin aerodinamik özelliklerini incelemek için rüzgar tüneli testinde uygulamayı mümkün kılar. Uçaktaki rüzgar kaldırması testinde, özellikle de yüksek hızlı uçakları çevreleyen havanın yoğunluğunun lokal olarak artmasına neden olan süpersonik uçuşlarda önemli bir rol oynar.

2.1.1. Doğada Mikro akışkanlık

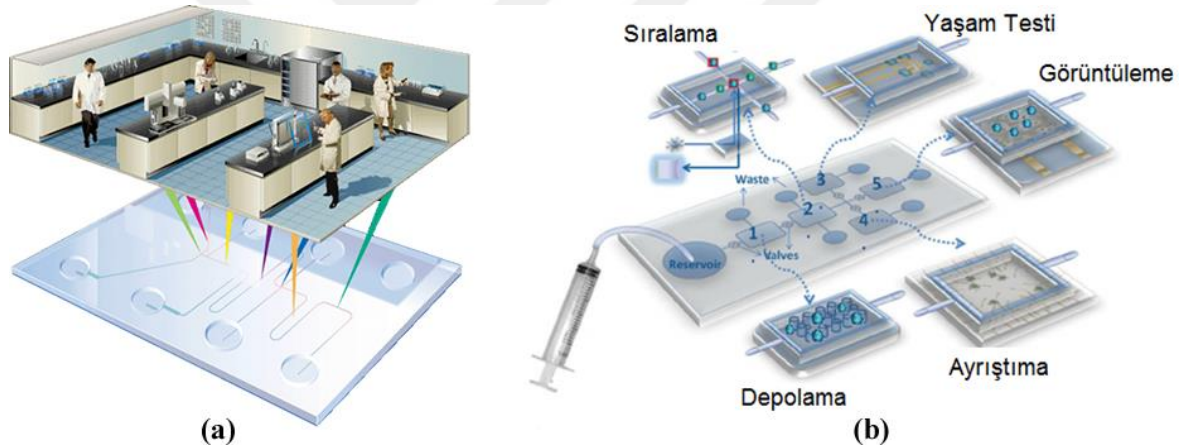
Mikro akışkanlığın doğa ile bağlantısı oldukça önemlidir. Bu konuda aklımıza ilk gelen örnekler taşınabilir su, atık su, hava analiz cihazlarıdır. Bu cihazlar ile laboratuvara ihtiyaç duymadan su ve hava kalitesi testleri yapılabilir. Mikro akışkanlık ayrıca, sentetik biyoteknolojinin konusu olan mikro akışkan çiplerle DNA sentezinin yapılabilmesine büyük katkı sağlamıştır (Tabeling, 2005). Gıda, tarım ve hayvancılık alanlarında da mikro akışkanlığın birçok kullanımı ile karşılaşmamız mümkündür. Örneğin, süt inekçiliğinde sütten somatik hücre sayısının ölçülmesini sağlayan taşınabilir cihazlarda kullanılmaktadır (Garcia-Cordero vd., 2010).



Şekil 2.2. (a) Memeli vücudunda kılcal damarlar ve (b) ağaç yaprağında kılcal damarlar.

2.2. Yonga Üstü Laboratuvar Sistemler

Günümüzde yaygın olarak kullanılan mikro akışkan sistemler ile akışkanlar dinamiği problemleri çözülerek metrenin milyonda/milyarda biri boyutlarda mühendislik yapılabilir. Örneğin, yarıçapı 10 mikrometre (μm) olan kanallar üretilip içlerine onlarca hücre tek tek yerleştirilebilir, daha sonra her bir hücrenin etrafındaki ortamı aynı anda değiştirip etkileri gözlemlenebilir (Young ve Beebe, 2010). Mikro akışkanların en heyecanlandırıcı uygulamalarından biri, çip üzerinde laboratuvar (LoC) teknolojisidir. LoC'nin temeli, Şekil 2.3(a)'daki gibi bir laboratuvarda yapılan bütün işlerin birkaç mm düzeyinde boyutlara sahip çiplerde gerçekleştirilebilir olmasıdır. Böylece, çok küçük hacimlerdeki örneklerin kimyasal ve fiziksel yapılarının hızlı ve doğru bir şekilde belirlenebilmesi sağlanır, Şekil 2.3(b).



Şekil 2.3. (a) Bir LoC mikro akışkan sistem ile bir laboratuvarı yürütülen çeşitli testler yapılabilir (URL-1, 2020), (b) beş farklı işlemi bir arada gerçekleştiren LoC sistem (Primiceri vd., 2013).

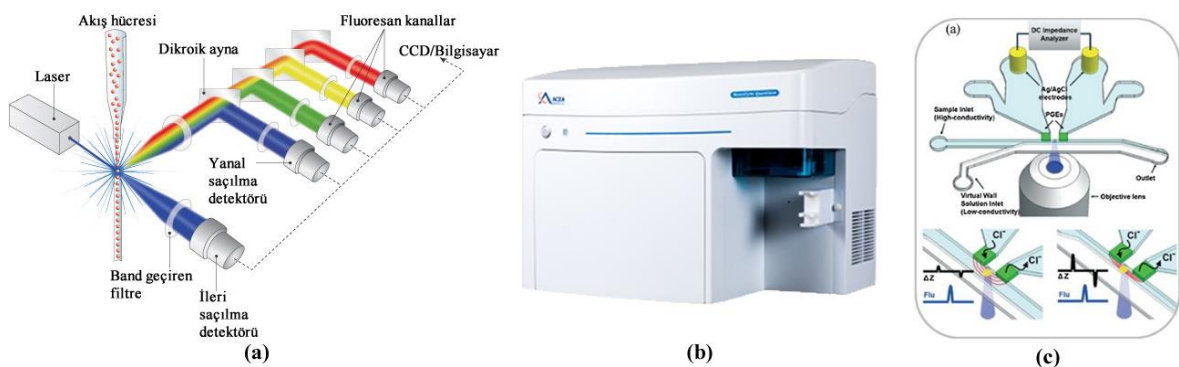
Çok farklı ve kompleks tasarımlara sahip olabilen LoC sayesinde, bir damla kan ile kan hücresi sayımı, olası hastalıkların teşhisi, tek kanserli hücrelerin tayini gibi farklı işlemleri tek bir yapıda toplamamız mümkündür (Nilsson vd., 2009). Örneğin, akış sitometrisi ve kimyacıların örneklerin içeriğini belirlemekte kullandığı kromatografi gibi metotların keskinleştirilmesi, çok daha az örnek ile daha hassas işlem yapılabilmesine olanak verir (Dittrich ve Manz, 2006). Mikro akışkan uygulamaları temel fizikten moleküler biyolojiye, kimyadan tıbbı kadar uzanmaktadır. Bu sistemlerin üretiminin

oldukça ucuz olması, kütlenin ve ısının çabuk ve kolay iletilebilir olması ve tasarım esnekliği gibi avantajları, gelecek için büyük umutlar beslenmesini sağlamaktadır. Mikro akışkanlık ayrıca, mikro ve nano ölçekte kontrollü bir şekilde çalışabilmemizi, analiz yöntemlerini hassaslaştırmamızı ve geliştirmemizi kolaylaştırır.

2.2.1. Akış Sistometrisinin Tanımı, Çalışma Prensibi ve Uygulama Alanları

Sitometri, hücrelerin veya biyolojik partiküllerin fiziksel ya da kimyasal karakterlerinin ölçülmesidir. Akış sitometrisi ise, akan bir sıvının içerisindeki hücrelerin özelliklerinin incelenmesi olarak tanımlanabilir. Akış sitometrisinin temel yaklaşımı; hücrelerin boyut, şekil, DNA ve RNA içeriği, sitoplazmik taneliliği bakımından incelenmesidir (McKinnon, 2018). Bu amaçla, hedeflenen yapı ya da hücre önce floresan madde ile işaretli bir antikor veya özel bir boya (nükleik asitlere özel propidiumiodide) kullanılarak işaretlenir.

Şekil 2.4(a)'da örneği görülen akış sitometresi floresan yoğunluğuna bağlı olarak süspansiyon halindeki hücrelerin büyüklüğüne ve aneliliğine göre tek hücre seviyesinde kantitatif ölçüm yapan bir sistemdir. Süspansiyon halindeki hücreler hava basıncı ile sıvı içinden geçirilir (IDEX Health & Science, 2020). Sıvının çok hızlı akışı yüksek bir hidrostatik basınç oluşturur ve bu basınçla hücreler cam veya kuvarstan yapılmış akış kabinine (flow cell) gelirler, Şekil 2.4(a). Bu kabinin geometrik şekli ve sıvının laminar akışı hücrelerin tek bir sıra halinde laser kaynağı önünden geçişini sağlar.



Şekil 2.4. (a) Bir akış sitometresinin şematik görünümü (IDEX Health & Science, 2020), (b) laboratuvarlarda kullanılan bir akış sitometresi (Biocompare, 2020), (c) bir LoC mikro akışkan akış sitometresi (Choi vd., 2014, Yang vd., 2018).

Bir akış sitometresinde genel olarak hücrelerin analizi için sistemde öne saçılma, yana saçılma ve floresan algılayıcılar bulunur, Şekil 2.4(a). Temel olarak bir akış sitometresi, ileri saçılma grafiği (Forward scatter) ile hücrelerin yaklaşık büyüklüğü, yana saçılma grafiği (side scatter) ile yaklaşık hücre tanlılığı, floresan grafiği (belli dalga boyuna has parıldama eldesi) ile yaklaşık floresans miktarı hakkında bilgiler ediniriz (McKinnon, 2018). Akış sitometresinde analiz için hücre süspansiyonu hazırlamak amacıyla; kan, kemik iliği, beyin, omurilik sıvısı, alveoler lavaj sıvısı, eklem sıvısı, plevral sıvı, doku biyopsi örnekleri, parafin bloktaki dokular ve hücre kültürü örnekleri kullanılabilir. Şekil 2.4(b)'de laboratuvarlarda analiz için kullanılan bir akış sitometresi görülmektedir (Biocompare, 2020). Bu gibi yüksek maliyetli sitometrelerin büyük hacim, karmaşıklık ve büyük örnek hacmi gereksinimi gibi dezavantajları vardır. Öte yandan, LoC mikro akışkan sistemler ile akış sitometrisi uygulamaları giderek artmaktadır. Örneğin, Şekil 2.4(c)'de mikrometre altı boyutlara sahip bakterileri algılamak için kullanılan LoC mikro akışkan sitometrisi (Choi vd., 2014), küçük hacim, küçük örnek hacmi gereksinimi, düşük maliyet, yerinde tanı imkanı ve yüksek duyarlılık gibi avantajlara sahiptir.

2.2.2. Yonga Üstü Organ (Organ-on-a-Chip) Sistemler

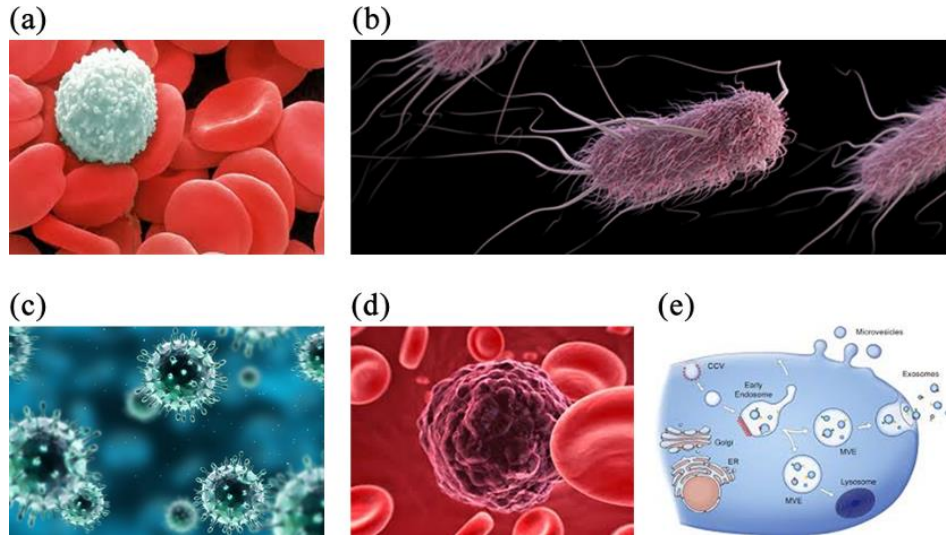
Yonga üstü organ (Organ-on-a-chip) sistemler mikro akışkanlığın gittikçe popülerleşen uygulamaları arasındadır. Bir yonga üstü organ sistemi, belirli bir organın ya da organ sisteminin belirlenen bir işlevini, mekanik ya da fizyolojik tepkisini simüle etmek üzere yapay olarak geliştirilen mikro akışkan kanallardaki hücre kültürlerini içermektedir (Kodzius vd., 2017). Yonga üstü organ sistemleri, canlı organlarının belirli bir patojene, mikro organizmaya, ilaca ya da uyarıma vereceği tepkilerin öngörülmesi için oldukça uygundur. Bu sayede, denekler ile yıllar sürebilecek klinik testlere alternatif olarak organ modelleri geliştirilebilmektedir. Örneğin, Şekil 2.5'te bir yonga üstü akciğer görülmektedir (Wyss Institute, 2018). Burada mavi ve kırmızı renkli boyar madde içeren mikro kanallar, kalpten akciğere gelen ve akciğerden kalbe dönen kirli ve temiz kanı taşıyan damarları temsil etmektedir. Ortadaki mikro kanalda akciğer hücrelerini modellemek için kullanılan perfore zar bulunmaktadır.



Şekil 2.5. Bir yonga üstü akciğerin yakından görünümü (Wyss Institute, 2018).

2.2.3. LoC ile dolaşımdaki kandan erken tanı uygulamaları

Dolaşımdaki kanda Şekil 2.6’da görüldüğü gibi alyuvar ve akyuvar gibi hücrelerin yanı sıra, bakteri ve virüs gibi mikro organizmalar, hücrelerden salınan mikro veziküller ve dolaşımdaki tümör hücreleri (circulating tumor cells, CTC) gibi biyolojik materyal bulunmaktadır. Tanı, tedavi ve izleme gibi amaçlarla bu yapıların ayrıştırılması büyük önem taşımaktadır (Plaks vd., 2013, Williams, 2013). Örneğin, dolaşımdaki kanda düşük oranlardaki CTC’lerin izolasyonu, kanser tedavisine verilen cevabın izlenmesini sağlamaktadır.



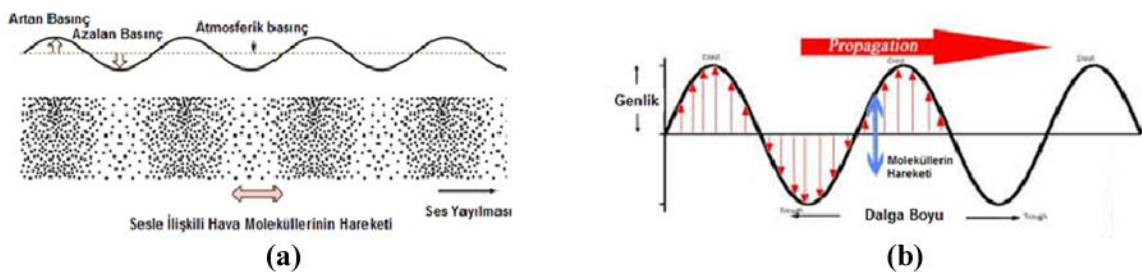
Şekil 2.6. Dolaşımdaki kandaki bazı mikro organizmalara örnekler: (a) kırmızı ve beyaz kan hücreleri, (b) bakteriler, (c) virüsler, (d) dolaşımdaki tümör hücreleri ve (e) ekzozomlar gibi nano/mikrokesecikler.

Son yıllarda, kanserin erken tanısı için kandan 100 nm ölçeğindeki eksozomların ayrıştırılması ve kanser hücrelerinden kaynaklı eksozomların işaretlenmesi için çalışmalar yürütülmektedir (An vd., 2015, Lee vd., 2015, Liga vd., 2015, Lin vd., 2015, Zhang vd., 2015). Ayrıştırma için ilk akla gelen yöntem, santrifugasyondur. Ancak, nanometre boyutlu parçacıkların ayrıştırılması için 100,000g dolayında ivme gerektiren ultrasantrifugasyon kaçınılmazdır. Bu durumda, yüksek maliyetin yanı sıra, hücre zarının parçalanması ve hücrenin biyolojik aktivitesini kaybetmesi gibi tehlikeler de söz konusudur. Bu yüzden, hedef organizmaların izolasyonu için biyo uyumlu, hızlı, küçük hacimli, üretimi kolay ve düşük maliyetli yöntemlere ihtiyaç vardır.

2.3. Yüzey Akustik Dalgası (YAD) Mikro akışkan Sistemler

2.3.1. Dalga hareketi

Durgun bir su birikintisine bir taş attığımızda, taşın suya düştüğü noktadan dışarıya doğru daireler şeklinde bir hareketin yayıldığını görürüz. Bu hareket bir dalga hareketidir. Yine benzer şekilde rüzgarlı havada bayrak direğindeki bir bayrağın hareketi veya rüzgarlı bir havada bir buğday tarlasındaki hareket de bir dalga hareketidir. Periyodik sarsıntı veya titreşim hareketinin bir ortam aracılığı ile iletilmesine dalga hareketi denir. Şekil 2.7(a)'daki gibi titreşim doğrultusu yayılma doğrultusuna paralel olan dalgalara boyuna dalgalardır. Ses dalgaları, yay dalgaları ve deprem (P) dalgaları bu dalgalara örnektir. Titreşim doğrultusu yayılma doğrultusuna dik olan (Şekil 2.7(b)) dalgalara enine dalgalardır. Elektromanyetik dalgalar, yay dalgaları, deprem (S) dalgaları, su dalgaları enine dalga çeşitlerine örnek olarak gösterilebilir (Serway ve Jewett, 2013).



Şekil 2.7. Boyuna ve enine dalgalara örnekler: (a) ses dalgalarının ve (b) elektromanyetik dalgaların yayılımı.

Ses dalgalarının yayılma hızı ortamın cinsi (yoğunluğu ve sıkıştırılabilirliği), sıcaklık ortam basıncı, bağıl nem gibi parametrelere bağlıdır. Ses hızı katılarda en yüksek iken, sıvılarda daha az ve gazlarda en azdır. Ortamın yoğunluğu arttıkça ses dalgalarının yayılma hızı da artar. Ses dalgalarının sıvı ve gaz gibi akışkan bir ortamda ilerlemesi akustik dalga denklemi ile betimlenir (Cicek vd., 2011):

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho(\mathbf{r})} \nabla p(\mathbf{r}) \right) + \frac{\omega^2}{\rho(\mathbf{r})c^2(\mathbf{r})} p(\mathbf{r}) = 0; \quad p(\mathbf{r}, t) = p(\mathbf{r}) e^{i\omega t} \quad (2.2)$$

Helmholtz tipi ikinci derece bu kısmi diferansiyel denklemde $\mathbf{r}$ üç boyutlu uzayda konumu, $p(\mathbf{r})$ akustik basıncı, $\rho(\mathbf{r})$ yoğunluğu, $c(\mathbf{r})$ ortamda ses hızını, ω açısal frekans öz değerini ve t de zamanı ifade etmektedir. Denklemden basınç alanının zamana göre sinüzoidal (harmonik) değişim sergilediği varsayılmıştır.

2.3.2. Elastik dalga denklemi

Katılarda elastik dalgaların yayılımı elastik dalga denklemi ile betimlenmektedir (Alnabulsi, 2012):

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{f} \quad (2.3)$$

Burada ρ katı malzemenin yoğunluğu, $\mathbf{u}$ katı moleküllerinin yer değiştirme vektörü, $\boldsymbol{\sigma}$ Cauchy gerilme (stres) tensörü ve $\mathbf{f}$ de katıya uygulanan hacimsel kuvvettir. Eğer yer değiştirme sinüzoidal zaman bağımlılığı içeriyorsa ($\mathbf{u}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{u}(\mathbf{r}) e^{-i\omega t}$) Eşitlik (2.3) zamandan bağımsız olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

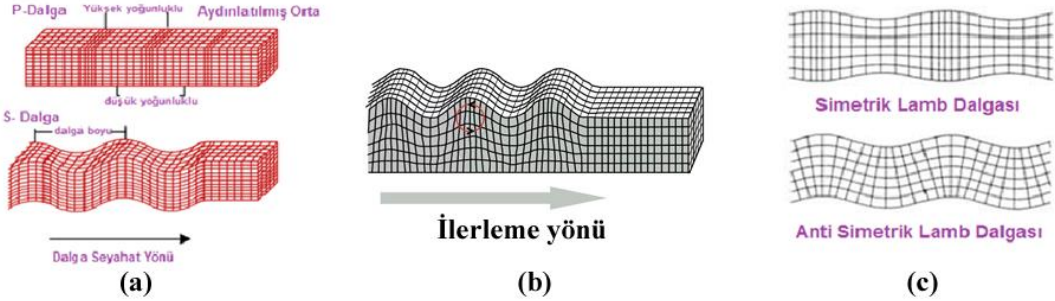
$$-\rho \omega^2 \mathbf{u} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{f} \quad (2.4)$$

Yer içerisinde yayılan elastik dalgalar, geçtikleri ortamın deformasyonuna neden olurlar. Bir cisimdeki veya ortamdaki deformasyonlar ise gerilme ve yamulma ilişkileri ile açıklanabilmektedir. Bir cisim içerisindeki birim hacim elemanına etki eden gerilmelerin, buna karşılık meydana gelen yamulmaların ve yer değiştirmelerin statik bir dengede olduğu ve zamanla değişmediği düşünülür.

2.3.3. Katılarda yüzey dalgaları

Yarı sonsuz veya ince bir plaka halindeki bir katıda ilerleyen yüzey dalgaları dalganın ilerleyiş ve katı moleküllerinin yer değiştirme yönlerine göre farklı kategorilerde

incelenir. Örneğin, Şekil 2.8(a)'da görülen P ve S dalgaları yer kabuğunun içerisinde meydana gelir ve bu nedenle bu dalgalara cisim dalgaları denir (UPSeis, 2006). P dalgaları deprem odağında çevreye boyuna olarak yayılır. P dalgası deprem şiddetinin ölçülmesinde sismografa ilk ulaşan deprem dalgasıdır. Hızı 1.5 km/s ile 8 km/s arasında değişir. Katı sıvı ve gaz ortamlarında P dalgaları yayılabilir, yıkım etkileri düşüktür (British Geological Survey, 2020). S dalgaları ise, deprem odağında çevreye enine olarak yayılan diğer bir cisim dalgasıdır. Deprem şiddetinin ölçülmesinde sismografa P dalgalarından sonra kayıtlara ikinci olarak ulaşan S dalgalarıdır (British Geological Survey, 2020). Bu dalgaların hızı yaklaşık olarak 2.5 km/s ile 4 km/s arasındadır. Bu dalgalar her ortamda hareket edemezler sadece katı kütlelerde hareket edebilirler. Yeryüzünde okyanus üzerinde ilerleyen su dalgası gibi görünen diğer bir dalga çeşidi de Rayleigh dalgalarıdır (British Geological Survey, 2020). Diğer dalgalardan daha büyük enerji taşıyan Rayleigh dalgası deprem anında görülen deprem dalgası olarak bilinir. Bu dalgalar düzlem içinde elips şeklinde bir yol kat ederler ve su dalgalarına benzer davranış gösterirler, Şekil 2.8(b). Piezoelektrik alttaşlar üzerinde YAD uygulamalarında da Rayleigh dalgalarından yararlanılmaktadır.

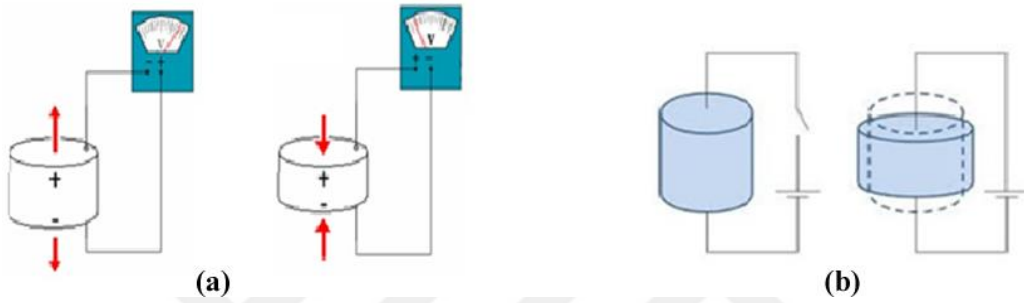


Şekil 2.8. Katı ortamda ilerleyen yüzey dalgalarına örnekler: (a) P ve S dalgaları (UPSeis, 2006), (b) Rayleigh dalgası (URL-2, 2020), (c) ince levhada Lamb dalgaları (Torkamani vd., 2014).

Lamb dalgaları dalga boyuna göre çok küçük kalınlığa sahip ince levhalarda ilerleyen dalgalardır. Bu dalgalar Şekil 8(c)'de görüldüğü gibi simetrik ya da antisimetrik yapıda olabilirler. Bu dalgalarda katı parçacıkların hareketi dalga ilerleme doğrultusunu ve yüzey normalini içeren düzlem üzerindedir. Lamb dalgalarından boru gibi ekipmanlarda ultrasonik testler gibi alanlarda yararlanılmaktadır.

2.3.4. Piezoelektrik malzemeler

Piezoelektrik etki, 1880 yılında Pierre Curie ve Paul-Jacques Curie tarafından keşfedilmiştir. Piezoelektrik malzemeler mekanik titreşimleri elektriksel enerjiye, elektriksel enerjiyi de mekanik titreşimlere çevirebilen malzemelerdir. Piezoelektrik etki olarak bilinen bu özellik ve tersi gerçekleşen süreç 19. yüzyılın son dönemlerinden beri bilinmektedir. Piezoelektrik malzemeler, mekanik sıkıştırma sonucu gerilim üreten (Şekil 2.9(a)), gerilim uygulandığı zaman mekanik titreşim elde edilmesini sağlayan (Şekil 2.9(b)) kristal ve seramiklere ait özellikleri taşır.



Şekil 2.9. (a) Piezoelektrik etki, (b) ters piezoelektrik etki.

Piezoelektrik özellik, bazı malzemelere uygulanan basınç sonucunda elektriksel potansiyel farkı üretme yeteneğidir. Malzemenin içindeki polarizasyon yoğunluğundaki değişimle doğrudan alakalıdır. Eğer malzeme kısa devre değilse, uygulanan gerilme malzemede bir potansiyel farkı meydana getirir. Piezoelektrik radyo vericilerinin frekans kontrolleri telefon iletişimi uygulamalarındaki dalga filtrelerinde kullanılır. Ayrıca kristal mikrofonlarda, gemilerde derinlik ve hedef bulmaya yarayan SONAR cihazlarında, piezoelektrik malzemelerden yararlanır.

Piezoelektrik etki yaratmak için en önemli gereklilik, simetri merkezi olmayan kristaller kullanmaktır (URL-3, 2020). Piezoelektrik bir kristalde sıkıştırma ve çekme kuvveti malzeme üzerindeki elektrotlarda bir elektrik yükü oluşmasına sebep olur, Şekil 2.9(a). Kuvvet kaldırıldığında kristal örgü içerisindeki gerilme, yük akışı oluşturarak ortadan kalkar. Böylece elektrotlar arasında sıfır potansiyel farkı yeniden oluşturulur. Bu durumda elektrik enerjisi mekanik enerjiden üretilmiş olur. Bu durumun tersinin gerçekleşmesi durumunda ters piezoelektrik etki görülür, Şekil 2.9(b).

Piezoelektrik olarak çoğunlukla kullanılan malzemelerden birisi, Şekil 2.10(a)'da görülen kurşun-zirkonyum-titanyum (PZT) seramiktir. Ayrıca, uygulamaya göre kuvars (SiO_2) (Şekil 2.10(b)), Turmalin, Baryum Titanat (BaTiO_3), Çinko Oksit (ZnO), PVDF (Poli-vinilidin- klorür) ve lityum niyobat (LiNbO_3) (Şekil 2.10(c)) da yaygın kullanılan piezoelektrik malzemelerdir. YAD uygulamaları için piezoelektrik malzemelerde göz önünde bulundurulmuş üç temel nicelik YAD hızı, elektromekanik eşleşim katsayısı (k^2) ve maksimum band genişliğidir. Tablo 2.1'de bazı piezoelektrik malzemelerin ilgili özellikleri verilmiştir.

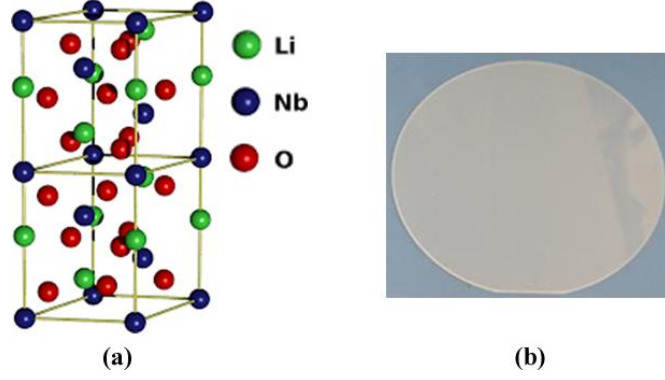


Şekil 2.10. Bazı piezoelektrik malzemeler: (a) kurşun zirkonat titanat (PZT) 5H Seramik, (b) kuvars, (c) lityum niyobat.

Tablo 2.1. YAD sistemlerde kullanılan bazı piezoelektrik kristallerin fiziksel özellikleri.

Malzeme	YAD hızı, m/s	k^2	Maksimum band genişliği
Kuvars, 34° Y-X	3152	0.13%	4%
LiNbO_3 , 128° Y-X	3978	5.4%	20%
LiTaO_3 , X- 112°	3302	0.84%	8%
LiTaO_3 , 42° Y-X	4214	5.0%	20%

Piezoelektrik bir malzeme olan LiNbO_3 Şekil 2.11(a)'da görüldüğü gibi, trigonal kristal yapıya sahiptir. Ferroelektrik, piezoelektrik ve doğrusal olmayan optik özellikler gösterir. Telekomünikasyonda radyo frekanslı (RF) filtrelerde, optik modülatörlerde, akusto-optik cihazlarda ve yüzey akustik dalgası mikro akışkan sistemler gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır (Campbell, 1998, Morgan, 2010).



Şekil 2.11. (a) LiNbO₃ kristal yapısı ve (b) YX-128° kesimli LiNbO₃ yonga plakası.

Tablo 2.2’de görüldüğü gibi, nokta grubu 3m olan LiNbO₃ kristalinin örgü sabitleri $a=5.148 \text{ Å}$ ve $c=13.863 \text{ Å}$ ’dur. Malzeme yoğunluğu ise $\rho=4647 \text{ kg/m}^3$ ’tür. Optik uygulamalarda kullanılan ve doğrusal olmayan optik özellikler de sergileyen kristalin dielektrik sabitleri de $\epsilon_{11}=85.2$ ve $\epsilon_{33}=28.7$ ’dir, Tablo 2.2.

Tablo 2.2. Lityum niyobatin bazı fiziksel özellikleri.

Kaynama Sıcaklığı (°C)	1253
Kristal sistemi	Trigonal
Nokta Grubu	3m
Örgü Parametreleri $a \text{ (Å)}/c \text{ (Å)}$	5.148 / 13.863
Sertlik (Mohs)	5
Yoğunluk ($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$)	4.647
Dielektrik sabiti $\epsilon_{11}, \epsilon_{33}$	85.2, 28.7
Elastik esnemezlik katsayıları ($\times 10^{11} \text{ N/m}^2$) ($c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{14}, c_{33}, c_{44}, c_{66}$)	2.03, 0.573, 0.752, 0.085, 2.424, 0.595, 0.728
Piezoelektrik zorlanma katsayıları (C/m^2) ($e_{15}, e_{22}, e_{31}, e_{33}$)	3.76, 2.43, 0.23, 1.33

Lityum niyobatin farklı uygulamalar için farklı kesimleri mevcuttur. Örneğin, Tablo 2.3’te görüldüğü gibi Y eksenine göre 64° kesimli ve YAD ilerleme doğrultusu kristal X eksenine olan YX-64° LiNbO₃, ya da YX-41° LiNbO₃ ve YX-128° LiNbO₃ gibi kesimlerin yanı sıra, YAD ekseninin kristal Z eksenine olduğu Y kesimli LiNbO₃ de mevcuttur. Bunlardan YX-128° LiNbO₃ $k^2=5.5\%$ eşleşim sabiti ve $c_{YAD}=3980 \text{ m/s}$ Rayleigh YAD hızı ile YAD mikro akışkan sistemlerde yaygın kullanılmaktadır (Wong, 2002). Bu tez çalışmasında da YX-128° LiNbO₃ kristalde Rayleigh YAD elde edilmiştir.

Tablo 2.3. Farklı kesimlere sahip LiNbO₃ kristallerinin YAD özellikleri.

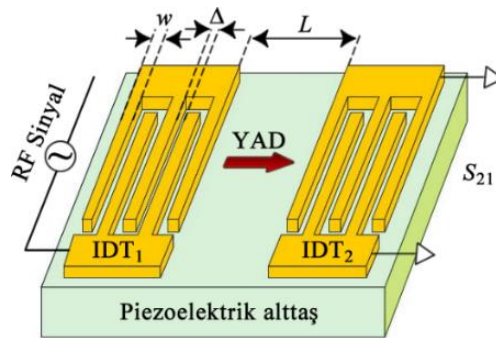
Kristal Kesim	YAD Eksen	Tasarım	YAD Hızı (m/s)	Eşlenim Katsayısı k^2 (%)
64° Y	X	LYAD*	4478	11.3
41° Y	X	LYAD	4380	17.2
128° Y	X	YAD	3980	5.5
Y	Z	YAD	3488	4.5

*LYAD: Sızmalı (leaky) YAD.

2.3.5. YAD Mikro akışkan sistemlerin çalışma prensibi

YAD teknolojileri, mikro akışkanlar topluluğunda dikkat çekmeye başlamıştır. Yüzey akustik dalgaları, LoC sistemlerde sıvı ve parçacıkları kontrol etmek için etkili bir araçtır. YAD tabanlı mikro akışkan cihazlar, basit ve ucuzdur, aynı zamanda yüksek biyo uyumluluk gösterir. Akustik güç yoğunluğu ve frekansı gebeliğin çeşitli aşamalarında sağlık denetimi için kapsamlı bir şekilde kullanılan ve son derece güvenli olduğu kanıtlanan ultrasonik görüntülemeye kullanılaben bir aralıktadır. YAD mikro akışkan cihazlar sıvıların ve parçacıkların hassas bir şekilde manipüle edilmesini ve kontrol edilmesini sağlar (Ding vd., 2013). Böylece hassas algılama da gerçekleştirebilir. YAD tabanlı mikrosensörler yıllar içinde olgunlaşmış olup, diğer YAD tabanlı mikro akışkan bileşenlerle entegre edilebilir (Länge vd., 2006).

Piezoelektrik malzemelerde YAD, iletken elektrotlardan oluşan IDT'ler ile oluşturulur (Campbell, 1998). IDT elektriksel enerjinin mekanik enerjiye dönüşümünü sağlamak için kullanılır, Şekil 2.12. Basit bir rezonatör yapısı aralarında L uzaklığı bulunan iki paralel IDT'den oluşur. Yansıtıcı olarak interdiijital transdüktör (dönüştürücü) ya da çok şeritli aynalar kullanılabilir. Yüzey dalgası iki yansıtıcı arasında tutulur. Bunların arasında çok geçişlilik sağlanarak geçerli bir dalga oluşumu sağlanır. İnterdiijital dönüştürücü rezonansta geçerli dalganın harici elektrik devresiyle eşleşimini sağlar.



Şekil 2.12. IDT ile YAD üretimi ve geçirim spektrumunun eldesi için elektriksel düzenek.

Laminer akış şartlarında elektroforez, dielektroforez, manyetoforez ve optik cımbızlar gibi yöntemlerle biyolojik nanoparçacıkların (NP) ayrıştırılmasına yönelik yaklaşımlar geliştirilmiştir (Ding vd., 2013). Bu yöntemlerin parçacıkların manyetik NP gibi işaretçilerle modifiye edilmesinin gerekliliği (Yeo ve Friend, 2009), yüksek foton enerjisi nedeniyle biyolojik yapının bozulması, optik sistemlerde hizalama gibi karmaşıklığı artıran gereksinimler ve yüksek maliyet gibi dezavantajları vardır. Bunları gideren ve biyo uyumlu biçimde parçacık izolasyonu sağlayan son yıllarda popüler bir yöntem yüzey akustik dalgalarından kaynaklanan akustik ışına kuvvetlerinden yararlanmaktadır (Yeo ve Friend, 2009). Akustik ışına kuvvetleri, kavramsal olarak uzun süre önce Lord Rayleigh tarafından ortaya atılmış (Rayleigh vd., 1902) daha sonra L.V. King tarafından viskoz olmayan bir sıvıdaki küresel sıkıştırılmaz parçacıklar için hesaplanmış (King, 1934) ve L. P. Gor'kov tarafından genelleştirilmiş bir teori ile açıklanmıştır (Gor'kov, 1962).

Gor'kov teorisine göre bir ultrasonik akustik alanda hareket eden yarı çapı (r) uygulanan alanın dalga boyuna (λ) göre çok küçük (Bruus, 2012), ancak kendisini çevreleyen termo-viskoz katman kalınlığına (d_v) göre çok büyük (Karlsen ve Bruus, 2015) olan küresel bir cisim için akustik ışına kuvveti bir akustik potansiyelin gradyenti olarak yazılabilir (Gor'kov, 1962):

$$\mathbf{F}_a = -\nabla U_a \quad (2.5)$$

Burada U_a potansiyeli ise (Bruus, 2012)

$$U_a = V_p \left[f_1 \frac{1}{2\rho_0 c_0^2} \langle p^2 \rangle - f_2 \frac{3}{4} \rho_0 \langle v^2 \rangle \right] \quad (2.6)$$

ifadesi ile elde edilir. Eşitlik (2.6)'da p ve v akustik alanda basıncı ve arka plan ortamdaki moleküllerin hızlarını, V_p parçacığın hacmini, ρ_0 ve c_0 da arka plan ortamın yoğunluğunu ve bu ortamda ses hızını ifade etmektedir (Bruus, 2012). Burada $\langle \dots \rangle$ işlemi de ultrasonik alanın bir periyodu üzerinden ortalama anlamına gelmektedir. Eşitlik (2.6)'daki f_1 ve f_2 katsayıları da sırasıyla monopol ve dipol terimleri olarak adlandırılmakta olup, monopol terimi viskoz olmayan sıvıdaki durağan sıkıştırılabilir parçacıktan akustik alanın saçılmasına karşılık gelirken dipol terimi, sıkıştırılmaz kabul edilen parçacığı akışkan ortamda yer değiştirmesini ifade etmektedir (Bruus, 2012). f_1 ve f_2 terimleri ρ_p ve c_p sırasıyla parçacığın yoğunluğu ve parçacıkta boyuna ses hızı olmak üzere,

$$f_1 = 1 - \frac{\rho_0 c_0^2}{\rho_p c_p^2} \quad (2.7a)$$

$$f_2 = \frac{2(\rho_p - \rho_0)}{2\rho_p + \rho_a} \quad (2.7b)$$

biçiminde yazılır. Eğer uygulanan ultrasonik alan durağan dalga biçiminde ise Eşitlik (2.5)'teki akustik ışıma kuvveti

$$F_a = - \left(\frac{\pi p_0^2 V_p \beta_0}{2\lambda} \right) \Phi(\beta, \rho) \sin(2ky) \quad (2.8)$$

halini alır (Shi vd., 2009). Burada F_a , parçacık hacmi, yani r^3 ile orantılıdır. Eşitlik (2.8)'deki $\Phi(\beta, \rho)$ parçacığın durağan alanın düğüm ya da tepe noktasına doğru hareket edeceğini belirleyen temel parametre olup, akustik karşıtlık faktörü olarak adlandırılır (Shi vd., 2011):

$$\Phi = \frac{5\rho_p - 2\rho_0}{2\rho_p + \rho_0} - \frac{\beta_p}{\beta_0} \quad (2.9)$$

Eşitlik (5)'te β sıkıştırılabilirliği (bulk modülünün tersini) ifade etmektedir. Su içerisindeki hücreler gibi çoğu biyolojik materyal için $\Phi > 0$ olduğundan, bu tür parçacıklar durağan ultrasonik alanın düğüm noktalarına göre hacimleri ile orantılı kuvvet etkisi altında hareket ederler. Mikro kanaldaki parçacıklara etkiyen tek kuvvet F_a olmayıp, ona karşı koyan bir Stokes sürüklenme kuvveti de (F_d) mevcuttur:

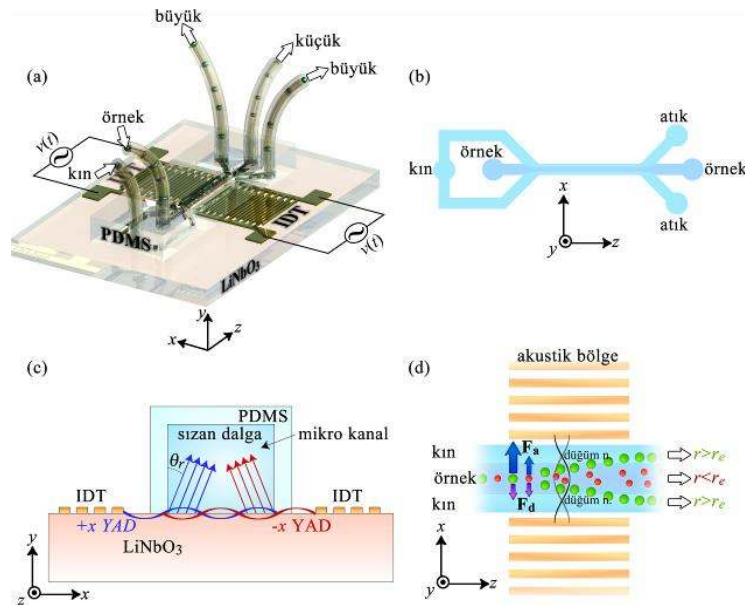
$$F_d = -6\pi\mu r \Delta v \quad (2.10)$$

Burada μ sıvının dinamik viskozitesini, Δv parçacığın sıvıya göre bağıl hızını ifade etmektedir. F_d büyüklüğü r ile orantılı olarak değişmektedir. F_a ile F_d arasındaki bu fark, parçacıkların durağan alanın düğüm noktalarına doğru boyutları ile değişen oranlarda sürüklenmelerini, dolayısıyla boyutsal ayırıcılığı sağlamaktadır (Lee vd., 2015).

Yukarıda anlatılan yaklaşım, durağan YAD ile biyolojik parçacıkların boyutlarına göre ayrıştırılması için başarı ile kullanılmıştır (Shi vd., 2008, Franke vd., 2009, Shi vd., 2009, Yeo ve Friend, 2009). Durağan YAD kullanımı parçacık ayırtırmada biyo uyumlu, düşük güçlü ve maliyetli, standart üretim teknikleri ile elde edilebilen, küçük ölçekli LoC sistemlerin geliştirilmesine önemli katkı sağlamıştır. Bu aygıtlar ile kan hücrelerinin

(Franke vd., 2010, Ding vd., 2012) *Escherichia coli* gibi bakterilerin (Ai vd., 2013), CTC'lerin (Kanwar vd., 2014, Li vd., 2015) ve eksozomların (Kanwar vd., 2014, Lee vd., 2015, Liga vd., 2015) boyutlarına göre izolasyonu mümkün olmuştur.

Eşitlik (2.8) ve (2.10)'a göre biyolojik mikro/nanoparçacıkların boyutlarına göre ayrıştırılmasını sağlayan bir mikro akışkan sistem Şekil 2.13'te görülmektedir. Şekil 2.13(a)'da yüksek elektromekanik eşleşme sabiti ($k^2 \sim 5.5\%$) ve YAD hızı (~ 4000 m/s) sayesinde telekomünikasyon ve kimyasal sensörler gibi YAD uygulamalarında yaygın kullanılan YX-128° yönelimli LiNbO₃ piezoelektrik alttaş (Campbell, 1998) üzerine elektron-demet ya da termal buharlaştırma gibi yöntemlerle büyütülen IDT'ler 1-100 MHz mertebesinde frekanslarda RF sinyalleri ile uyarılmaktadır (Ding vd., 2013). IDT'lerin her biri piezoelektrik alttaş üzerinde uzun erimli Rayleigh YAD üretirken, bunlar özdeş ve zıt yönlü oldukları için, Şekil 2.13(a)'da IDT'ler arasındaki bölgede durağan YAD üretilmektedir. Burada bir diğer önemli bileşen, mikro kanalların içerisine soft litografi gibi tekniklerle açıldığı PDMS kalıptır. Biyo uyumlu olan PDMS, mikro akışkan uygulamalarının vazgeçilmezleri arasındadır (Whitesides, 2006). Şekil 2.13(a)'da PDMS içindeki mikro kanallara boyutlarına göre ayrıştırılacak örnek pompalanmakta, kanaldaki parçacıklar, IDT'lerin bulunduğu bölgede boyutlarına göre ayrıştırılmakta ve sistemi farklı çıkışlardan terk etmektedir.



Şekil 2.13. (a) Durağan YAD ile biyo parçacıkların boyutlarına göre ayrıştırılmasında kullanılan düzenek, (b) mikro kanal kesitinin üstten görünümü, (c) zıt yönlere ilerleyen özdeş YAD'ların mikro kanal içerisine kırılması, (d) boyutsal ayrıştırma mekanizması.

PDMS içerisindeki bir mikro kanalın kesit görüntüsü Şekil 2.13(b)'de verilmiştir. Burada kın (şet) ile adlandırılan giriş, örnek sıvısının hidrodinamik odaklama ile mikro kanal merkezine odaklanmasını sağlayan yardımcı sıvı girişidir (Yamada ve Seki, 2005). Su ve fosfat tamponlu tuz (PBS) gibi sıvılarda difüzyon uzunluğu kanal uzunluğundan genellikle büyük olduğundan, kın ve örnek sıvıları çıkışa kadar karışmadan ilerleyebilmektedir.

Durağan YAD ile parçacık ayrıştırma YAD'ın mikro kanalda basınç dalgalarını nasıl oluşturduğu Şekil 2.13(c)'de gösterilmiştir. Piezoelektrik yüzeyindeki titreşimler, PDMS ve sıvı içerisinde aynı frekansta basınç dalgalanmalarına neden olmaktadır. Şekil 2.13(c)'deki θ , YAD'ın mikro kanaldaki sıvı içerisine kırıldığı Rayleigh açısıdır (Wixforth, 2003). Durağan YAD, sıvı içerisindeki kesitte de (xy kesiti) benzer dağılıma sahip akustik dalga ürettiğinden parçacık ayrıştırma mümkün olmaktadır.

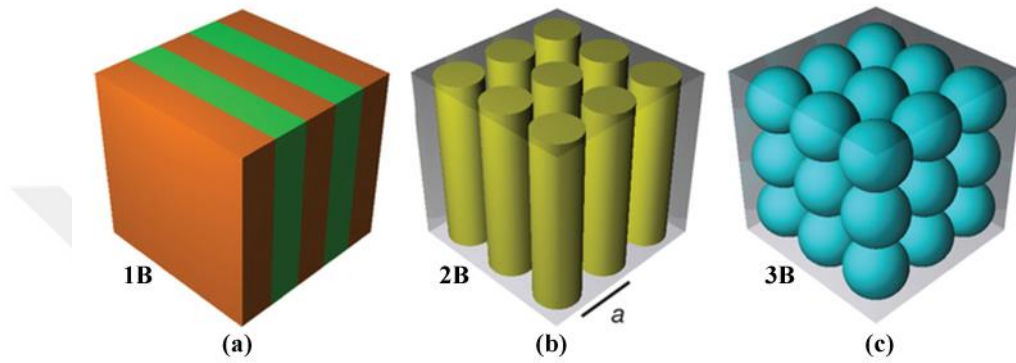
Şekil 2.13(d)'de sistemin üstten görünüşü gösterilmiştir. Mikro kanal içerisinde durağan ultrasonik alanın tepe noktası örnek sıvısının merkezi ile çakışmakta, düğüm noktaları ise kan sıvısı içinde kalmaktadır. Bu nedenle, parçacıklar boyutlarına bağlı olarak farklı hızlarda kın sıvısına doğru itilmektedir.

Belirli bir eşik yarı çapının üzerindeki ($r > r_e$) parçacıklar sistemi kın kanallarından terk ederken, daha küçük parçacıklar örnek çıkışından alınmaktadır. Şekil 2.13'teki sistemde istenilen r_e için optimizasyon parametreleri arasında kın ve örnek giriş hızları, mikro kanal genişliği, yüksekliği ve uzunluğu, parçacıkların boyutsal dağılımı, örnek sıvısında parçacık derişimi, IDT-IDT mesafesi, IDT'ler arasında RF faz farkı, RF uyarım genliği ve IDT'lerin genişliği sayılabilir. Optimizasyon için, elektrostatik, mekanik, akışkanlar dinamiği, akustik ve elektrik gibi farklı alanlarda bilgi gerektiren problemin bütüncül ele alınması gerekmektedir. IDT'ler ile durağan YAD eldesi (Yankin vd., 2014) ve verilen boyutlardaki mikro kanalda belirli bir frekanstaki durağan YAD'ın oluşturduğu akustik alanda parçacıkların hareketi (Nama vd., 2015, Mao vd., 2016) üzerine teorik bilgiler ışığında, Tez çalışmasında durağan YAD sistemlerde istenilen r_e için optimizasyona yönelik sayısal yaklaşımları gerçekleştirilecektir.

2.4. Fononik Kristaller

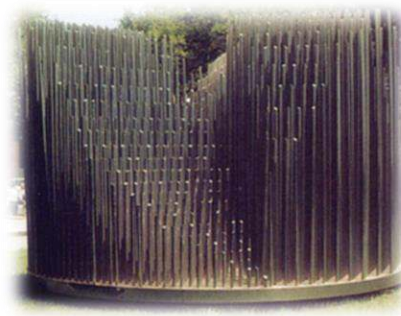
FK, bileşenlerin periyodik olarak düzenlenmesini sağlayan yapay malzemelerdir. Periyodiklik ve saçılma boyutları gibi geometrik parametreler ile bileşenlerin

elastik/akustik özellikleri ile belirtilir. Işık dalgaları için fotonik kristallerin akustik muadilleri olarak önerilmesine rağmen, fizik zenginliği ve geniş kapsamlı uygulamaları nedeniyle kendi statülerini hak etmişlerdir. Metre ile nanometre arasındaki uzunluk ölçeklerini içeren birçok alanda uygulama imkanı sağlamaktadır. Şekil 2.14'te 1 boyutlu (1B), 2 boyutlu (2B) ve 3 boyutlu (3B) fononik kristallerin şematik gösterimleri verilmiştir. Burada hava-katı, su-katı veya katı-katı şeklinde farklı iki malzemeden oluşan levhaların periyodik olarak üst üste yığılmasıyla oluşturulan 1B FK Şekil 2.14(a)'da görülmektedir.



Şekil 2.14. (a) 1, (b) 2 ve (c) 3 boyutlu fononik kristallerin şematik gösterimi (Maldovan, 2013).

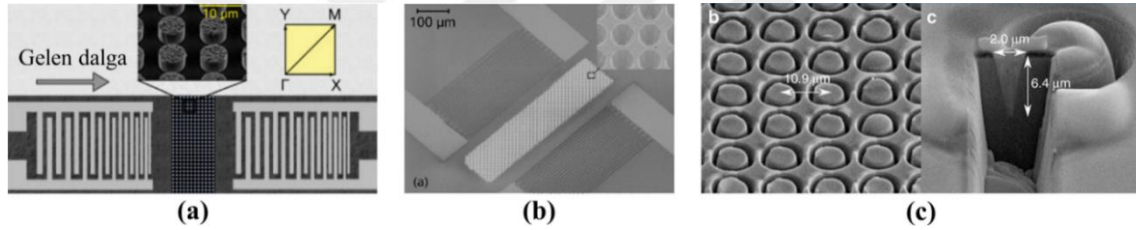
Şekil 2.14(b)'de homojen ortamda kare örgü düzeninde dizili periyodik silindirik saçıcılardan oluşan 2B FK görülmektedir. 2B FK üçgen, bal peteği veya dikdörtgen gibi farklı örgü dizilimlerinde de oluşturulabilir. Küresel saçıcıların basit kübik yapıda dizildiği 3B FK ise Şekil 2.14(c)'de görülmektedir. 3B FK'nın en yaygın kullanım alanı herhangi bir yönden gelen akustik dalgaların iletiminin engellendiği tam band aralığı sayesinde akustik yalıttır. Şekil 2.15'te Eusebio Sempere tarafından yapılan ve duyulabilir frekanslarda band aralığı sergileyen 2B FK heykeli görülmektedir (Maldovan, 2013).



Şekil 2.15. Eusebio Sempere'nin Madrid parkındaki heykeli, kHz frekanslarında ses dalgalarını bloke etmek için 2.9 cm periyotlu bir 2B FK'dan oluşmaktadır.

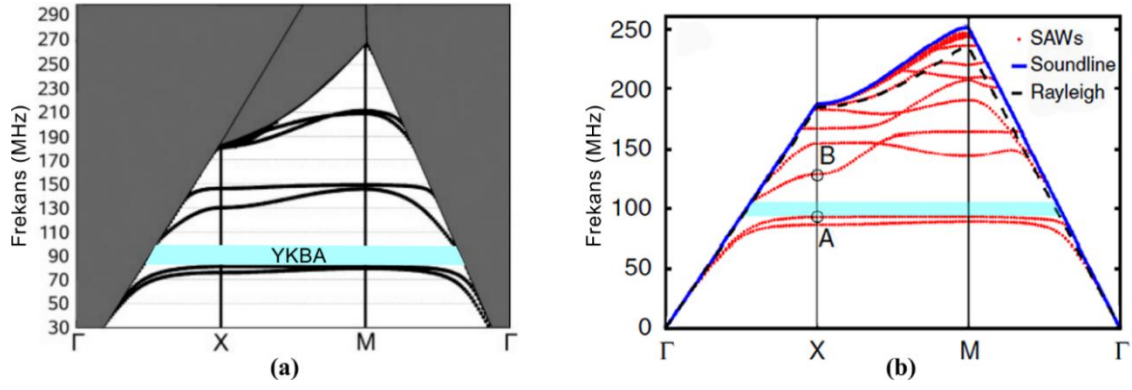
2.4.1. Piezoelektrik Fotonik Kristaller

Piezoelektrik fotonik kristaller (PFK), piezoelektrik alttaşı üzerine periyodik metal saçıcıları elektrokaplama gibi yöntemlerle büyütür (Achaoui vd., 2011, Pourabolghasem vd., 2014) ya da piezoelektrik malzemelerde periyodik aşındırma (Benchabane vd., 2006, Ash vd., 2017) ile oluşturulur. Bu tür FK'lar YAD uygulamaları için ideal yapılardır. Şekil 2.16(a)'da kare örgü yapısında Ni çubuklardan oluşan 2B FK görülmekte olup, şekildeki IDT'ler FK'nın geçirim spektrumunu elde etmek için kullanılmaktadır (Achaoui vd., 2011). Şekil 2.16(b) ve (c)'deki 2B FK'lar ise alttaşa sırasıyla silindirik ve halkasal oyuklar açılarak oluşturulmuştur. Bunun için, derin reaktif iyon aşındırma (DRIE) ve odaklanmış iyon demeti (FIB) litografisi gibi yöntemler kullanılırken, kristalin yöneliminden dolayı Şekil 2.16(b) ve (c)'de profil kenarlarının dik değil açılı olduğu görülmektedir. Hesaplamaların gerçek durumla uyumlu olması için bu özellik tez çalışmamızda dikkate alınmıştır.



Şekil 2.16. (a) YX-128° LiNbO₃ piezoelektrik alttaşı üzerinde Ni çubuklardan (Achaoui vd., 2011), (b) dairesel oyuklardan (Benchabane vd., 2006) ve (c) halkasal oyuklardan (Ash vd., 2017) oluşan 2B FK'ların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

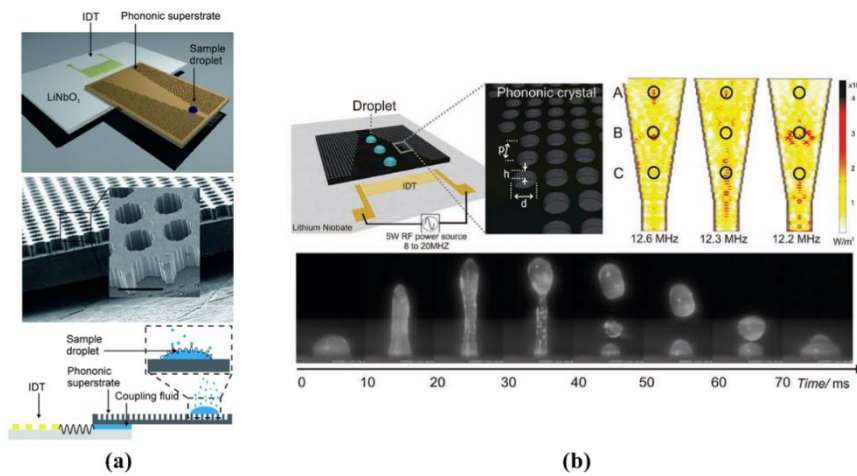
Piezoelektrik fotonik kristallerde Bragg band aralığının yanı sıra, yerleşmiş kip band aralığı (YKBA) da gözlemlenebilir (Achaoui vd., 2011, Pourabolghasem vd., 2014). YKBA'da elastik enerji, Şekil 2.16(a)'daki Ni çubuklar ya da Şekil 2.16(c)'deki halkasal oyukların merkezindeki piezoelektrik silindirler tarafından soğurulmaktadır. Şekil 2.17'de iki farklı piezoelektrik FK için band yapıları ve YKBA oluşumu gösterilmiştir. Tez çalışmada piezoelektrik fotonik kristallerde YKBA incelenmiştir.



Şekil 2.17. (a) YX-128° LiNbO₃ piezoelektrik alttaş üzerinde Ni çubuklardan (Achaoui vd., 2011) ve (b) halkasal oyuklardan (Ash vd., 2017) oluşan 2B FK band yapıları.

2.4.2. Fononik Kristallerin Mikro akışkan Uygulamaları

Bugüne kadar Si membran üzerine 2B fononik kristaller üretilerek LiNbO₃ alttaşta üretilen YAD'ın Si tabakaya iletilmesine dayalı 2 katmanlı sistemler geliştirilmiştir (Bourquin vd., 2011, Wilson vd., 2011, Reboud vd., 2012). Bu sistemler daha çok damlacık mikro akışkan sistemlerde kullanılmıştır. Şekil 2.18'de bu sistemlere örnekler görülmektedir. Şekil 2.18(a)'daki yaklaşımda LiNbO₃ alttaş üzerinde üretilen YAD bir iletim sıvısı ile Si tabakaya aktarılmakta, gittikçe daralan FK dalga kılavuzu sayesinde Si tabaka üzerindeki serbest damlacığa etkiyen akustik ışıma kuvveti giderek artarak en sonunda damlacığın nebulizasyonunu sağlamaktadır (Reboud vd., 2012). Şekil 2.18(b)'de ise benzer bir yaklaşımla FK dalga kılavuzunda damlacık jeti oluşturulmaktadır (Bourquin vd., 2011). Bu yaklaşım, etkin mürekkep püskürtmeli yazıcılar gibi aygıtlar için uygundur.



Şekil 2.18. FK içeren YAD mikro akışkan sistemlere örnekler: 2B FK ile (a) damlacık nebulizasyonu (Reboud vd., 2012), (b) damlacık jeti oluşturma (Bourquin vd., 2011).

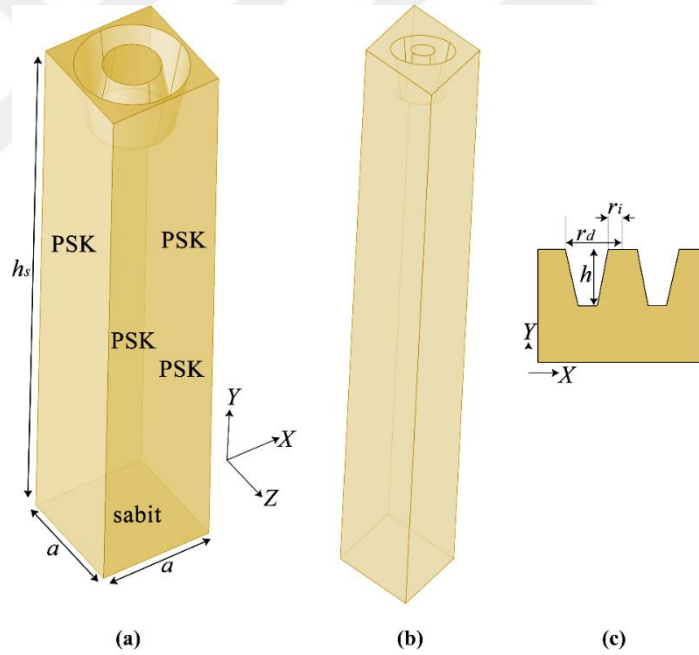
Şekil 2.18'deki gibi literatürdeki örnekler, FK'nın doğrudan piezoelektrik alttaş üzerine işlendiği monolitik yapılar içermediğinden, nispeten karmaşıktır. Ayrıca, aradaki iletim sıvısı gereksinimi ve empedans uyumsuzluğu gibi nedenlerle elastik enerjinin kaybı kaçınılmazdır. Tez çalışmasında, monolitik FK içeren YAD mikro akışkan parçacık ayrıştırma sistemleri sayısal olarak incelenerek literatürdeki eksiklik giderilmiştir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Piezoelektrik Fononik Kristal Tasarımı

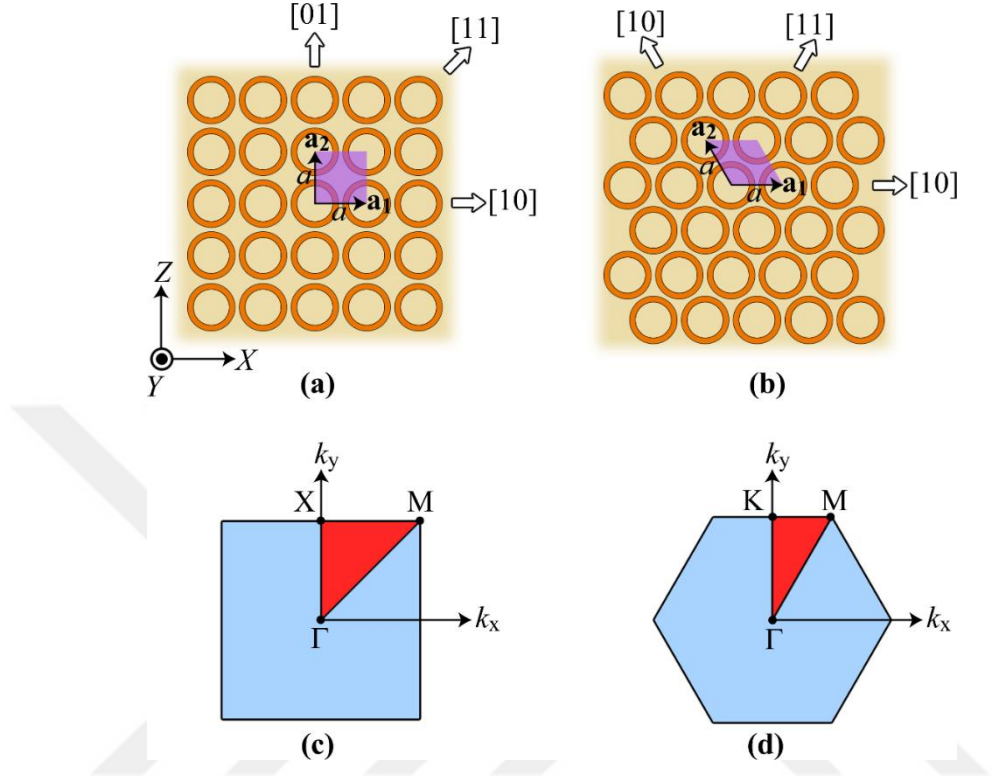
Tez çalışmasında Ash vd. (2017) tarafından önerilen halkalı fononik kristal kullanılarak piezoelektrik fononik kristallerin alttaşa entegre biçimde kullanıldığı yenilikçi YAD mikro akışkan sistemler tasarlanmıştır. Kare (Şekil 3.1(a)) ve üçgen (Şekil 3.1(b)) örgü yapısındaki PFK'nın band yapıları elde edilmiş ve YKBA özelliklerinin PFK geometrik parametrelerine bağlılığı incelenmiştir (Şekil 3.1(c)). Burada a örgü sabiti olup, r_i ve r_d halkasal oyukların sırasıyla iç ve dış yarıçaplarıdır. h ve h_s de sırasıyla oyuk derinliği ve piezoelektrik alttaş kalınlığıdır. Şekil 3.1'de halkasal oyukların yan duvarları dik değil, düşey eksenle (kristal Y eksen) $\theta=10.2^\circ$ açı yapacak biçimde tanımlanmıştır. Bu durum, $YX-128^\circ$ $LiNbO_3$ kristal yapısından kaynaklanmaktadır (Ash vd., 2017).



Şekil 3.1. (a) Kare ve (b) üçgen örgü yapısındaki PFK birim hücreleri ve (c) PFK geometrik parametreleri.

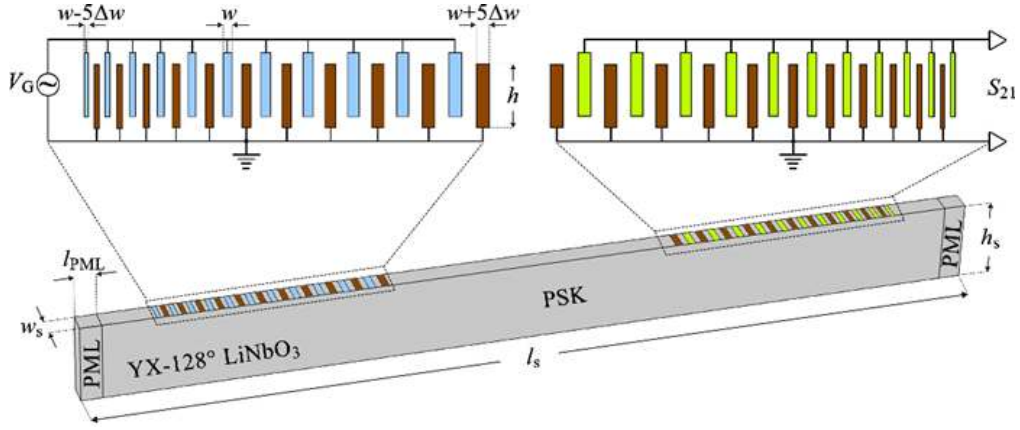
Şekil 3.1'deki PFK üstten görünümü Şekil 3.2(a) ve (b)'de verilmiştir. Her iki PFK için band yapıları elde edilip $[10]$ ve $[11]$ doğrultularındaki geçirim spektrumları hesaplanmıştır. Bu spektrumlar kullanılarak durağan YAD eldesi için uygun PFK yapıları belirlenmiştir. Band yapısı hesaplamalarında Şekil 3.2(c) ve (d)'de görülen birinci

Brillouin bölgeleri dikkate alınarak kare örgü için $\Gamma \rightarrow X \rightarrow M \rightarrow \Gamma$ ve üçgen örgü için $\Gamma \rightarrow K \rightarrow M \rightarrow \Gamma$ yolları izlenerek dağılım (dispersiyon) eğrileri elde edilmiştir. Şekil 3.2(c) ve (d)'deki kırmızı üçgenler ilgili PFK indirgenemez Brillouin bölgelerini göstermektedir.



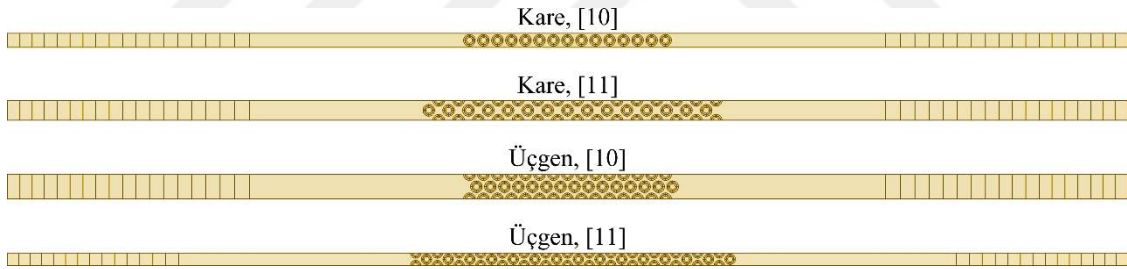
Şekil 3.2. (a) Kare ve (b) üçgen örgü yapısındaki PFK'nın üstten görünümü, (c) ve (d) karşılık gelen birinci Brillouin bölgeleri.

PFK ile nanoparçacıkları boyutlarına göre ayırtırmak için mikro akışkan sistem tasarımında bir sonraki aşama IDT tasarımıdır. Tez çalışmasında Şekil 3.3'te görülen değişken parmak genişlikli IDT yapısı göz önünde bulundurulmuştur. Sabit parmak genişlikli IDT'ye kıyasla daha geniş bir frekans aralığında ilerleyen Rayleigh YAD üretilebilen değişken parmak aralıklı IDT, nispeten daha az mekanik eşleşim sağlamaktadır (Campbell, 1998). Tez çalışmasında tasarlanan IDT, parmak genişliğinin bir merkez genişliğe (w) göre her bir adımda Δw kadar doğrusal olarak değiştiği toplam 11 çift parmak içeren değişken parmak aralıklı yapıdadır, Şekil 3.3. Dolayısıyla, en küçük ve en büyük parmak genişlikleri sırasıyla $w-5\Delta w$ ve $w+5\Delta w$ olmaktadır. Δw değiştirilerek YAD geçirim spektrumu incelenmiş ve geniş band çıkış için gerekli Δw değeri belirlenmiştir. Şekil 3.3'teki sayısal hesaplama modelinin ayrıntıları Bölüm 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Geniş frekans aralığında ilerleyen YAD elde etmek için kullanılan değişken parmak genişlikli IDT tasarımı ve tasarlanan IDT için piezoelektrik alttaş geçirim spektrumunu hesaplamada kullanılan sayısal hesaplama modeli.

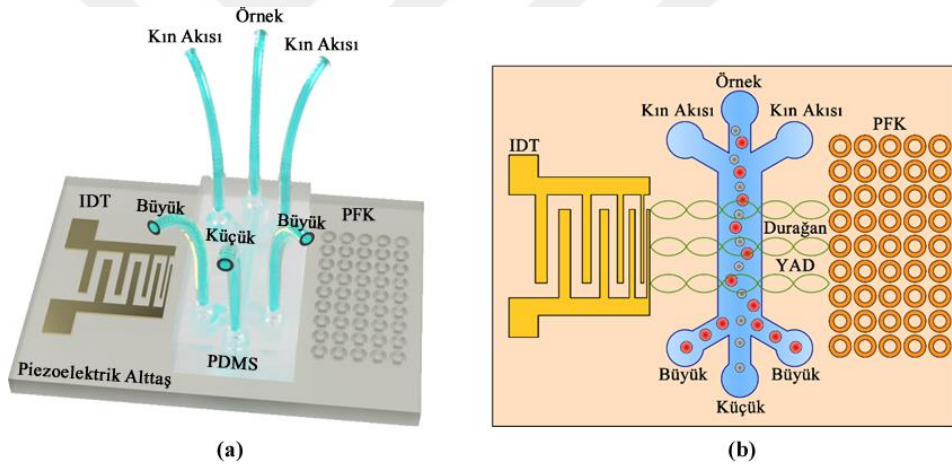
IDT-IDT geçirim spektrumları elde edildikten sonra, PFK geçirim spektrumları 80 MHz-120 MHz aralığında elde edilip PFK band yapısı ile karşılaştırılmıştır. Bunun için, Şekil 3.4'teki gibi iki IDT arasına PFK yerleştirilmiştir. Kare ve üçgen örgü yapılarında [10] ve [11] dizilimleri için geçirim spektrumları ayrı ayrı elde edilmiştir.



Şekil 3.4. Kare ve üçgen örgü yapısındaki PFK'nın [10] ve [11] doğrultularında geçirim spektrumlarının elde edilmesi için kullanılan 3B hesaplama modellerinin üstten görünüşü.

Tez çalışmasında nanoparçacıkları boyutlarına göre ayırtırmak için tasarlanan IDT-PFK durağan YAD mikro akışkan sistem şematik olarak Şekil 3.5(a)'da gösterilmiştir. Burada Şekil 2.13(a)'dan farklı olarak, durağan YAD elde etmede kullanılan IDT'lerden biri PFK ile değiştirilmiştir. Değişken parmak genişlikli IDT RF uyarım frekansı PFK band aralığı içinde kalan bir değer seçilerek, IDT ile PFK arasında kalan bölgede durağan YAD oluşturulmaktadır, Şekil 3.5(b). IDT ve PFK tasarımında Şekil 3.5(a)'daki sistemin deneysel olarak gerçekleştirilebilir olması hedeflenmiştir.

Mikro akışkan sistemde PDMS mikro kanal içerisine hortumlarla farklı boyutlarda nanoparçacıklar içeren örnek sıvısı ve örnek sıvısını mikro kanal merkezine hidrodinamik olarak odaklamak için kullanılan kın sıvıları Şekil 3.5'te görülmektedir. Durağan YAD ile mikro kanal içerisinde oluşturulan akustik basınç alanı ile Eşitlik (2.8)'e göre etkileşen küresel nanoparçacıklar mikro kanalda ilerlerken yana doğru saptırılmaktadır. Büyük parçacıklar akustik ışıma kuvvetinden daha çok etkilendiğinden bunların saptırılma miktarı daha büyük olmaktadır. Öte yandan, daha küçük parçacıklar akustik ışıma kuvveti tarafından saptırılmalarına rağmen, sapma miktarları büyük parçacıklara kıyasla çok daha küçük olduğundan merkez akışını terk edemezler ve böylece mikro akışkan sistemi ortadaki çıkıştan terk ederler. Tez çalışmasında belirli bir eşik yarıçapının (r_c) üstündeki yarıçapa sahip parçacıkları tamamının yandaki çıkışlardan ayrılması ve dolayısıyla boyutsal ayırıcılığın sağlanması için gerekli mikro kanal genişliği, örnek ve kın sıvısı giriş hızları, RF sinyal genliği (V_G) gibi parametreler hesaplanmıştır.



Şekil 3.5. (a) Tez çalışmasında incelenen IDT-PFK çifti ile durağan YAD elde etmeye dayalı mikro akışkan sistemin ve (b) bu sistemde farklı büyüklüklere sahip nanoparçacıkların boyutlarına göre ayrıştırılma mekanizmasının şematik görünümü.

3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)

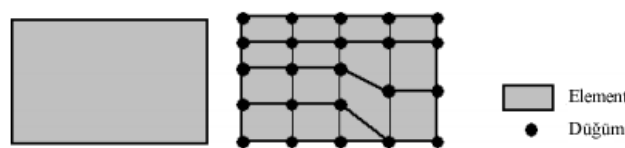
Akustik dalga denklemi (Eşitlik (2.2)), elastik dalga denklemi (Eşitlik (2.3)), Schrödinger denklemi ve Maxwell denklemleri gibi kısmi diferansiyel denklemlerle tasvir edilen fiziksel sistemler için analitik çözümler ancak belirli simetrilere sahip sistemlerde uygun uyarımlar ve sınır/başlangıç koşulları için elde edilebilmektedir. Daha karmaşık fiziksel sistemlerde diferansiyel denklem çözümleri için belirli yaklaşımlar içeren sayısal

hesaplama yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden biri, diferansiyel denklem için doğrusal cebirsel denklem sistemi biçiminde yaklaşık bir ifade yazılarak çözümün arandığı zamanda sonlu farklar (finite-difference time domain, FDTD) yöntemidir (Yee, 1966). Yaygın olarak kullanılan bir başka yöntem ise yaklaşık çözümleri bulmak için kullanılan sonlu elemanlar yöntemidir (FEM) (Logan, 2007).

FDTD yönteminde olduğu gibi sayısal çözümü elde etmek için bir doğrusal cebirsel denklem sistemi çözülmektedir. Ancak, FEM hesaplamalarında diferansiyel denklem yerine çözüm ayrıklaştırılmaktadır. Düğüm noktası olarak tanımlanan ayrık noktalarda cebirsel denklem sisteminin çözümü ile elde edilen yaklaşık sonuçlar, interpolasyon ile problem uzayına genelleştirilmektedir. FEM, yapısal mekanik, akışkanlar mekaniği, termodinamik, elektromanyetik, akustik ve yarı iletkenler gibi pek çok temel bilim ve mühendislik problemine başarı ile uygulanabilmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi sistemin potansiyel enerjisini en aza indirip kuvvetlere deformasyonlar gibi durumlara çözüm bulmak için kullanılan bir tekniktir (Logan, 2007). Mühendislik ve temel bilim problemlerinin çözümünde basit problem çözümü için Sonlu Farklar Yöntemi ve karmaşık problemlerin çözümü için Sonlu Elemanlar Yöntemi uygulanmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemini sonlu farklar yönteminden ayıran özellik lineer integral formülasyonların kullanılmasıdır.

Şekil 3.6'da hesaplama alanı düğüm adı verilen noktalarla bağlı küçük elemanlardan oluşan bölgelere ayrıklaştırılmıştır. Düğümler sisteme girişlerine göre sıcaklık, yer değiştirme gibi serbestlik derecelerine sahiptir. Bireysel elemanların hepsi matematiksel bir denklem seti oluşturmak için birleştirilir. Sistem davranışını yorumlamada bu denklemlerden faydalanırız. Sistemi sonsuz eleman sayısına bölmek olası değildir (Logan, 2007). Bu durumda FEM çözülecek problem için izlenecek duruma göre çözüm üretmektedir. Bu durum ise tahminimizden daha öteye ulaşabilir daha kolay ve pratik sonuçlar elde etmemizi sağlar. FEM ile oluşan elemanlar iki ya da üç boyutlu, şekillerine göre ise üçgen, dörtgen, dört yüzlü veya tuğla şeklinde olabilir.

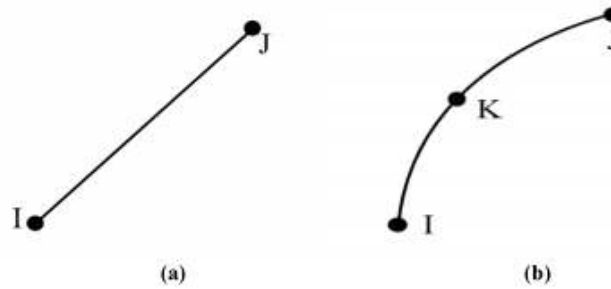


Şekil 3.6. Problem alanının ayrıklaştırılması (Logan, 2007).

Sayısal hesaplamalarda FEM kullanımının sağladığı avantajlardan bazıları şunlardır:

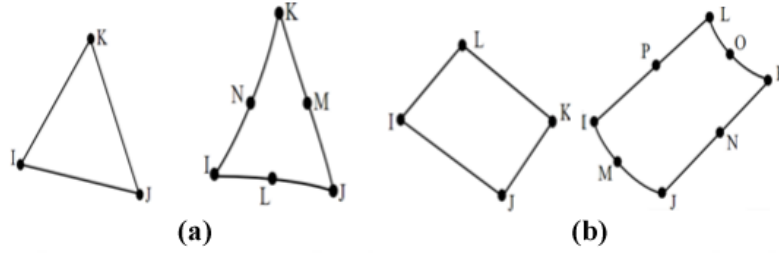
- Aynı hesaplama uzayında farklı fiziksel özellikler birden çok diferansiyel denklemin aynı anda çözümü ile eş zamanlı olarak elde edilebilir.
- Karmaşık yapıdaki geometriler için çözüm hesaplanabilir ve geometrik birimlerin simetrilerine bağlı olarak farklı sonlu elemanlar (örneğin iki boyutta üçgensel, dikdörtgensel, haritalandırılmış, taranmış vb.) kullanılabilir.
- FEM analizlerinde hassasiyet yüksektir ve oldukça doğru sonuçlar elde edilebilir.
- Çok sayıda farklı sınır koşulu bir arada kullanılarak çözüm yapılabilir.
- FEM hesaplamaları ile öz değer problemleri, durağan hal problemleri ve zamana bağlı problemler çözülebilir. Bu, FEM yaklaşımının esnekliğine ve çok yönlülüğüne bir örnektir.

İşlem basamaklarındaki modellerin eleman olarak adlandırılan küçük alanlara ayrılması FEM hesaplamalarında en önemli noktalardan biridir. Hesaplama uzayının boyutsallığına göre 1B, 2B veya 3B elemanlar kullanılabilir. Düğüm noktaları, elemanların köşelerinde olacak biçimde doğrusal, köşelerinde ve eleman kenar ortalarında olacak biçimde ikinci derece (kuadratik) vb. interpolasyon ile çözümün hassasiyeti artırılabilir. Yapısında en az iki düğüm noktası bulunan çizgisel veya eğrisel elemanlar içeren problem çözümünde Şekil 3.7'deki gibi 1B elemanlar kullanılır. Kullanılan modelin hassasiyetini artırmak için elemanlar arasındaki düğüm noktalarının sayısı artırılabilir. 1B elemanlarla çözülebilecek problemlere bir örnek, bir tarafından ısıtılan bir teldeki sıcaklık dağılımının incelenmesi olabilir.



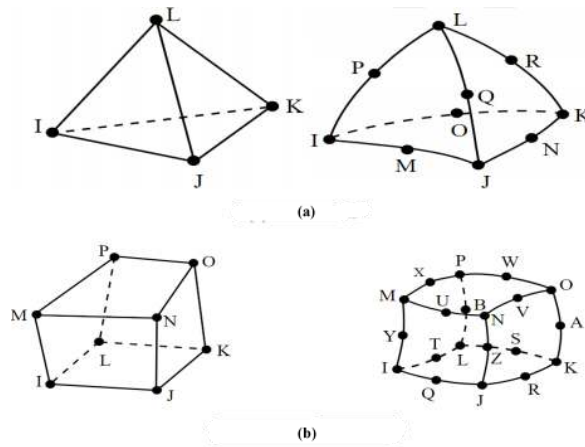
Şekil 3.7. FEM hesaplamalarında kullanılan (a) doğrusal ve (b) eğrisel 1B elemanlar (Logan, 2007).

İki boyutlu geometrilerle tanımlanabilen problemlerin FEM analizlerinde 2B elemanlar kullanılır. En az üç düğüm noktası bulunan bu elemanlar, üçgen veya dörtgen şeklinde olabilir (Şekil 3.8). FEM ızgaralama için pek çok yöntem geliştirilmiştir ve bu yöntemlerle hesaplama uzayını yüksek hassasiyette etkin olarak elemanlarla kaplamak mümkündür.



Şekil 3.8. İki boyutlu elemanlar: (a) üçgen ve (b) dörtgen şekilli eleman (Logan, 2007).

Çoğu fiziksel problemlerin gerçekçi çözümü 3B geometriler kullanılarak hesaplama gerektirmektedir ancak bu durumda cebirsel denklem sistemindeki serbestlik derecesi sayısı önemli ölçüde artmaktadır ve FEM ile problemin çözümü için yüksek bellek gereksinimi oluşmaktadır. Silindirik ya da küresel simetri içeren problemlerde dönme simetrisinden yararlanılarak problem boyutu indirgenebilir. Ayrıca, fiziksel sistem herhangi bir boyutta homojen ise (örneğin 2B FK’da olduğu gibi) yine boyut indirgeme yapılabilir. Bunun mümkün olmadığı 3B problemlerde 3B elemanlar sonlu elemanlar modeli oluşturmasında kullanılır. 3B elemanlara örnek olarak, Şekil 3.9(a)’daki dört yüzlü ve Şekil 3.9(b)’deki altı yüzlü gösterilebilir.



Şekil 3.9. Üç boyutlu elemanlar: (a) dört yüzlü ve (b) düzensiz altı yüzlü eleman (Logan, 2007).

3.3. YAD Mikro Akışkan Sistemde COMSOL Multiphysics ile FEM uygulamaları

PFK band yapısı hesaplamalarında Şekil 3.1'deki birim hücreler kullanılmıştır. Örgü sabiti, 100 MHz ve altındaki frekanslarda çalışmak için $a \sim 10 \mu\text{m}$ seçilmiştir. Tüm hesaplamalarda birim hücre yüksekliği $h_s = 500 \mu\text{m}$ alınmış ve birim hücre tabanı sabit sınır koşulu ($\mathbf{u}=0$) ile tanımlanmıştır. Yanal kenarlarda ise Bloch-Floquet periyodik sınır koşulu (PSK) kullanılmıştır (Kittel, 2007). Hesaplamalarda COMSOL Multiphysics yazılımının elastik dalga denklemini (Eşitlik (2.4)) ve ilgili Maxwell denklemini (Gauss Yasası, $\nabla \cdot \mathbf{D}=0$, $\mathbf{E}=-\nabla V$, V : elektriksel potansiyel, $\mathbf{E}$: elektrik alan, $\mathbf{D}$: deplasman alanı) bir arada çözen piezoelektrik modülü kullanılmıştır. 3B modelde uyarlamalı kafes (mesh) kullanılmıştır. YX-128° LiNbO₃ için (X, Y, Z) kristal eksenleri ile (x, y, z) kartezyen koordinatları arasındaki ilişki, $(\alpha, \beta, \gamma) = (0^\circ, 38^\circ, 0^\circ)$ Euler açıları ile tanımlanmıştır. Şekil 3.1'deki model kullanılarak Ash *vd.* (2017) tarafından önerilen PFK için ($a=10.9 \mu\text{m}$, $r_i=3.1 \mu\text{m}$, $r_d=5.1 \mu\text{m}$, $h=6.4 \mu\text{m}$) elde edilen PFK band yapısı elde edilip sonuçlar karşılaştırılmıştır. Daha sonra, kare ve üçgen örgü yapısındaki PFK band yapılarının a , r_i , r_d ve h parametrelerine bağlı olarak değişimi incelenmiştir.

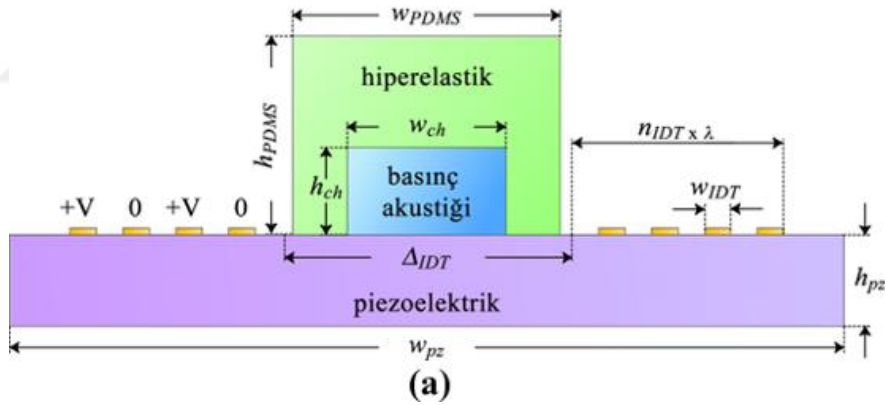
IDT optimizasyonu için Şekil 3.3'teki 3B hesaplama modeli kullanılmıştır. Burada, piezoelektrik alttaş hesaplama kolaylığı bakımından z eksenini doğrultusunda Bloch-Floquet PSK ile tanımlanmış ve alttaş genişliği $w_s = 40 \mu\text{m}$ alınmıştır. YAD ilerleme doğrultusuna (x eksenini) dik alttaş kenarları ise ilerleyen dalgaların kenarlardan yansımalarını engellemek için kusursuz uyuşan katmanlar (perfectly-matched layers, PML) olarak tanımlanmıştır (Berenger, 1994). Alttaş yüksekliği band yapısı hesaplarında olduğu gibi, $h_s = 500 \mu\text{m}$ olarak alınmıştır. IDT genişlikleri, IDT'ler arasındaki mesafe (L) ve IDT-alttaş kenar aralığı dikkate alınarak, alttaş uzunluğu $l_s = 1600 \mu\text{m}$ alınmıştır.

3.4. Mikro akışkan Aygıt Simülasyonları

Kuramsal tasarımda üçüncü aşama, mikro kanalın gözlenen YAD davranışına uygun geometride tasarımıdır. Ayrıca, parçacıkların akışa dik kesitte dağılımı mikro kanalın yükseklik ve genişliği ile de ilişkili olduğundan, kanal kesitindeki akustik dağılımın da dikkate alınması gerekmektedir. Sayısal hesaplamalarda mikro kanal kesiti, Şekil 3.10'daki gibi, piezoelektrik alttaş üzerine düzlemsel mikro kanal yerleştirilerek tanımlanmıştır. FEM simülasyonlarında YAD alanının mikro kanal içerisinde basınç alanını oluşturması, COMSOL Multiphysics'in akustik-yapı etkileşimi modeli kullanılarak

incelenmiştir. Bu modelde, piezoelektrik yüzeydeki yer değiştirme, mikro kanalın piezoelektriğe değen yüzeyi için bir kuvvet oluşturmakta ve kanal içerisinde YAD uyarımıyla oluşan alan dağılımı hesaplanabilmektedir (Mao vd., 2016). Mikro kanaldaki sıvıyı çevreleyen PDMS doğrusal olmayan stres-gerilme bağıntısı içeren hiperelastik ve viskoelastik bir malzeme olup, YAD'ın PDMS içerisinde hızla sönümlenen bir akustik dalga oluşturması beklenebilir. Ayrıca, PDMS'in akustik empedansı (hazırlama şartlarına bağlı olsa da) suyunkine yakın olduğundan, FEM simülasyonlarında su-PDMS ara yüzünde dalgaların az yansıma ile PDMS içerisine doğru sönümlenmesi beklenir.

Durağan YAD etkisinde mikro kanal kesitindeki basınç dağılımını yukarıda anlatıldığı gibi elde edilerek akustik ışıma kuvveti (Eşitlik (2.8)) ve Stokes sürüklenme kuvveti etkisi altında farklı yarıçaplara sahip parçacıkların davranışları incelenmiştir. İlk olarak IDT-IDT çiftinde durağan YAD elde edilip mikro kanalda belirli bir eşik yarıçapının (r_e) üzerindeki nanoparçacıkları kın akısına doğru sürüklemek için gerekli V_G gerilimi belirlenmiştir. PFK ile yapılan hesaplamalarda sağdaki IDT yerine PFK konularak mikro kanaldaki basınç dağılımı incelenmiştir.



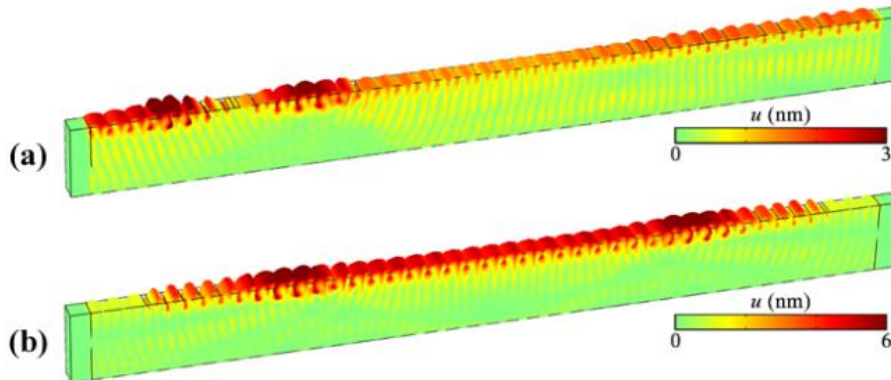
Şekil 3.10. Piezoelektrik altta, IDT çifti, PDMS kalıp ve mikro kanalı bir arada içeren 2B FEM hesaplama modelindeki geometrik parametrelerin tanımları.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Değişken parmak genişlikli ve aralıklı (chirped) IDT optimizasyonu

Geniş frekans aralığında Rayleigh YAD eldesi için, Şekil 3.3'teki $N=11$ çift parmak içeren değişken aralıklı (chirped) IDT'ler göz önünde bulundurulmuştur. Merkezdeki IDT parmak çiftinin genişliği ve aralığı $w=10 \mu\text{m}=\lambda_0/4$ ($\lambda_0=40 \mu\text{m}$, $f_0\sim 100 \text{ MHz}$) ve komşu parmak çiftleri arasındaki doğrusal genişlik farkının Δw olduğu IDT geçirim spektrumu (S_{21} parametresinin frekansla değişimi) 3B FEM simülasyonları ile elde edilmiştir. Burada, piezoelektrik alttaş uzunluğu $l_s=1600 \mu\text{m}$ ve genişliği $w_s=\lambda_0$ alınmıştır. Hesaplamalarda kolaylık için YAD hareketine dik doğrultuda Bloch-Floquet PSK kullanılmıştır. Ayrıca, boylamsal doğrultuda uzunluğu $l_{\text{PML}}=\lambda_0$ olan PML soğuran sınırlar eklenmiştir. Hesaplamalarda frekans taraması 80-120 MHz arasında 0.2 MHz adımlarla yapılmıştır.

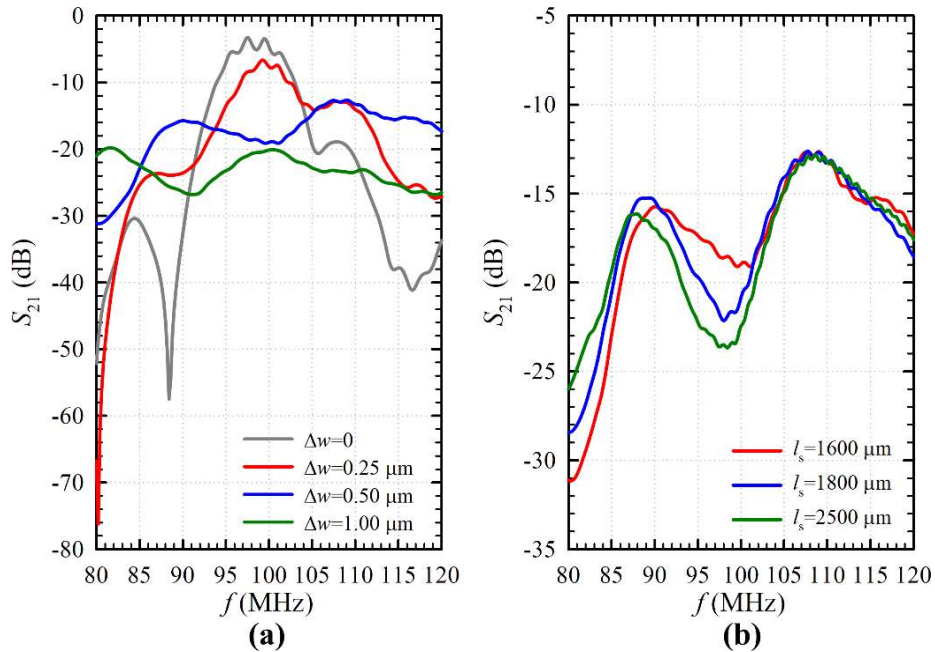
RF sinyal ile uyarılan YAD alanının FEM simülasyonları ve geçirim spektrumlarının elde edilmesi için soldaki IDT $V_G=50 \text{ V}$ genlikli f frekanslı RF sinyali ile uyarılacak biçimde elektrostatik sınır koşulları tanımlanmıştır. Hesaplamalarda zamansal değişimi $e^{-2\pi ft}$ olan RF sinyali için durağan hal (steady-state) çözümleri elde edilmiştir. S_{21} parametresinin eldesi için sağdaki IDT'de yeşil renkle görülen parmaklar yüzen potansiyel (floating potential) sınır koşulu ile tanımlanmıştır. Her bir frekansta soldaki IDT'deki V_G genlikli uyarım için sağdaki IDT'deki yeşil renkli IDT'ler üzerinde oluşan elektriksel potansiyel (V) hesaplanmış ve $S_{21}=20\log_{10}(V/V_G)$ belirlenmiştir.



Şekil 4.1. $w=10 \mu\text{m}$ ve $\Delta w=0.5 \mu\text{m}$ olan $N=11$ çift parmak sayılı IDT'ler tek taraflı ve çift taraflı olarak $f=104.5 \text{ MHz}$ frekanslı RF sinyali ile uyarıldığında oluşan (a) ilerleyen ve (b) durağan Rayleigh YAD.

$\Delta w=0.5 \mu\text{m}$ olan değişken parmak aralıklı IDT kullanılarak $f=104.5 \text{ MHz}$ frekansında elde edilen ilerleyen YAD Şekil 4.1(a)'da gösterilmiş olup, IDT'ler arasındaki bölgede homojen YAD elde edilmektedir. Ayrıca, her iki IDT'nin V_G genlikli RF sinyali ile uyarılması ile elde edilen durağan YAD da Şekil 4.1(b)'de gösterilmiştir. Buradaki durağan YAD mikro akışkan sistemlerde nanoparçacıkların boyutlarına göre ayırıştırılma özelliklerinin incelenmesi için kullanılmıştır.

Değişken parmak genişlikli IDT geçirim spektrumunun Δw 'ya bağlı değişimi Şekil 4.2(a)'da gösterilmiştir. Rayleigh YAD'ın piezoelektrik yüzeyinden yaklaşık λ_0 derinliğe nüfuz etmesi beklendiğinden, alttaş yüksekliği $h_s=200 \mu\text{m}$ alınmıştır. $\Delta w=0$ durumu sabit parmak genişlikli (uniform) IDT'ye karşılık gelmektedir. Bu IDT için S_{21} spektrumu genişliği, -30 dB referans alınarak, yaklaşık 90.5 MHz ile 112 MHz arasında 21.5 MHz (merkez frekansa göre %21) olarak hesaplanmıştır. Δw arttıkça geçirim spektrumunda maksimum S_{21} değeri azalırken, band genişliği artmaktadır, Şekil 4.2(a). Mavi renkli eğri, $\Delta w=0.5 \mu\text{m}$ için S_{21} parametresinin 85 MHz ile 120 MHz arasında -20 dB'den büyük olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, bundan sonraki tüm hesaplamalarda $\Delta w=0.5 \mu\text{m}$ olarak sabitlenmiştir. Bu değer, tasarlanan IDT'lerin fotolitografi ve termal buharlaştırma teknikleri bir arada kullanılarak üretimi için uygundur.

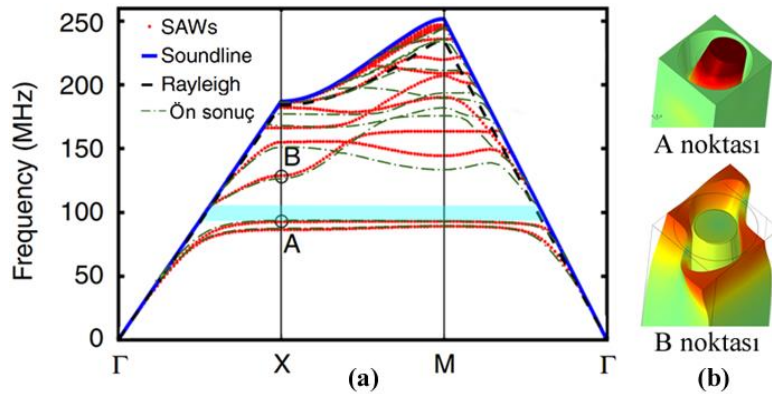


Şekil 4.2. (a) $N=11$ çift parmaklı IDT'nin geçirim (S_{21}) spektrumunun parmak genişliği ve aralığı değişim miktarına (Δw) ve (b) toplam piezoelektrik alttaş uzunluğuna (l_s) bağlı değişimi.

Yukarıdaki hesaplamalara ek olarak, S_{21} spektrumunun piezoelektrik alttaş uzunluğuna (l_s) bağlı değişimi de incelenmiştir. Şekil 4.2(b)'de 2500 μm 'ye kadar l_s değerlerinde geçirim spektrumunun alttaş uzunluğundan (dolayısıyla IDT'ler arası mesafeden) önemli ölçüde etkilenmediği görülmektedir. Bu sonuç, üretilen Rayleigh YAD'ın en az 30 dalga boyu mesafede genliğini koruyarak ilerlediğini göstermesi bakımından önemlidir.

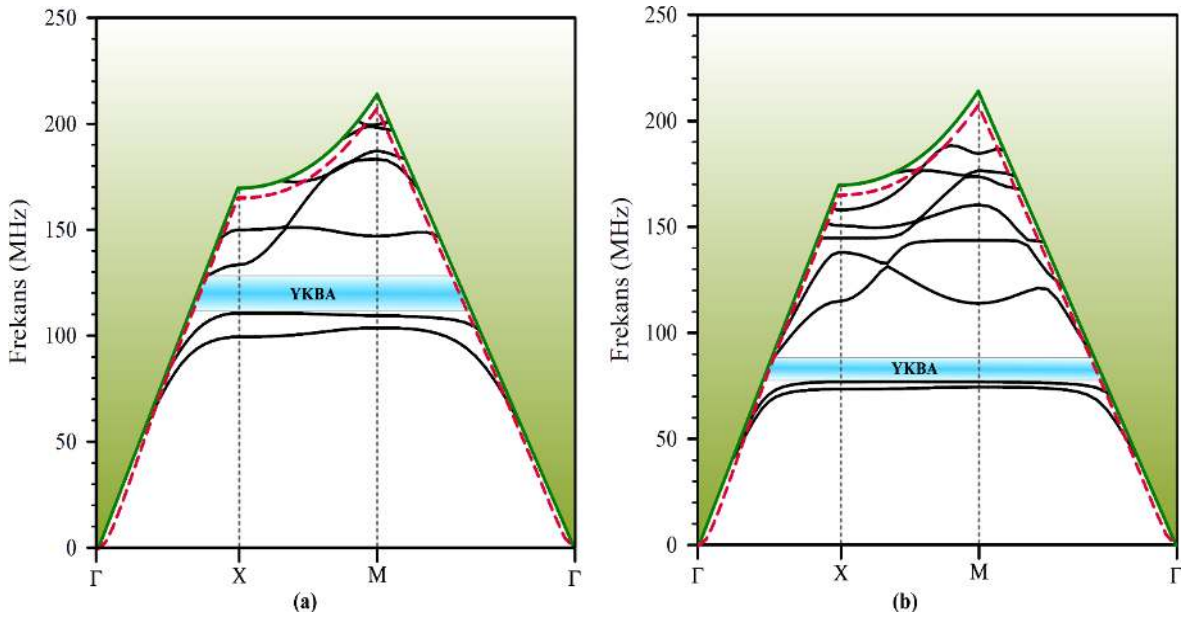
4.2. Kare PFK Band Yapısı

Doğrudan alttaşa entegre oyuklar içeren PFK için YKBA elde etmenin bir yolu, alttaş yüzeyine FIB ile halkasal oyuklar açmaktır (Ash vd., 2017). Böylece, halkasal oyukların içinde kalan silindirik çıkıntıların yerleşmiş rezonans kipleri uyarılabilmektedir. Şekil 2.16(c) ve Şekil 3.1(a)'daki halkasal oyuklar içeren PFK band yapısı Şekil 4.3(a)'da görülmektedir. Karşılaştırma amacıyla, Ash vd. (2017) çalışmasındaki gibi $a=10.9 \mu\text{m}$, $r_i=3.1 \mu\text{m}$, $r_d=5.1 \mu\text{m}$ ve $h=6.4 \mu\text{m}$ alınmıştır. Burada, mavi sürekli çizgi LiNbO_3 yığınsal titreşim kiplerine karşılık gelen ses çizgisidir (sound line). Bu çizginin üzerinde kalan modlar piezoelektrik kristale sızan yığınsal titreşim modlarına karşılık geldiğinden, göz ardı edilmektedir. Şekil 3.4(a)'daki siyah kesikli çizgi ise Rayleigh YAD için ses çizgisidir. Şekil 4.3(a)'da yatay mavi şerit YKBA'nı işaret etmektedir. Şekil 4.3(a) incelendiğinde kare PFK için elde edilen band yapısının literatür (Ash vd., 2017) ile uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 4.3(b)'de A noktasındaki mod şekillenimi merkezdeki dairesel çıkıntıların rezonans modlarından birine karşılık gelmekteyken, B noktasındaki mod PFK'in ilerleyen Rayleigh YAD modları ile ilişkilidir (Ash vd., 2017).



Şekil 4.3. YX-128° LiNbO_3 üzerinde (a) halkasal oyuklardan (Ash vd., 2017) oluşan 2B PFK band yapısı ve (b) A ve B noktalarındaki mod şekillenimleri.

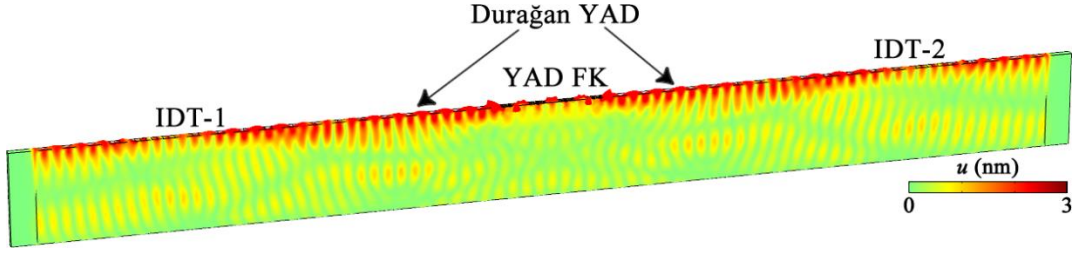
Hesaplamalar sonucunda $a=12.0\ \mu\text{m}$, $r_i=3.1\ \mu\text{m}$, $r_d=5.1\ \mu\text{m}$, $h=6.0\ \mu\text{m}$ ve $\theta=10.2^\circ$ olan kare PFK band yapısında yaklaşık olarak 111 MHz ile 128 MHz arasında geniş YKBA elde edilmiştir, Şekil 4.4(a). Bu YKBA için bağıl band aralığı genişliği %14.2 olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık, aynı geometrik parametrelerle duvar eğimi dikkate alınmadan elde edilen sonuçlar incelendiğinde yerel rezonanslara karşılık gelen bandlar düzleşmekte ve tepe frekansları azalmaktadır. Duvar eğimi 0° iken YKBA yaklaşık olarak 78 MHz ile 99 MHz arasında gözlenmektedir ve bağıl band aralığı genişliği %23.7 olmaktadır. Bu sonuçlar PFK band analizinde YKBA özelliklerinin gerçekçi hesaplanması için duvar eğiminin dikkate alınmasının önemini göstermektedir.



Şekil 4.4. YX-128° LiNbO₃ üzerinde duvar eğimi (a) $\theta=10.2^\circ$ ve (a) $\theta=0^\circ$ olan halkasal oyuklardan oluşan 2B PFK band yapısı.

4.3. Kare PFK ile Durağan YAD Eldesi

Şekil 4.4'te band yapısı verilen PFK ile durağan YAD eldesi Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Burada, her iki IDT $V_G=50\ \text{V}$ genlikli ve band aralığında kalan $f=114.5\ \text{MHz}$ frekansında RF sinyalleri ile uyarılmıştır. Sağdan sola ve soldan sağa ilerleyen her iki Rayleigh YAD fononik kristal tarafından yansıtılmakta, böylece IDT-1 ile FK ve FK ile IDT-2 arasında durağan YAD elde edilmektedir, Şekil 4.5. Elde edilen durağan YAD, paralel işleme yapabilen mikro akışkan parçacık ayırıştırma sistemlerinin tasarımında kullanılabilir.

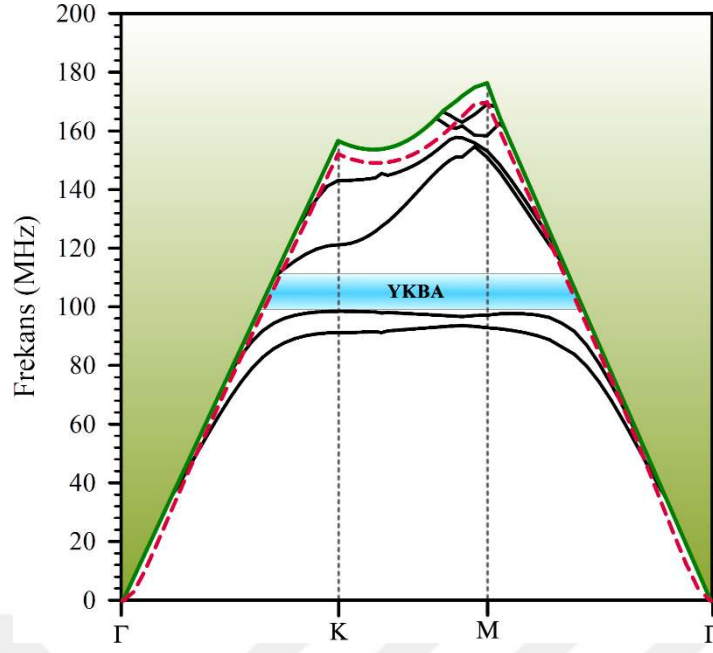


Şekil 4.5. $a=12.0 \mu\text{m}$, $r_i=3.1 \mu\text{m}$, $r_d=5.1 \mu\text{m}$ ve $h=6.0 \mu\text{m}$ olan PFK ile durağan YAD eldesinin FEM simülasyon sonucu.

Band analizlerinde diğer parametreler sabit tutularak ($r_i=3.1 \mu\text{m}$, $r_d=5.1 \mu\text{m}$, $h=6.0 \mu\text{m}$ ve $\theta=10.2^\circ$) periyot (a) değiştirildiğinde, YKBA'nın daralıp kenar frekanslarının arttığı gözlenmiştir. Sadece h değiştirilerek yapılan hesaplamalar sonucunda YKBA'nın daralıp kenar frekanslarının arttığı gözlenmiştir. $h=4 \mu\text{m}$ için YKBA 139 MHz ile 144 MHz arasında gözlenirken, $h \leq 3 \mu\text{m}$ için YKBA yok olmaktadır. Başka bir deyişle oyuklar sıklaştıkça yerel rezonansların etkisi azalmaktadır. Diğer parametreler sabit tutulup r_i azaltıldığında, içerideki saçıcıya karşılık gelen 1. ve 2. yerel rezonans bandları düşük frekanslara kaymaktadır. Buna karşın, dışarıdaki oyuğun titreşim modlarına karşılık gelen 3. band dispersiyonunda önemli değişiklik gözlenmemektedir. Bu nedenle, r_i azaldıkça YKBA genişlemekte ve alt sınırı düşük frekanslara kaymaktadır. $a=12.0 \mu\text{m}$ $r_i=1.5 \mu\text{m}$, $h=6.0 \mu\text{m}$ ve $\theta=10.2^\circ$ olarak sabit tutulup r_d azaltıldığında, YKBA'nın hem alt hem de üst kenarı yüksek frekanslara kayıp YKBA genişliği azalmaktadır. Son olarak, $a=12.0 \mu\text{m}$, $h=6.0 \mu\text{m}$ ve $\theta=10.2^\circ$ olarak sabit tutulup r_i ve r_d aynı anda $r_d-r_i=2.0 \mu\text{m}$ olacak biçimde değiştirilmiştir. Bu durumda YKBA merkez frekansı hemen hemen sabit kalırken, genişliği azalmaktadır. Sonuç olarak, kare örgü yapısındaki PFK'da YKBA geometrik parametreler değiştirilerek ayarlanabilir.

4.4. Üçgen PFK Band Yapısı

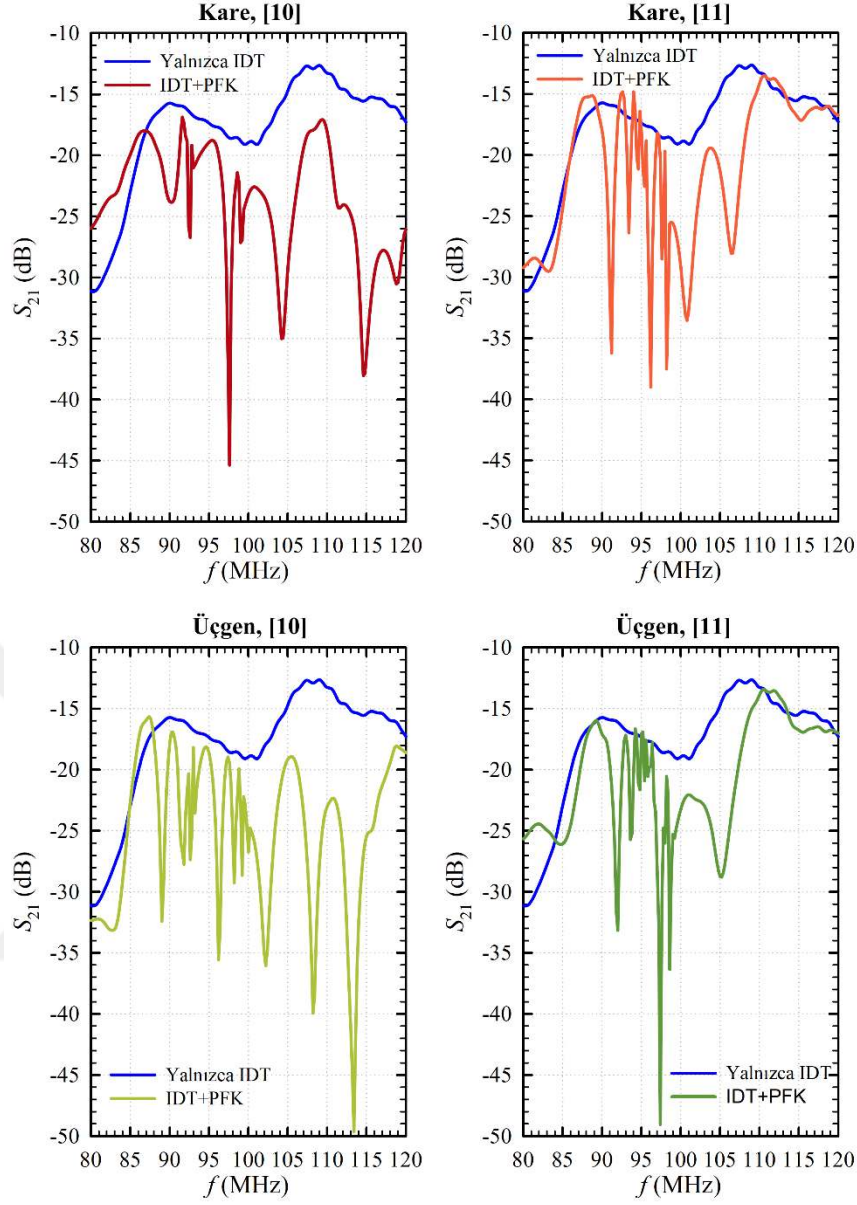
$a=12.0 \mu\text{m}$, $r_i=3.1 \mu\text{m}$, $r_d=5.1 \mu\text{m}$, $h=6.0 \mu\text{m}$ ve $\theta=10.2^\circ$ olan üçgen PFK band yapısında yaklaşık olarak 100 MHz ile 114 MHz arasında geniş YKBA elde edilmiştir. Kare örgüdeki ile benzer genişliğe sahip YKBA, üçgen örgüde daha düşük frekanslara kaymıştır. Her seferinde tek bir parametre değiştirilerek yapılan YKBA analizlerinde kare örgüdekine benzer durum gözlenmiştir. Üçgen örgü yapısı kullanılarak daha düşük frekanslarda YKBA sergileyen ve daha az alan kaplayan PFK tasarlanabilir.



Şekil 4.6. YX-128° LiNbO₃ üzerinde halkasal oyuklardan oluşan üçgen örgü yapısındaki 2B PFK için elde edilen band yapısı.

4.5. PFK Geçirim Spektrumları

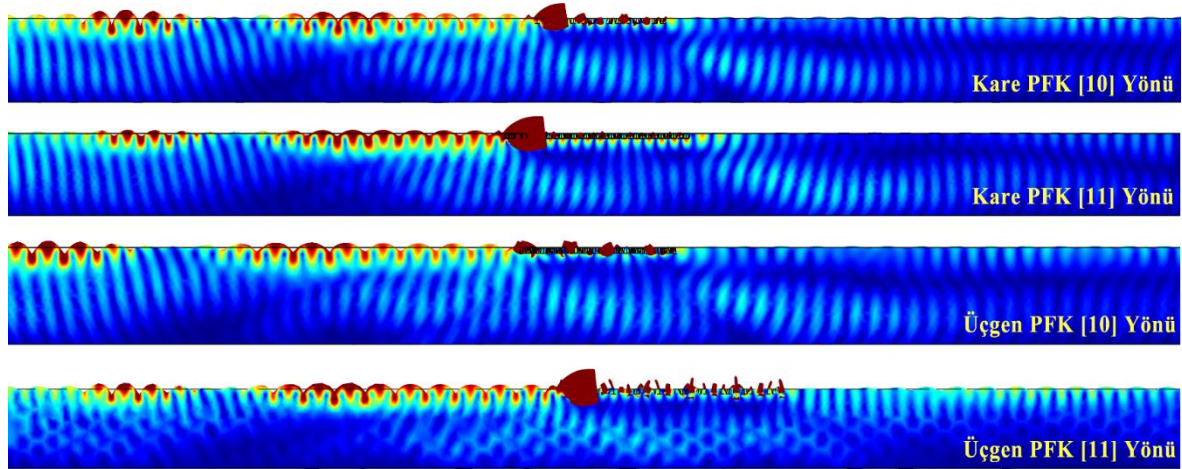
[10] ve [11] doğrultularında kare ve üçgen örgü yapısında 2B PFK için geçirim spektrumları Şekil 4.7’de verilmiştir. Kare PFK’da [10] doğrultusunda 98 MHz, 104 MHz ve 115 MHz etrafında derin soğurum bandları gözlenmiştir, Şekil 4.7. [11] doğrultusunda ise 90 MHz ile 100 MHz arasında soğurum bandları görülmüştür. Üçgen PFK [10] doğrultusunda ise 113 MHz’de $S_{21}=-50$ dB’e kadar uzanan derin bir soğurum bandı vardır. Ayrıca, 96 MHz, 103 MHz ve 108 MHz frekanslarında daha sık soğurum bandları gözlenmiştir, Şekil 4.7. Elde edilen bu sonuç Şekil 4.6’da mavi bölge ile gösterilen YKBA frekans aralığı ile uyumludur. Üçgen PFK için [11] doğrultusunda da 98 MHz etrafında derin soğurum bandı gözlenmiştir. Bu band YKBA alt sınırında güçlü soğurum ile ilişkilidir. Ayrıca, 93 MHz, 99 MHz ve 105 MHz frekanslarında daha sık soğurum bandları gözlenmiştir. Şekil 4.7’deki S_{21} spektrumları Şekil 4.4 ve Şekil 4.6’daki band yapılarında görülen YKBA frekans aralıkları ile iyi uyum içindedir.



Şekil 4.7. YX-128° LiNbO₃ üzerinde halkasal oyuklardan oluşan 2B PFK geçirim spektrumları.

$a=12.0\ \mu\text{m}$, $r_i=3.1\ \mu\text{m}$, $r_d=5.1\ \mu\text{m}$, $h=6.0\ \mu\text{m}$ ve $\theta=10.2^\circ$ olan kare ve üçgen örgü yapılarında PFK için geçirim spektrumlarında minimumun gözlemlendiği frekanslarda FEM simülasyon sonuçları incelenmiştir. Burada, dalga soldaki IDT tarafından gönderilip PFK tarafından yansıtılarak durağan YAD oluşturulmaktadır. Minimum geçirim kare PFK'da [10] ve [11] doğrultuları için sırasıyla 97.6 MHz ve 96.2 MHz frekanslarında oluşmaktadır. Minimum geçirim üçgen PFK'da [10] ve [11] doğrultuları için sırasıyla 113.4 MHz ve 97.4 MHz frekanslarında oluşmaktadır. Şekil 4.8'de tüm konfigürasyonlar için IDT-PFK

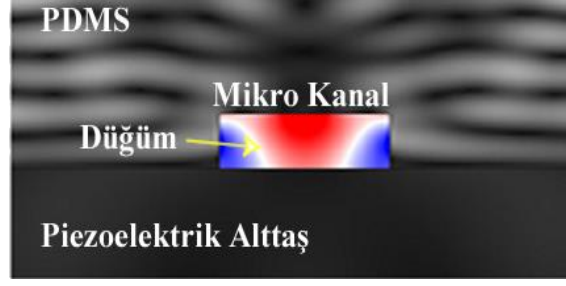
arasındaki bölge durağan YAD oluşumu açık olarak görülmektedir. Bu sonuçlar, Şekil 4.7'deki sonuçlarla iyi uyum içerisindedir.



Şekil 4.8. $a=12.0 \mu\text{m}$, $r_i= 3.1 \mu\text{m}$, $r_d= 5.1 \mu\text{m}$ ve $h= 6.0 \mu\text{m}$ olan PFK ile durağan YAD eldesinin FEM simülasyon sonucu.

4.6. PFK ile Nanoparçacık Ayırıştırma

Bu kısımda, $\lambda_0 \sim 40 \mu\text{m}$ dalga boyunda YAD için $f_0 = c_{YAD}/\lambda_0 \sim 100 \text{ MHz}$ frekansında çalışılmış ve ortalama IDT parmak genişlikleri $w = \lambda_0/4$ ve $N=11$ alınmıştır. IDT'ler arası mesafe $d_{IDT}=5\lambda$ ve alttaş yüksekliği $h_s=200 \mu\text{m}$ alınmıştır. IDT'ler $V_G=50 \text{ V}$ genlikli sinüs dalgası ile uyarılmıştır. Kanal genişliği ve yüksekliği $w_{ch}=35 \mu\text{m}$ ve $h_{ch}=25 \mu\text{m}$ alındığında mikro kanal içerisinde merkezde maksimum basınç ve buradan yaklaşık $w_{ch}/2$ uzaklıkta düğüm noktaları açıkça görülmektedir. PFK ile yapılan hesaplamalarda sağdaki IDT yerine PFK konularak mikro kanaldaki basınç dağılımı incelenmiş ve sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Zamana bağlı simülasyonlarda çapları 200 nm ve 500 nm arasında olan nanoparçacıkların [10] doğrultusunda kare örgü düzeninde PFK için $f_0=97.6 \text{ MHz}$ frekansında etkin olarak ayrıştırılabildikleri görülmüştür.

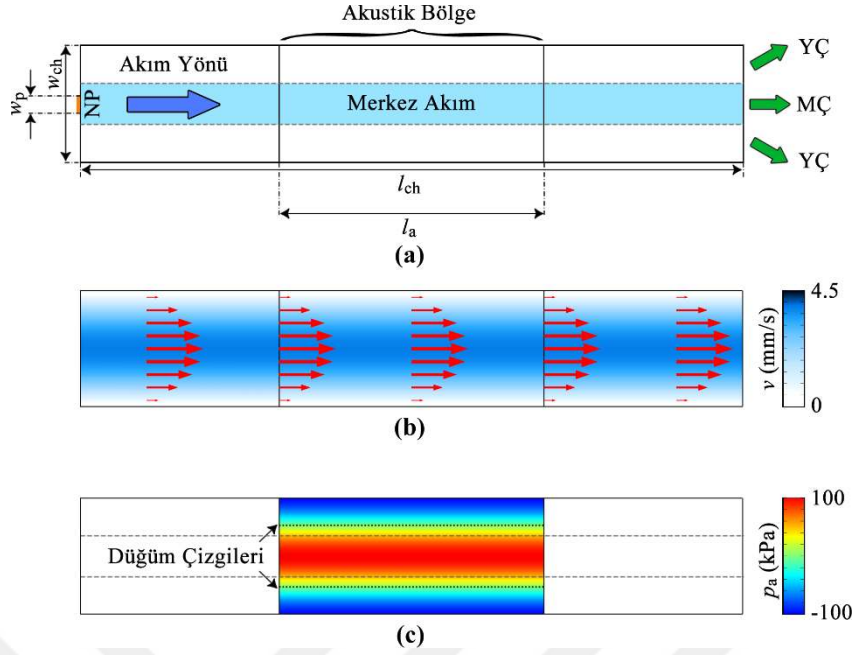


Şekil 4.9. f_0 frekansında oluşturulan durağan YAD'ın PDMS içerisindeki $h_{ch}=25 \mu m$ ve $w_{ch}=35 \mu m$ boyutlarında mikro kanalda oluşturduğu akustik basınç alanı.

Nanoparçacıkların boyutlarına göre ayrıştırılmalarını göstermek için yürütülen simülasyonlarda Şekil 4.10(a)'daki 2B hesaplama modeli kullanılmıştır. Mevcut hesaplama olanakları ile Şekil 4.9'daki sistemde 3B parçacık ayrıştırma hesapları yapmak mümkün olmadığından, mikro kanalın dikey orta kesitindeki akustik basınç dağılımı dikkate alınarak, mikro kanalı dikey olarak iki eşit parçaya bölen düzlem üzerindeki NP davranışları incelenmiştir. Şekil 4.10(a)'daki modelde kanalın parabolik Pouiselle akımının gözlemlendiği doğrusal yatay kısmı dikkate alınmıştır. Akustik bölge uzunluğu $l_a=2 \text{ mm}$ ve kanal uzunluğu $l_{ch}=5 \text{ mm}$ alınmıştır. Kanal genişliği Şekil 4.9'daki gibi $w_{ch}=35 \mu m$ alınmıştır. Mikro kanalda merkez akım ile yanal akım genişlikleri eşit ve $w_{ch}/3=12.3 \mu m$ olarak kabul edilmiştir.

Şekil 4.10(a)'daki mavi bölge hidrodinamik odaklama ile nanoparçacıkların odaklandığı merkez akım bölgesini göstermektedir. Burada, Şekil 4.10(a)'nın solundaki $w_p=5 \mu m$ genişliğindeki turuncu renkli düşey kesitten $t=0 \text{ s}$ anında toplam 10 adet r_p yarıçaplı NP normal dağılım sergileyecek biçimde serbest bırakılmıştır. NP yarıçapları $r_p=100 \text{ nm}$ ile $r_p=250 \text{ nm}$ arasında değiştirilerek akustik ışına kuvvetinin NP yörüngelerine etkileri incelenmiştir.

Mikro kanal merkezinde ilerleyen NP, akustik ışına (Eşitlik (2.8)) ve Stokes sürüklenme kuvvetlerinin (Eşitlik (2.10)) etkisi altında yanal doğrultuda saptırılmaktadır. Saptırılma oranı akustik bölgede frekans, basınç genliği (p_0), r_p , akım debisi (Q), parçacık yoğunluğu (ρ_p) ve sıkıştırılabilirliği (β) gibi özelliklere bağlıdır. Bu tez çalışmasında diğer parametreler sabit tutulup, NP ayrıştırma özellikleri r_p ve p_0 'a bağlı olarak incelenmiştir. Etkin ayrıştırma, belirli r_p ve p_0 değerleri için eşik yarıçaptan (r_e) büyük yarıçaplı tüm parçacıkların düğüm çizgilerine itilerek mikro kanalı yanal çıkışlardan (YÇ), daha küçük parçacıkların ise yeterince saptırılamayıp merkez çıkıştan (MÇ) terk etmesi olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.10. (a) PFK ile nanoparçacık ayırıştırma özelliklerinin incelenmesinde kullanılan 2B hesaplama modeli, (b) mikro kanal kesitinde akım hızı dağılımı ve (c) $p_0=100$ kPa genlik için akustik bölgede akustik basınç alanı dağılımı.

Şekil 4.10(a)'da mikro kanal sol kenarında akışkan girişi (inlet) tanımlanmıştır. Sağ kenar ise çıkış (outlet) olarak tanımlanmıştır. Çıkışta dinamik basıncın sıfır olduğu ($p_H=0$) serbest jet koşulu uygulanmıştır. Alt ve üst kenarlarda kaydırmayan sınır koşulu ($\mathbf{v}=0$, $\mathbf{v}$: akışkan hız vektörü) uygulanmıştır. Giriş debisi $Q=0.1 \mu\text{L}/\text{dakika}$ alınmıştır. Küresel nanoparçacıkların hücrelere benzer mekanik özelliklere sahip polistiren malzemeden yapılmış oldukları kabul edilmiş, yoğunlukları $\rho_p=1060 \text{ kg/m}^3$ ve sıkıştırılabilirlikleri $\beta=220 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ olarak alınmıştır. Akışkan olarak yoğunluğu $\rho_w=998 \text{ kg/m}^3$ ve ses hızı $c_w=1488 \text{ m/s}$ olan su alınmıştır. Şekil 4.10(b)'de FEM simülasyonu ile yukarıdaki Q debisi için hesaplanan akışkan hız dağılımı görülmektedir. Burada oklar, belirli noktarda hız vektörlerini ($\mathbf{v}$) göstermektedir. Şekilde $v(y) = v_m \left(1 - 4y^2 / w_{ch}^2\right)$ olacak biçimde Pouiselle akımının olduğu açıkça görülmektedir. Verilen debi için kanal merkezindeki maksimum hız değeri $v_m=4.47 \text{ mm/s}$ olarak hesaplanmıştır. Bu değer, hidrodinamik olarak odaklanmış nanoparçacıkların doğrusal ilerledikleri durumda mikro kanalı yaklaşık olarak 1 saniyede kat ettiklerini göstermektedir.

Şekil 4.10(c)'de mikro kanalın akustik bölge olarak adlandırılan kesiminde akustik basınç alanı ($p(x,y)=p_0 \cos(ky)$) dağılımı görülmektedir. Burada p_0 genliği 100 kPa

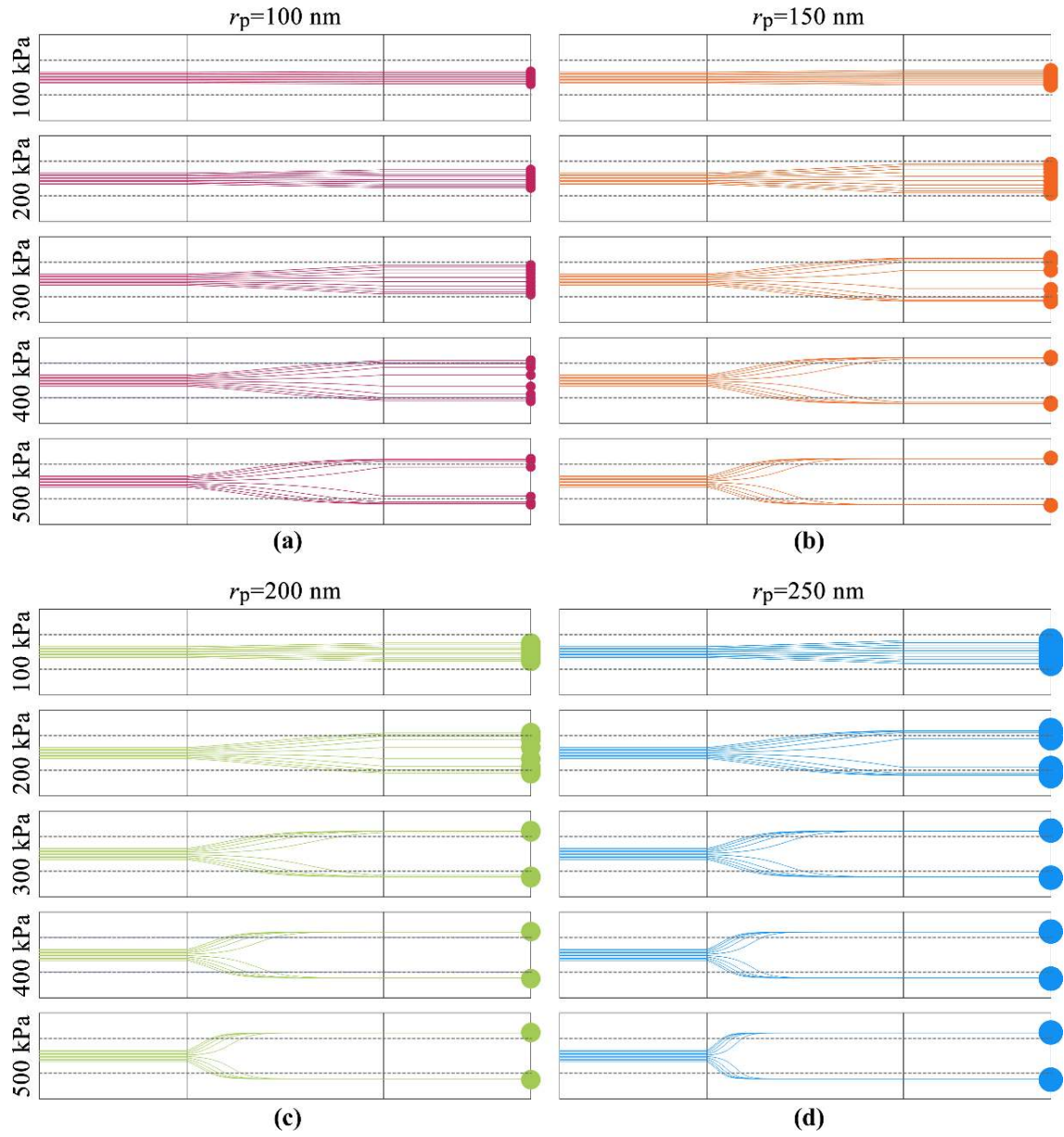
mertebesinde alınmıştır ve su içerisinde doğrusal olmayan akustik etkileri oluşturamayacak ve önemli ölçüde ısınmaya neden olmayacak kadar küçüktür. Kenar etkileri ihmal edilen akustik alan, Şekil 4.9'daki $h_{ch}/2$ yüksekliğindeki kesitten alınan değerler kullanılarak tanımlanmıştır. Şekilde $f_0=97.6$ MHz için düğüm çizgileri merkez akım bölgesinin dışında oluşmaktadır. Bu sayede, yeterince büyük nanoparçacıklar büyük çoğunlukla düğüm çizgilerine hizalanarak YÇ'lara yönlendirilmektedir.

Şekil 4.10(b)'deki akım koşullarında Şekil 4.10(c)'deki akustik alan etkisi altında 100-250 nm aralığında yarıçapa sahip nanoparçacıkların izledikleri yörüngeler Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Tüm NP, akustik bölge dışında yatay olarak ilerlemektedir. Merkez akım içerisinde akustik bölgeye gelen nanoparçacıkların akustik alan tarafından tarafından değişen oranlarda yanal olarak saptırıldığı görülmektedir.

Şekil 4.11(a)'daki $r_p=100$ nm olan NP, $p_0=100$ kPa iken çok az saptırıldığından, NP demeti genişliği çok az artmaktadır. 200 kPa ve 300 kPa genliklerde saptırılma oranı ve NP demet genişliği giderek artmaktadır. Öte yandan, $p_0 \geq 400$ kPa iken 100 nm yarıçaplı parçacıkların bir kısmı yanal çıkışlara yönlendirilmektedir, Şekil 4.11(a). Sol kenardan 10 adet NP girişi dikkate alındığında $r_p=100$ nm ve $p_0=500$ kPa için parçacıkların yaklaşık %80'inin YÇ'lara yönlendirildiği görülmektedir.

200 nm yarıçaplı parçacıklar akustik ışıma kuvveti etkisi altında küçük p_0 değerlerinde 100 nm yarıçaplı parçacıklara benzer davranış sergilemektedir, Şekil 4.11(b). Anca $p_0 \geq 400$ kPa için bu parçacıkların tamamı YÇ'lara yönlendirilmektedir. Bir başka deyişle, NP karışımında 100 nm ve 150 nm yarıçaplı parçacıklar 300-400 kPa arasındaki bir akustik genlik değerinde yüksek etkinlikle birbirlerinden ayırt edilebilir.

NP yarıçapı büyüdükçe düğüm çizgilerinde hizalanan NP oranı daha küçük p_0 değerlerinde %100'e ulaşmaktadır. Şekil 4.11(c)'deki 200 nm ve Şekil 4.11(d)'deki 250 nm yarıçaplı NP, $p_0 \geq 300$ kPa için düğüm çizgilerinde hizalanmaktadır. Bu bilgiler ışığında, 200-300 kPa aralığındaki uygun bir akustik genlik değeri için eşik yarıçapı $r_e=150$ nm olacak biçimde etkin ayırıştırma sağlanabileceği söylenebilir. Elde edilen sonuçlar, PFK kullanılarak oluşturulan durağan YAD alanından yararlanılarak nanoparçacıkların boyutlarına göre etkin biçimde ayırıştırılması için küçük boyutlu, paralel işleme yapabilen ve yüksek ayırma gücüne sahip YAD mikro akışkan sistemlerin geliştirilebileceğini göstermektedir. Örneğin, Şekil 4.8'deki PFK'nın iki yanına mikro kanal yerleştirilip her iki IDT ile uyarım sağlanırsa paralel parçacık ayırıştırma yapılabilir.



Şekil 4.11. Yarıçapı (a) 100 nm, (b) 150 nm, (c) 200 nm ve (d) 250 nm olan nanoparçacıkların 100-500 kPa arasındaki akustik basınç genlikleri için mikro kanaldaki yörüngeleri. Yatay kesikli çizgiler merkez akım bölgesi sınırlarını göstermektedir.

5. SONUÇ

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında kare ve üçgen örgü yapısında halkasal oyuklardan oluşan 2 boyutlu piezoelektrik fononik kristaller kullanılarak piezoelektrik yüzeyinde durağan yüzey akustik dalgalarının elde edilebileceği ve bu dalgalar vasıtasıyla bir mikro kanalda oluşturulan akustik basınç alanının etkisiyle nanoparçacıkların boyutlarına göre ayrıştırılabileceği gösterilmiştir. Sonlu Elemanlar Yöntemi simülasyonları ile elde edilen band yapıları, fononik kristal dispersiyon eğrilerinin ve yerleşmiş kip band aralıklarının doğru elde edilmesi için pratikte oyuklar açılırken oluşan 10.2° duvar eğiminin dikkate alınması gerektiğini göstermiştir. Uygun geometrik parametreler seçildiğinde hem kare hem de üçgen örgü yapısındaki fononik kristallerde 100 MHz civarında yerleşmiş kip band aralığı gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar literatür ile uyumludur.

Mikro akışkan parçacık ayrıştırma sistemi tasarımında değişken parmak aralıklı iç içe geçmiş taraklı transdüserler göz önünde bulundurulmuştur. Parmak genişlikleri ve aralıkları $5\ \mu\text{m}$ ile $10\ \mu\text{m}$ arasında $0.5\ \mu\text{m}$ adımlarla doğrusal olarak değiştirildiğinde, 100 MHz etrafında geniş bir frekans aralığında Rayleigh yüzey akustik dalgası oluşumu gösterilmiştir. Transdüserler karşılıklı olarak uyarıldığında ise durağan yüzey akustik dalgası oluşumu gözlenmiştir.

İki transdüser arasında fononik kristaller yerleştirildiğinde fononik kristal geçirim spektrumlarında yerleşmiş kip band aralığı frekansları ile uyumlu biçimde derin soğurum bandları gözlenmiştir. Ayrıca, transdüser ile fononik kristal arasında durağan yüzey akustik dalgası oluşumu gösterilmiştir. Durağan dalgalar için düğüm noktaları arası mesafe dalga boyunun yarısı olacak biçimde $20\ \mu\text{m}$ civarındadır.

Transdüser-transdüser ve transdüser-fononik kristal içeren sistemlerde PDMS mikro kanal içerisindeki sıvıda durağan yüzey akustik dalgası ile uyumlu biçimde basınç alanı oluşumu belirlenmiştir. Basınç alanında yanal doğrultuda kın akısı sınırlarına gelecek biçimde düğüm noktaları elde edilmiştir. Mikro kanal içerisinde ilerleyen 100 nm mertebesinde boyutlara sahip katı parçacıkların akustik alan düğüm noktalarına, dolayısıyla kın akısına doğru akustik ışıma kuvveti ve Stokes sürüklenme kuvvetinin bileşke etkisiyle sürüklendikleri gözlenmiştir. Sürüklenme miktarları parçacıkların boyutlarına bağlıdır. Büyük parçacıklar kın akısına doğru daha büyük akustik ışıma

kuvvetleri ile itildiğinden, mikro akışkan sistemi yanal çıkışlardan terk etmiştir. Buna karşılık, küçük parçacıklar mikro akışkan sistemi merkez çıkıştan terk etmiştir. Ayırıştırma için eşik yarıçapı, yüzey akustik dalgasının dalga boyu, uyarım genliği, mikro kanalda akış hızı, parçacıkların yoğunluğu ve sıkıştırılabilirlikleri gibi parametrelere bağlıdır. Bu tez çalışmasında nümerik hesaplamalarla önerilen yaklaşım, esnek, çok yönlü ve paralel yüzey akustik dalgası mikro akışkan sistemlerin geliştirilmesi için kullanılabilir.



KAYNAKLAR

- Achaoui, Y., Khelif, A., Benchabane, S., Robert, L. ve Laude, V., 2011. Experimental observation of locally-resonant and Bragg band gaps for surface guided waves in a phononic crystal of pillars. *Physical Review B*, 83, 104201.
- Ai, Y., Sanders, C. K. ve Marrone, B. L., 2013. Separation of Escherichia coli bacteria from peripheral blood mononuclear cells using standing surface acoustic waves. *Analytical Chemistry*, 85, 9126-9134.
- Alnabulsi, S. 2012. *Introduction to Elastic Wave Equation*. http://people.ucalgary.ca/~maelena/AMAT621/AlNabulsi_lect5.pdf. (Erişim Tarihi: 22.09.2020)
- An, T., Qin, S., Xu, Y., Tang, Y., Huang, Y., Situ, B., Inal, J. M. ve Zheng, L., 2015. Exosomes serve as tumour markers for personalized diagnostics owing to their important role in cancer metastasis. *Journal of Extracellular Vesicles*, 4, 27522.
- Ash, B., Worsfold, S., Vukusic, P. ve Nash, G., 2017. A highly attenuating and frequency tailorable annular hole phononic crystal for surface acoustic waves. *Nature Communications*, 8, 1-7.
- Ash, B., Worsfold, S., Vukusic, P. ve Nash, G., 2017. A highly attenuating and frequency tailorable annular hole phononic crystal for surface acoustic waves. *Nature Communications*, 8, 174.
- Benchabane, S., Khelif, A., Rauch, J.-Y., Robert, L. ve Laude, V. 2006. Evidence for complete surface wave band gap in a piezoelectric phononic crystal. *Physical Review E*, 73, 065601.
- Berenger, J.-P., 1994. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of Computational Physics*, 114, 185-200.
- Biocompare. 2020. *NovoCyte Quanteon Flow Cytometer from Agilent Technologies*. <https://www.biocompare.com/12104-Equipment/12629038-Novocyte-Quanteon-Flow-Cytometer/>. (Erişim Tarihi: 22.09.2020)
- Bourquin, Y., Wilson, R., Zhang, Y., Reboud, J. ve Cooper, J. M. J. A. m., 2011. Phononic crystals for shaping fluids. *Advanced Materials*, 23, 1458-1462.
- British Geological Survey. 2020. *Seismic waves*. <https://www.bgs.ac.uk/discoveringGeology/hazards/earthquakes/seismicWaves.html#:~:text=Types%20of%20wave,secondary%20since%20they%20are%20slower>. (Erişim Tarihi: 22.09.2020)
- Bruus, H., 2012. Acoustofluidics 7: The acoustic radiation force on small particles. *Lab on a Chip*, 12, 1014-1021.

- Campbell, C. 1998. *Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communications, Four-Volume Set*, Elsevier Science, San Diego, USA, 4-5.
- Choi, H., Jeon, C. S., Hwang, I., Ko, J., Lee, S., Choo, J., Boo, J.-H., Kim, H. C. ve Chung, T. D., 2014. A flow cytometry-based submicron-sized bacterial detection system using a movable virtual wall. *Lab on a Chip*, 14, 2327-2333.
- Cicek, A., Kaya, O. A. ve Ulug, B., 2011. Wide-band all-angle acoustic self-collimation by rectangular sonic crystals with elliptical bases. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44, 205104.
- Ding, X., Li, P., Lin, S.-C. S., Stratton, Z. S., Nama, N., Guo, F., Slotcavage, D., Mao, X., Shi, J. ve Costanzo, F., 2013. Surface acoustic wave microfluidics. *Lab on a Chip*, 13, 3626-3649.
- Ding, X., Lin, S.-C. S., Kiraly, B., Yue, H., Li, S., Chiang, I.-K., Shi, J., Benkovic, S. J. ve Huang, T. J., 2012. On-chip manipulation of single microparticles, cells, and organisms using surface acoustic waves. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109, 11105-11109.
- Dittrich, P. S. ve Manz, A., 2006. Lab-on-a-chip: microfluidics in drug discovery. *Nature Reviews Drug Discovery*, 5, 210-218.
- Franke, T., Abate, A. R., Weitz, D. A. ve Wixforth, A., 2009. Surface acoustic wave (SAW) directed droplet flow in microfluidics for PDMS devices. *Lab on a Chip*, 9, 2625-2627.
- Franke, T., Braunmüller, S., Schmid, L., Wixforth, A. ve Weitz, D., 2010. Surface acoustic wave actuated cell sorting (SAWACS). *Lab on a Chip*, 10, 789-794.
- Garcia-Cordero, J. L., Barrett, L. M., O'Kennedy, R. ve Ricco, A. J., 2010. Microfluidic sedimentation cytometer for milk quality and bovine mastitis monitoring. *Journal of Biomedical Devices*, 12, 1051-1059.
- Gor'kov, L. P. 1962. On the forces acting on a small particle in an acoustical field in an ideal fluid. *Sov. Phys. Dokl.*, 140, 88-91.
- Gravesen, P., Branebjerg, J. ve Jensen, O. S., 1993. Microfluidics-a review. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 3, 168-182.
- IDEX Health & Science, L. 2020. *Semrock Filters for Flow Cytometry*. <https://www.semrock.com/flow-cytometry.aspx>. (Erişim Tarihi: 22.09.2020).
- Kanwar, S. S., Dunlay, C. J., Simeone, D. M. ve Nagrath, S., 2014. Microfluidic device (ExoChip) for on-chip isolation, quantification and characterization of circulating exosomes. *Lab on a Chip*, 14, 1891-1900.
- Karlsen, J. T. ve Bruus, H. 2015. Forces acting on a small particle in an acoustical field in a thermoviscous fluid. *Physical Review E*, 92, 043010.
- Kim, P., Kwon, K., Park, M., Lee, S., Kim, S. ve Suh, K., 2008. Soft lithography for microfluidics: a review. *Biochip Journal*, 2, 1-11.

- King, L. V., 1934. On the acoustic radiation pressure on spheres. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A-Mathematical Physical Sciences*, 147, 212-240.
- Kittel, C. 2007. *Introduction to Solid State Physics*, 8. Baskı, John Wiley & Sons, Inc, New Jersey, USA, 173.
- Kodzius, R., Schulze, F., Gao, X. ve Schneider, M. R., 2017. Organ-on-chip technology: Current state and future developments. *Genes*, 8, 266.
- Länge, K., Blaess, G., Voigt, A., Götzen, R. ve Rapp, M., 2006. Integration of a surface acoustic wave biosensor in a microfluidic polymer chip. *Biosensors and Bioelectronics*, 22, 227-232.
- Lee, K., Shao, H., Weissleder, R. ve Lee, H., 2015. Acoustic purification of extracellular microvesicles. *ACS Nano*, 9, 2321-2327.
- Li, P., Mao, Z., Peng, Z., Zhou, L., Chen, Y., Huang, P.-H., Truica, C. I., Drabick, J. J., El-Deiry, W. S. ve Dao, M., 2015. Acoustic separation of circulating tumor cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112, 4970-4975.
- Liga, A., Vliegenthart, A., Oosthuyzen, W., Dear, J. ve Kersaudy-Kerhoas, M. 2015. Exosome isolation: a microfluidic road-map. *Lab on a Chip*, 15, 2388-2394.
- Lin, J., Li, J., Huang, B., Liu, J., Chen, X., Chen, X.-M., Xu, Y.-M., Huang, L.-F. ve Wang, X.-Z. 2015. Exosomes: Novel Biomarkers for Clinical Diagnosis. *The Scientific World Journal*, 2015, 657086.
- Logan, D. L. 2007. *First Course in the Finite Element Method*, Thomson, Canada 1-24.
- Maldovan, M. 2013. Sound and heat revolutions in phononics. *Nature*, 503, 209-217.
- Mao, Z., Xie, Y., Guo, F., Ren, L., Huang, P. H., Chen, Y., Rufo, J., Costanzo, F. ve Huang, T. J. 2016. Experimental and numerical studies on standing surface acoustic wave microfluidics. *Lab on a Chip*, 16, 515-524.
- McKinnon, K. M., 2018. Flow cytometry: An overview. *Current Protocols in Immunology*, 120, 5.1.1-5.1.11.
- Morgan, D. 2010. *Surface Acoustic Wave Filters: With Applications to Electronic Communications and Signal Processing*, Elsevier Science, Oxford, UK, 1.
- Nama, N., Barnkob, R., Mao, Z., Kähler, C. J., Costanzo, F. ve Huang. 2015. Numerical study of acoustophoretic motion of particles in a PDMS microchannel driven by surface acoustic waves. *Lab on a Chip*, 15, 2700-2709.
- Nilsson, J., Evander, M., Hammarström, B. ve Laurell, T., 2009. Review of cell and particle trapping in microfluidic systems. *Analytica Chimica Acta*, 649, 141-157.
- Plaks, V., Koopman, C. D. ve Werb, Z., 2013. Circulating tumor cells. *Science*, 341, 1186-1188.

- Pourabolghasem, R., Mohammadi, S., Eftekhari, A. A., Khelif, A. ve Adibi, A. J. 2014. Experimental evidence of high-frequency complete elastic bandgap in pillar-based phononic slabs. *Applied Physics Letters*, 105, 231908.
- Primiceri, E., Chiriaco, M. S., Rinaldi, R. ve Maruccio, G., 2013. Cell chips as new tools for cell biology—results, perspectives and opportunities. *Lab on a Chip*, 13, 3789-3802.
- Rayleigh, L. J. T. L., Edinburgh, Magazine, D. P. ve Science, J. o., 1902. XXXIV. on the pressure of vibrations. 3, 338-346.
- Reboud, J., Wilson, R., Zhang, Y., Ismail, M. H., Bourquin, Y. ve Cooper, J. M. 2012. Nebulisation on a disposable array structured with phononic lattices. *Lab on a Chip*, 12, 1268-1273.
- Serway, R. A. ve Jewett, J. W. 2013. *Physics for Scientists and Engineers*, 9. Baskı, Cengage Learning, Boston, USA, 483-522.
- Shi, J., Huang, H., Stratton, Z., Huang, Y. ve Huang, T. J., 2009. Continuous particle separation in a microfluidic channel via standing surface acoustic waves (SSAW). *Lab on a Chip*, 9, 3354-3359.
- Shi, J., Mao, X., Ahmed, D., Colletti, A. ve Huang, T. J. 2008. Focusing microparticles in a microfluidic channel with standing surface acoustic waves (SSAW). *Lab on a Chip*, 8, 221-223.
- Shi, J., Yazdi, S., Lin, S.-C. S., Ding, X., Chiang, I.-K., Sharp, K. ve Huang, T. J., 2011. Three-dimensional continuous particle focusing in a microfluidic channel via standing surface acoustic waves (SSAW). *Lab on a Chip*, 11, 2319-2324.
- Song, H. 2018. *Engineering Fluid Mechanics*, 1. Baskı, Springer, Singapur, 110.
- Stokes, G., 1851. On the effect of internal friction of fluids on the motion of pendulums. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 9, 8-106.
- Tabeling, P. 2005. *Introduction to Microfluidics*, 1. Baskı, Oxford University Press, Oxford, UK, 1-24.
- Torkamani, S., Roy, S., Barkey, M. E., Sazonov, E., Burkett, S. ve Kotru, S., 2014. A novel damage index for damage identification using guided waves with application in laminated composites. *Smart Materials and Structures*, 23, 095015.
- UPSeis. 2006. *What Is Seismology?*, <http://www.geo.mtu.edu/UPSeis/waves.html>. (Erişim Tarihi: 22.09.2020)
- URL-1. 2020. *Lab on Chip PCR*. <https://www.gene-quantification.de/lab-on-chip.html>. (Erişim Tarihi: 22.09.2020)
- URL-2. 2020. *Rayleigh Wave*. https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_wave. (Erişim Tarihi: 22.09.2020)

- URL-3. 2020. *Piezoelectricity*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity>. (Erişim Tarihi: 22.09.2020)
- Whitesides, G. M., 2006. The origins and the future of microfluidics. *Nature*, 442, 368-373.
- Williams, S. C., 2013. Circulating tumor cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, 4861-4861.
- Wilson, R., Reboud, J., Bourquin, Y., Neale, S. L., Zhang, Y. ve Cooper, J. M., 2011. Phononic crystal structures for acoustically driven microfluidic manipulations. *Lab on a Chip*, 11, 323-328.
- Wixforth, A., 2003. Acoustically driven planar microfluidics. *Superlattices and Microstructures*, 33, 389-396.
- Wong, K. K. 2002. *Properties of Lithium Niobate*, INSPEC/Institution of Electrical Engineers, London, UK, 110-111.
- Wyss Institute. 2018. *Human Organs-on-Chips*. <https://wyss.harvard.edu/technology/human-organs-on-chips/>. (Erişim Tarihi: 22.09.2020)
- Yamada, M. ve Seki, M., 2005. Hydrodynamic filtration for on-chip particle concentration and classification utilizing microfluidics. *Lab on a Chip*, 5, 1233-1239.
- Yang, R.-J., Fu, L.-M. ve Hou, H.-H., 2018. Review and perspectives on microfluidic flow cytometers. *Sensors & Actuators B: Chemical*, 266, 26-45.
- Yankin, S., Talbi, A., Du, Y., Gerbedoen, J.-C., Preobrazhensky, V., Pernod, P. ve Bou Matar, O., 2014. Finite element analysis and experimental study of surface acoustic wave propagation through two-dimensional pillar-based surface phononic crystal. *Journal of Applied Physics*, 115, 244508.
- Yee, K., 1966. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 14, 302-307.
- Yeo, L. Y. ve Friend, J. R., 2009. Ultrafast microfluidics using surface acoustic waves. *Biomicrofluidics*, 3, 012002.
- Young, D. F., Munson, B. R., Okiishi, T. H. ve Huebsch, W. W. 2010. *A Brief Introduction to Fluid Mechanics*, 8. Baskı, John Wiley & Sons, New York, USA, 18.
- Young, E. W. ve Beebe, D. J., 2010. Fundamentals of microfluidic cell culture in controlled microenvironments. *Journal of Chemical Society Reviews*, 39, 1036-1048.
- Zhang, X., Yuan, X., Shi, H., Wu, L., Qian, H. ve Xu, W., 2015. Exosomes in cancer: small particle, big player. *Journal of Hematology and Oncology*, 8, 83.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Ali ERTUĞRUL

Doğum Yeri ve Yılı : BURDUR,1995



Eğitim Durumu

Yıl

Lise	: Cumhuriyet Anadolu Lisesi	2009-2013
Lisans	:BurdurMehmet Akif Ersoy Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fen Bilgisi Öğretmenliği	2013-2017
Yüksek Lisans	:BurdurMehmet Akif Ersoy Üniversitesi Nanobilim ve Nanoteknoloji	2017-Halen

Çalıştığı Kurum / Kurumlar

Yıl

1-	Emniyet Genel Müdürlüğü/ Polis Memuru	2019-Halen
----	---------------------------------------	------------

Yayınları (SCI ve diğer makaleler)

1-