T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MİKROAKIŞKAN SİSTEMLERDE PİEZOELEKTRİK FONONİK KRİSTAL KULLANARAK MİKROPARÇACIK ÖRÜNTÜLEME

Nurseli Seda GENÇ

Fizik Anabilim Dalı

Katıhal Fiziği Programı

DANIŞMAN
Doç. Dr. Furkan KURUOĞLU

Temmuz, 2025

İSTANBUL

Bu çalışma, 17/07/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı, Katıhal Fiziği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Doç. Dr. Furkan KURUOĞLU (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Ayşe Erol
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Ahmet ÇİÇEK
Burdur Mehmet Akif Ersoy
Üniversitesi
Fen-Edebiyat Fakültesi

20.04.2016 tarihli resmi gazetede yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi′nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü′nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin FYL-2024-41154 numaralı projesiyle ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 120F337 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Lisans eğitimimin son sınıfından itibaren akademik yolculuğumda bana rehberlik eden, yüksek lisans sürecim boyunca da bilgisiyle ilham veren, karşılaştığım her sorunun bir öğrenme fırsatına dönüşmesini sağlayan ve her zaman yanımda olduğunu hissettiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Furkan KURUOĞLU'na en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Sahip olduğu engin akademik birikimi ve tecrübesini her zaman içtenlikle paylaşarak gelişimime değerli katkılar sunan; yalnızca bilgisiyle değil, aynı zamanda ilham veren duruşu, yol gösterici yaklaşımı ve aydınlatıcı rehberliğiyle yolumu her daim aydınlatan çok kıymetli hocam Prof. Dr. Ayşe EROL'a gönülden teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmam süresince yürütülen deneysel süreçlerde bilgi, deneyim ve destekleriyle katkı sunan Prof. Dr. Ahmet ÇİÇEK, Prof. Dr. Ferhat NUTKU, Prof. Dr. Ömer Dönmez, Doç. Dr. Fahrettin SARCAN, Dr. Öğr. Üyesi Selman MUTLU, Dr. Öğr. Üyesi Mustafa AYDIN ve Araş. Gör. Göksenin KALYON'a teşekkür ederim.

Her anımda yanımda olduklarını hissettiren değerli çalışma arkadaşlarım Araş. Gör. Elanur HUT, Araş. Gör. Selen Nur YILMAZ ve Ümit DOĞAN'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca yanımda olan, sevgileri ve fedakârlıklarıyla bana güç veren kıymetli annem ve babama, her zaman desteğini hissettiren sevgili kardeşime en içten teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz, 2025 Nurseli Seda GENÇ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**

İÇİNDEKİLER ..... **vi**

ŞEKİL LİSTESİ ..... **x**

TABLO LİSTESİ ..... **xi**

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xiv**

ÖZET ..... **xvi**

SUMMARY ..... **xviii**

1. GİRİŞ **1**

2. GENEL KISIMLAR **3**

2.1. YÜZEY AKUSTİK DALGASI 3

2.1.1. Akustoakışkan Sistemler 4

2.2. FONONİK KRİSTALLER VE PİEZOELEKTRİK FONONİK KRİSTALLER 8

2.3. FONONİK KRİSTALLERİN AKUSTOAKIŞKAN SİSTEMLERDE UYGULAMALARI 12

3. MALZEME VE YÖNTEM **14**

3.1. MALZEME 14

3.1.1. Lityum Niyobat 14

3.2. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ SİMÜLASYONU 16

3.3. AYGIT FABRİKASYONU 19

3.3.1. IDT Fabrikasyonu 20

3.3.1.1. Örneklerin Temizlenmesi 20

3.3.1.2. Fotolitografi 20

3.3.1.3. Pozlama 22

3.3.1.4. Banyolama (Develop Etme) 22

3.3.1.5. Metalizasyon 22

3.3.1.6. Lift-Off 22

3.3.2. Pizeoelektrik Fononik Kristal Fabrikasyonu 23

3.3.3. PDMS Mikrokanal Fabrikasyonu 23
3.4. ELEKTRİKSEL ÖLÇÜMLER 26
3.4.1. S-parametreleri Ölçümü 26
3.4.2. Miroparçacık Örüntüleme Sistemi 27
4. BULGULAR 28
4.1. PİEZOELEKTRİK FONONİK KRİSTALLERİN BANT YAPISI HESABI . 28
4.2. KARE ÖRGÜ İÇİN FEM İLE GEÇİRİM SPEKTRUMLARININ ELDE EDİLMESİ 34
4.3. PFK İLE DURAĞAN YAD ELDE EDİLMESİ 37
4.4. MİKROAKIŞKAN AYGITLARIN SAYISAL TASARIMI 38
4.4.1. Mikrokanal İçerisinde Düğüm Noktalarının Simülasyon ile Elde Edilmesi 38
4.4.2. Mikrokanal İçerisinde Mikroparçacıkların Örüntülenmesinin Simülasyon ile İncelenmesi 39
4.5. AKUSTOAKIŞKAN AYGIT KARAKETERİZASYONU 43
4.5.1. IDT Karakterizasyonu 43
4.5.2. Piezoelektrik Fononik Kristal Üretiminin Karakterize Edilmesi 48
4.5.3. Mikrokanal Karakterizasyonu 53
4.5.3.1. PDMS Mikrokanalın IDT-PFK Dizisiyle Bağlanma Dayanımı 56
4.5.4. Piezoelektrik Fononik Kristal - IDT İçeren Örneklerin Elektirksel Geçirim Ölçümleri 56
4.5.5. Pizeolektrik Fononik Kristaller ile Durağan Yüzey Akustik Dalga Görselleştirilmesi 59
4.5.6. Mikrokanal İçerisinde Mikroparçacık Örüntülünmesi Analizi 60
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 65
KAYNAKLAR 67
ÖZGEÇMİŞ 72

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Farklı YAD türleri; a) Love dalgası, b) Lamb dalgası, c) Rayleigh dalgası [2]. 3

Şekil 2.2: a) IDT çifti ve PDMS kanaldan oluşan akustoakışkan sistem, b) IDT'ye potansiyel fark uygulanması ile piezoelektrik alttaş yüzeyinde YAD oluşturulması [8]..... 5

Şekil 2.3: a) Sabit aralıklı IDT yapısı, b) Değişken aralıklı (chirped) IDT yapısı[22]..... 6

Şekil 2.4: YAD mikroakışkan aygıtlara örnekler: a) Duran YAD tekniği kullanılarak kan hücrelerinden bakterilerin ayrılması [8], b) Eğik açılı IDT kullanılarak kan hücrelerinden bakterilerin ayrılması [8], c) Çoklu IDT çifti kullanımı ile plazma örneklerden eksozom ayrıştırma [4], d) Çoklu IDT çifti kullanımı ile iki boyutlu (2B) parçacık örüntülenmesi [23]. 7

Şekil 2.5: a) Farklı boyutlarda FK yapıları [26], b) kHz frekansındaki ses dalgalarını engellemek amacıyla, 2.9 cm periyotlu iki boyutlu bir FK yapısı [26] c) FK'ye ait bant yapısı [26] d) Yerel rezonansa dayalı fononik kristalin temel yapı birimini gösteren kesit ve ilgili yapının şematik gösterimi [29]. 9

Şekil 2.6: PFK üretiminde kullanılan farklı üretim yöntemleri: a) Elektrokaplama yöntemi [30], b) 3 boyutlu yazdırma yöntemi [31], c) Odaklanmış iyon demeti litografisi yöntemi [32]. 10

Şekil 2.7: a) Derin reaktif iyon aşındırma (Deep Reactive Ion Etching, (DRIE)) yoluyla elde edilmiş kare örgüde delikli bir Si alttaş [33], b) Altıgen dizilimli fononik kristal yapısı ve yapının iki ucuna yerleştirilmiş giriş-çıkış dönüştürücüleri [34]. c1 ve c2)Reaktif iyon aşındırma kullanılarak elde edilmiş kare örgüye sahip delikli bir $LiNbO_3$ yonga ve yapının elektriksel karakterizasyonu için kullanılan deney düzeneğinin şeması [35]. d) AlN üzerine entegre edilen iki boyutlu fononik kristal yapısı [36], e) Katı-katı kare fononik kristal örgü [37]. 11

Şekil 2.8: a) Halkasal oyuklardan oluşan 2B FK bant yapısı b) Halkasal oyuğa ait birim hücre [32]. 12

Şekil 2.9: a), b) ve c), PFK içeren YAD mikroakışkan sistem örnekleri [12-14] 13

Şekil 3.1: a) $LiNbO_3$ kristal yapısını gösteren şematik çizim, b) Hekzagonal birim hücrenin gösterimi [40]..... 15

Şekil 3.2: 1B, 2B ve 3B elemanlar için tanımlanabilecek geometriler ve düğüm noktaları..... 17

Şekil 3.3: a) Birim hücre içerisinde PFK modellemesinin kesit görünümü ve kullanılan geometrik parametreler, b) Kare örgü düzeninde PFK birim hücresi modelinin 3-boyutlu gösterimi ve 1.Brillouin bölgesindeki dalga vektörü yönü. 19

Şekil 3.4: Fotolitografi adımlarının şematik gösterimi. 1) Uygun boyutlarda alttaşın kesilmesi, 2) Döndürerek kaplama yöntemi ile fotodirenç kaplanması, 3) Çözücünün uzaklaştırılması için uygulanan ısıl işlem, 4) Maske kullanımı ve UV ışık yardımı ile desenin fotodirenç üzerine aktarılması, 5) Banyolama işlemi, 6) Litografi işlemi sonucu desen elde edilmesi ve incelenmesi, 7) Fiziksel buharlaştırma yöntemi ile metal kaplanması, 8) Lift-off işlemi 9) Lift-off sonrasında elde edilen aygıt. 21

Şekil 3.5: Mikrokanal üretimi için kullanılan SU-8 kalıp 25

Şekil 3.6: Miroparçacık örüntüleme sistemi 27

Şekil 4.1: Kare örgü dizilimine sahip fononik kristale ait a) dispersiyon eğrileri, b) dispersiyon eğrisine karşılık gelen yer değiştirme davranışları, c) modlara karşılık gelen frekans değerleri 29

Şekil 4.2: a) Kare örgü dizilimine sahip birim PFK hücresinin dispersiyon eğrisinin r_d ile değişimi ve b) Dispersiyon eğrisi üzerinden elde edilen bant aralığı maksimum-minimum değerlerinin r_d ile değişimi. 30

Şekil 4.3: a) Kare örgü dizilimine sahip birim PFK hücresinin dispersiyon eğrisinin r_i değişimine göre gösterdiği davranış ve b) Dispersiyon eğrisi üzerinden elde edilen bant aralığı maksimum-minimumlarının r_i ile değişimi. 31

Şekil 4.4: a) Kare örgü dizilimine sahip birim PFK hücresinin dispersiyon eğrisinin h_o'ya bağlı değişimi ve b) Dispersiyon eğrisi üzerinden elde edilen bant aralığı maksimum-minimumlarının h_o ile değişimi. 32

Şekil 4.5: a) Kare örgü dizilimine sahip birim PFK hücresinin dispersiyon eğrisinin S piezoelektrik fononik kristal yüksekliğine bağlı değişimi ve b) Dispersiyon eğrisi üzerinden elde edilen bant aralığı maksimum-minimumlarının S ile değişimi. 33

Şekil 4.6: Kare örgü dizilimine sahip birim PFK hücresinin r_d, r_i ve h_o değerlerinin sabit tutulup h değerinin değiştirlmesiyle elde edilen bant aralığı maksimum-minimumlarının değişimi. 34

Şekil 4.7: Geçirim spektrumu simülasyonlarında kullanılan 3-boyutlu model ve model içerisinde yer alan PFK dizisinin yakınlaştırılmış görüntüsü. 35

Şekil 4.8: Geçirim spektrumlarının farklı sütun yüksekliğine göre değişimi..... 36

Şekil 4.9: Farklı halka şekilli PFK sütun yükseklikleri için hesaplanan elektriksel potansiyel dağılımının kesit görünümü, ilgili S_{21} ana pik frekanslarında (sırasıyla 99.4 MHz, 97.2 MHz, 97.8 MHz ve 98.4 MHz) hesaplanmıştır. b) Farklı sütun yükseklikleri için alltaş yüzeyindeki elektrik potansiyeli dağılımı ve probe IDT üzerindeki hat profilindeki voltaj dağılımı..... 36

Şekil 4.10: IDT çifti arasında yer alan piezoelektrik PFK dizi sayısına bağlı YAD sönümlemesinin değişimi. 37

Şekil 4.11: Durağan YAD oluşumunun farklı frekanslar için gösterimi..... 37

Şekil 4.12: Mikrokanal içerisinde basınç düğüm noktalarının simülasyon ile elde edilmesinde kullanılan 3-boyutlu model. 38

Şekil 4.13: Mikrokanal içerisinde basınç düğüm noktalarının ve piezoelektrik malzeme yüzeyinde durağan YAD oluşumunun gösterimi. 39

Şekil 4.14: 1 μm-5 μm arasında boyutlara sahip polistiren mikroparçacıkların su içeren mikrokanalda 1 boyutlu akustik örüntülenmesinin incelenmesi için göz önünde bulundurulan 2B hesaplama modeli..... 40

Şekil 4.15: Kın sıvısı kullanılmayan durumda farklı boyutlardaki mikroparçacıkların akustik alan etkisiyle örüntülenmesi: a) 1 μm çapındaki mikroparçacıkların örüntülenmesi; alttaki iç şekil, mikroakışkan kanal içerisinde tanımlanan akustik basınç dağılımını göstermektedir. b) 5 μm parçacık çapındaki mikroparçacıkların örüntülenmesi; üstteki iç şekil, ilgili kanal içerisindeki akustik basınç dağılımını göstermektedir. 41

Şekil 4.16: Kın sıvısı kullanılmadığı durumda 1 μm-5 μm çaplarındaki mikroparçacıkların mikrokanal içerisindeki enine konuma göre dağılımları. Mavi sütunlar akustik alan öncesindeki ve kırmızı sütunlar akustik alan sonrasındaki mikroparçacık dağılımlarını göstermektedir..... 42

Şekil 4.17: Kın sıvısı kullanılarak mikroparçacıkların kanal merkezine odaklanması durumunda a) 1 μm, b) 5 μm çapındaki parçacıklar için akustik alan ile mikroparçacıkların örüntülenmesi..... 42

Şekil 4.18: Kın sıvısı kullanılarak 1 μm-5 μm çapındaki mikroparçacıkların konuma göre dağılımları. Mavi sütunlar akustik alan öncesindeki ve kırmızı sütunlar akustik alan sonrasındaki mikroparçacık dağılımlarını göstermektedir..... 43

Şekil 4.19: a) EBL ile elde edilen karşılıklı IDT çiftine ait optik mikroskop görüntüsü ve b) IDT çiftinin parmak genişliğinin sahip olduğu değerlerin parmak sayısına bağlı olarak değişimi. 45

Şekil 4.20: IDT üretiminde kullanılan Cr/Au metal tabakanın kesit SEM görüntüleri..... 46

Şekil 4.21: Karşılıklı IDT çiftine ait geçirim spektrumları..... 46

Şekil 4.22: Fotolitografi sürecinde kullanılan Cr maske tasarımı. 47

Şekil 4.23: Değişken parmak aralıklı IDT çiftine ait a) optik mikroskop görüntüsü ve b) geçirim spektrumu ölçümü. 48

Şekil 4.24: Bekleme süresi ve aşındırma doğrultusunun değişimi sonucu elde edilen PFK birim yapıları..... 49

Şekil 4.25: a) r_i ve h_o sabit iken d_o değerinin değiştirildiği PFK dizisi. Sarı ve yeşil renkli daireler iç ve dış dairesel kesitleri göstermektedir. b) Aşındırma işlemi için tasarım olarak verilen boyutlar ve aşındırma sonrası ölçülen değerlerin değişimi..... 50

Şekil 4.26: d_o ve h_o sabit iken d_i değerini değiştirildiği PFK dizisi. Kırmızı ve yeşil renkli daireler belirli saçıcılar için iç ve dış dairesel kesitleri göstermektedir. 51

Şekil 4.27: d_o ve d_i'nin sabit olduğu durumda sütun yüksekliğinin değiştirildiği PFK dizisi.... 51

Şekil 4.28: Orantısal S katsayısına bağlı olarak geometrik parametreleri değiştirilerek elde edilen PFK'lara ait SEM görüntüsü..... 52

Şekil 4.29: FIB yöntemi ile üretilen birim PFK'ların kesit SEM görüntüsü. 53

Şekil 4.30: a) 25 µm, b) 35 µm ve c) 50 µm hedef kalınlık için üretilen SU-8 kalıpların kesit optik mikroskop görüntüsü. 54

Şekil 4.31: a) 25 µm, b) 35 µm ve c) 50 µm hedef kalınlık için elde edilen PDMS mikrokanalların kesit optik mikroskop görüntüsü. 55

Şekil 4.32: SU-8 ile PDMS mikrokanal kalınlıklarının hedeflenen kalınlığa bağlı olarak değişimi. 55

Şekil 4.33: a) $LiNbO_3$ ve PDMS yüzeyleri arasındaki bağlama işlemi sonrasında elde edilen gerilme-çekme kuvveti grafiği, b) Mikrokanal içerisinden basınç testi için yüksek akış hızlarında geçirilen metilen mavisinin optik mikroskop görüntüsü. 56

Şekil 4.34: Sabit parmak genişlikli IDT çifti arasına FIB ile üretilen PFK dizisini gösteren a) SEM ve b) optik mikroskop görüntüsü. c) Üretilen PFK ile elde edilen VNA ölçüm spektrumu. 57

Şekil 4.35: a) Değişken parmak aralıklı IDT çifti arasına üretilen PFK dizisini gösteren optik mikroskop görüntüsü, b) IDT çifti arasına üretilen PFK ile VNA spektrumunun değişimi. 58

Şekil 4.36: Durağan YAD elde edildiğini gösteren optik mikroskop görüntüsü ve görüntüden elde edilen çizgi profil grafiği ile YAD dalga boyunun belirlenmesi. 59

Şekil 4.37: 4.5 μm polistiren mikroparçacıklara ait a) 1:1, b) 1:2 ve c) 1:4 oranlarında mikroparçacık solüsyonu-deiyonize su karışımlarında yoğunluğu gösteren mikroskop görüntüleri. d) karşım oranına bağlı olarak mikroparçacık yoğunluğun değişimi. 60

Şekil 4.38: Mikrokanal içerisinde akış esnasında IDT-PFK arasındaki bölgeye gelen 4.5 μm polistiren mikroparçacıkların düğüm noktalarına örüntülendiğini gösteren mikroskop görüntüsü ve bu görüntü üzerinden elde edilen çizgi profili ile örüntülenen parçacıklar arası mesafe grafiği. 61

Şekil 4.39: Mikrokanal içerisinde akış esnasında IDT-PFK arasındaki bölgeye gelen 2 μm polistiren mikroküreciklerin düğüm noktalarına örüntülendiğini gösteren mikroskop görüntüsü ve bu görüntü üzerinden elde edilen çizgi profili ile örüntülenen parçacıklar arası mesafe grafiği. 62

Şekil 4.40: Mikrokanal içerisinde akış esnasında IDT-PFK arasındaki bölgeye gelen 10 μm polistiren mikroparçacıkların YAD etkisi altında optik mikroskop görüntüsü 64

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1: $LiNbO_3$'ün Fiziksel Özellikleri [6] 15

Tablo 3.2: Farklı kesimlere sahip $LiNbO_3$ kristallerinin YAD özellikleri. 16

Tablo 3.3: PDMS'in Fiziksel Özellikleri [47]..... 24

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler **Açıklama**

γ : Akustik dalga yayılma yönü
F_a : Akustik ışıma kuvveti
λ : Dalga boyu
k : Dalga vektörü
η : Dinamik viskozite katsayısı
r_d : Dış yarıçap
N : Düğüm çizgisi
k^2 : Elektromekanik eşleşim katsayısı
f : Frekans
V_0 : Giriş voltajı
N_p : IDT parmak çift sayısı
Δw : IDT parmak genişliği adımı
kHz : Kilohertz
ϕ : Kontrast faktörü
MHz : Megahertz
μm : Mikrometre
mV : Milivolt
C_{10} : Mooney-Rivlin katsayısı
nC : Nanocoulomb
V_{probe} : Ölçülen çıkış voltajı
S : Orantısal katsayı
d_o : Oyuk çapı
h_o : Oyuk yüksekliği
Δx : Örüntülenme mesafesi
Δv : Parçacığın sıvıya göre bağıl hızı
ρ_p : Parçacık yoğunluğu
ρ_s : Sıvının yoğunluğu
F_d : Stokes sürüklenme kuvveti
ρ_s : Su yoğunluğu

d_i	: Sütun çapı
r_i	: Sütun taban yarıçapı
h	: Sütun yüksekliği
S_{21}	: YAD geçirgenliği
K	: Yığınsal (bulk) modül
v	: Yüzey akustik dalga hızı
θ	: Yüzey normalinin ana kristal eksenleriyle yaptığı açı

Kısaltmalar	**Açıklama**
AlN	: Alüminyum Nitrür
arb	: Keyfi
DI	: Deiyonize su
DRIE	: Derin reaktif iyon aşındırma
EBL	: Elektron Demeti ile Litografi
Fk	: Fononik Kristal
Ga^+	: Galyum iyonu
I_2	: İyot
IDT	: İçiçe geçmiş taraklı transdüser (Inter Digital Transducer, IDT)
IPA	: İzopropil alkol
KI	: Potasyum iyodür
Li^+	: Lityum iyonu
$LiNbO_3$	: Lityum Niyobat
LMIS	: Sıvı metal iyon kaynağı (Liquid Metal Ion Source – LMIS)
LoC	: Yonga Üstü Laboratuvar (Lab on a Chip, LoC)
Nb^+	: Niyobyum iyonu
OH	: Hidroksil
PDMS	: Polidimetilsiloksan
PEDOT:PSS	: Poli(3,4-etilendioksitiyofen):poli(stirensülfonat)
PFK	: Piezoelektrik Fononik Kristal
PML	: Mükemmel eşleşen katman (Perfectly Matched Layer, PML)
PMMA	: Polimetil metakrilat
RF	: Radyo frekansı
rpm	: Dakikadaki Devir Sayısı (rotation per minute)
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope, SEM)

SERS : Yüzey Destekli Raman Saçılması (Surface-Enhanced Raman Scattering, SERS)

SH : Kayma yatay (shear horizontal)
Si : Silisyum
UV : Mor ötesi (Ultraviolet)
VNA : Vektör Ağ Analizörü (Vector Network Analyzer,VNA)
YAD : Yüzey Akustik Dalga
YKBA : Yereleşmiş Kip Bant Aralığı
ZnO : Çinko Oksit

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MİKROAKIŞKAN SİSTEMLERDE PİEZOELEKTRİK FONONİK KRİSTAL KULLANARAK MİKROPARÇACIK ÖRÜNTÜLEME

Nurseli Seda GENÇ

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Furkan KURUOĞLU

Mikroakışkan sistemler, mikron veya mikron altı boyutlardaki akışkanları veya parçacıkları kontrol etmek için kullanılmaktadır. Bu sistemler, birçok farklı uygulama alanına sahiptir ve biyolojik araştırmalardan endüstriyel süreçlere kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Hücre manipülasyonu, hücre hizalama ve hücre izolasyonu gibi uygulamalar, mikroakışkan sistemlerin en yaygın kullanıldığı alanlardır. Bu sistemler, biyolojik hücreleri tek tek manipüle etmek ve hücrelerin belirli bir düzene yerleştirilmesini sağlamak için kullanılabilir. Ayrıca, mikroakışkan sistemler, parçacıkların belirli bir boyutlarına göre ayrıştırılması veya bir araya getirilmesi için de kullanılabilir. Bu uygulama alanları, biyoteknoloji ve tıbbi araştırmalar için oldukça önemlidir.

Akustoakışkan sistemler, mikroakışkan sistemlerde yaygın olarak kullanılan bir hücre manipülasyon yöntemidir. Bu sistemlerde, piezoelektrik alttaş üzerinde üretilen yüzey akustik dalga (YAD), biyolojik parçacıkların hareketini kontrol etmek için kullanılır. YAD, temassız bir şekilde çalışır ve YAD esaslı sistemler biyo-uyumlu olması nedeniyle biyolojik örnekler üzerinde etiketleme gerektirmez.

Bu tez çalışmasında, akustoakışkan sistemlerin geliştirilmesine yönelik potansiyel bir yaklaşım olarak piezoelektrik fononik kristallerin (PFK) kullanımı ele alınmıştır. İçiçe geçmiş taraklı transdüserler (Interdigital Transducers, IDT) ve PFK yapılarının geometrik parametrelerine bağlı olarak, YAD'ların belirli frekans aralıklarında yayılımı

engellenmektedir. Bu durum, mikrokanal içerisinde oluşan akustik basınç alanını doğrudan etkilemekte ve mikroparçacıkların akustik ışıma kuvvetiyle kanal içindeki dağılımlarını değiştirmektedir. Söz konusu akustik etkileşimler, Sonlu Elemanlar Yöntemi'ne (Finite Element Method, FEM) dayalı sayısal simülasyonlarla analiz edilmiştir. Fotolitografi, odaklanmış iyon demeti (Focus Ion Beam, FIB) ile litografi, elektron demeti litografi (EBL) ve soft litografi gibi farklı şekillendirme yöntemleri kullanılarak IDT, PFK ve mikrokanal fabrikasyonu gerçekleştirilerek mikroakışkan aygıt üretilmiştir. IDT ve PFK çiftlerine ait geçirim spektrumlarıyla YAD karakterize edilirken, optik görüntüleme teknikleri ile aygıtın parçacık örüntüleme becerisi belirlenmiştir.

Temmuz, 2025, 90 sayfa.

Anahtar kelimeler: Mikroakışkan sistemler, Akustoakışkan sistemler, Yüzey Akustik Dalga, Piezoelektrik fononik kristal, Mikroparçacık örüntüleme.

SUMMARY

M.Sc. THESIS

MICROPARTICLE PATTERNING in MICROFLUIDIC SYSTEMS via PIEZOELECTRIC PHONONIC CRYSTALS

Nurseli Seda GENÇ

Istanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Physics

Supervisor: Doç. Dr. Furkan KURUOĞLU

Microfluidic systems are used to control fluids or particles at micron or submicron scales. These systems have a wide range of applications, from biological research to industrial processes. Among the most common applications of microfluidic systems are cell manipulation, cell alignment, and cell isolation. These systems can be employed to manipulate individual cells and to arrange them in specific patterns. Furthermore, microfluidic systems can be used for size-based separation or aggregation of particles, which is highly significant for biotechnology and medical research.

Acoustofluidic systems are a widely used cell manipulation method in microfluidic applications. In such systems, Surface Acoustic Waves (SAWs) generated on piezoelectric substrates are used to control the motion of biological particles. SAWs operate in a non-contact manner and do not require labeling due to their biocompatibility, making them suitable for handling biological samples.

In this thesis study, the use of piezoelectric phononic crystals (PPnCs) is explored as a potential approach for enhancing acoustofluidic systems. Based on the geometric parameters of interdigitated transducers (IDTs) and PPnC structures, the propagation of surface acoustic waves is inhibited within certain frequency ranges. This directly affects the acoustic pressure field generated within the microchannel and consequently alters the spatial distribution of microparticles through acoustic radiation forces. These acoustic interactions were analyzed through numerical simulations based on the Finite

Element Method (FEM). A microfluidic device was fabricated by employing various patterning techniques including photolithography, focused ion beam (FIB) lithography, electron beam lithography (EBL), and soft lithography for the construction of IDTs, PPnCs, and the microchannel. The transmission spectra of the IDT–PPnC pairs were used to characterize SAW behavior, while optical imaging techniques were employed to evaluate the particle patterning performance of the device.

July, 2025, 90 pages.

Keywords: Microfluidic systems, Acoustofluidic systems, Surface Acoustic Wave (SAW), Piezoelectric Phononic Crystal (PPnC), Microparticle patterning.

1. GİRİŞ

Yüzey akustik dalgalar (YAD'lar), katı maddelerin yüzeyi boyunca hareket eden elastik dalgalardır [1]. Çeşitli YAD türleri bulunmakta olup, salınım hareketlerine göre; yüzey düzlemine dik titreşim yapanlar Lamb dalgaları, yüzeyle paralel titreşim yapanlar Love dalgaları ve eliptik salınım gösterenler ise Rayleigh dalgaları olarak adlandırılır [2]. Rayleigh dalgalarının eliptik harekete yani hem dikey hem yatay bileşene sahip olması mikroakışkan sistemlerde kullanımını artırmaktadır [3–5]. Bu iki yönlü hareket bileşeni, sıvı içinde akustik akış oluşturarak sıvıyı karıştırma ve odaklama gibi uygulamalarda yüksek verimlilik sağlamaktadır.

YAD'ın üretilebilmesi için yüksek dalga yayılım hızı ve güçlü elektromekanik eşleşim katsayısına sahip piezoelektrik malzemeler tercih edilmektedir. Bu bağlamda, 128°YX yönelimine sahip lityum niyobat ($LiNbO_3$) piezoelektrik alttaşlar, YAD üretimi açısından en yaygın kullanılan alttaşlar arasında yer almaktadır [6]. Bu piezoelektrik yüzeyler üzerine yerleştirilen iç içe geçmiş taraklı transdüserlar (Interdigital Transducer, IDT) aracılığıyla üretilen YAD'lar, temassız çalışma prensipleri ve yüksek enerji verimlilikleri sayesinde mikroakışkan sistemlerde, parçacıkların örüntülenmesi, yönlendirilmesi gibi uygulamalarda kullanılmaktadır [4, 7, 8].

YAD ve mikroakışkan sistemlerin birleşimi sonucunda oluşan yapılar, "akustoakışkan sistemler" olarak tanımlanmaktadır [4, 8]. Litaratürde yapılan çalışmalarda YAD, piezoelektrik alttaş yüzeyinden sıvı ortama etkin şekilde enerji aktararak, akustik potansiyelin minimumlarında hücrelerin düzenli olarak hapsedilmesini sağlar. Bu yöntemle, her potansiyel kuyuda bir hücre olacak biçimde, iki boyutlu tek hücre örüntüleme elde edilmiştir. Bir başka çalışmada, YAD'ların mikrokanal içindeki parçacıklara etki ettiği ve çeşitli mikroakışkanlık uygulamaları ile parçacıkları sürükleme ve manipüle etme yeteneklerini sergilediği gözlemlenmiştir. [9]. Ayrıca bu sistemler, yüzey güçlendirmeli Raman saçılması (Surface Enhanced Raman Scattering, SERS) tabanlı biyosensör uygulamalarında da etkin olarak kullanılmaktadır [10]. Bu biyosensörler, mikro ve nano boyuttaki parçacıkların algılanmasında akustoakışkan

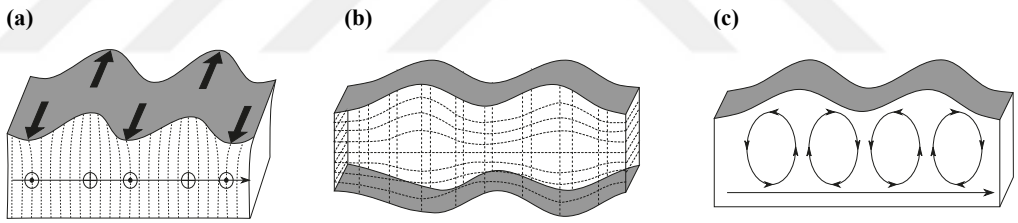
sistemlerin sağladığı odaklama ve yönlendirme avantajlarından faydalanmaktadır. Bu sistemlerde, akustik odaklama yoluyla hedef analitler ve fonksiyonelleştirilmiş nanoparçacıklar mikrokanal içinde belirli bir bölgede yoğunlaştırılmıştır. Bu lokal yoğunlaşma, SERS mekanizmasıyla birleştiğinde algılama duyarlılığını belirgin biçimde artırmaktadır. Genel olarak akustoakışkan sistemler, hücresel ve biyomoleküler ayrıştırmadan, parçacık örüntülemeye kadar geniş bir uygulama yelpazesi sunarak, umut vadeden ve disiplinlerarası bir yaklaşım ortaya koymaktadır. Akustoakışkan sistemlerde YAD, piezoelektrik yüzeylere entegre edilen IDT yapıları aracılığıyla üretilebilmektedir. Bunun yanı sıra, belirli frekans aralıklarında YAD yayılımını engelleyerek dalga iletimini yönlendirme veya engelleme yeteneğine sahip fononik kristaller (FK'ler), bu sistemlerde dalga kontrolü sağlamak amacıyla etkili bir şekilde kullanılmaktadır [11]. Literatürdeki mevcut çalışmalar ise FK'lerin bu sistemlerdeki kullanımının çoğunlukla serbest damlacık manipülasyonu ile sınırlı kaldığını göstermektedir [12–14].

Bu tez çalışması kapsamında, akustoakışkan sistemlerin geliştirilmesine yönelik yenilikçi bir yaklaşım olarak FK kullanımı önerilmektedir. Elastik dalgaların kontrolünü sağlayan bu yapay yapılar, piezoelektrik bir yüzey üzerine entegre edildiklerinde piezoelektrik fononik kristal (PFK) olarak adlandırılır. PFK'ler, belirli frekans aralıklarında dalga yayılımını engelleyen bant aralıkları oluşturarak, YAD'ın bu frekanslarda ilerlemesini önler. Bu nedenle, IDT yapısı tarafından üretilen YAD'lar, PFK'nin bant aralığına karşılık gelen frekanslarda iletilemeyip yüzeyde geri yansır. Geri yansıyan dalgaların IDT'den yayılan ileri yönlü dalgalarla girişime girmesiyle IDT ve PFK arasında duran bir YAD alanı oluşur. IDT ve PFK yapılarına ait geometrik parametrelerin, yüzeyde oluşturulan YAD'ların mikrokanal içinde meydana getirdiği akustik basınç dağılımına etkisi, FEM'e dayalı sayısal simülasyonlarla analiz edilmiştir. Bu analizler, mikrokanaldaki parçacık örüntüleme davranışları üzerindeki etkileri ayrıntılı şekilde ortaya koymuştur. Simülasyonlar tamamlandıktan sonra, akustoakışkan aygıtın üretimi için çeşitli fabrikasyon yöntemleri uygulanmıştır. Bu kapsamda, IDT'lerin desenlenmesinde fotolitografi, PFK yapıların oluşturulmasında FIB litografi ve mikrokanal üretiminde soft litografi teknikleri kullanılmıştır. Böylece aygıtın tüm bileşenleri tamamlanmıştır. Üretilen aygıtın YAD frekansı, IDT ve PFK yapılarına ait iletim spektrumlarının ölçümüyle gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, mikrokanal içerisine yerleştirilen polistren mikroparçacıkların akustik alanda gösterdiği örüntülenme davranışları optik mikroskop ile gözlemlenmiş ve değerlendirilmiştir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. YÜZEY AKUSTİK DALGASI

YAD'lar, bir katı yüzeyinde, yüzeye paralel ancak derinliğe dik yönlerde yayılan, yüzeyle sınırlı elastik dalgalardır [1]. Bu dalgalar yüzeye yakın bölgelerde enerji yoğunlaşması gösterdiklerinden, yüzeyde meydana gelen kütle, viskozite ve iletkenlik gibi fiziksel değişikliklere duyarlıdır [1]. Bu özellikleri sayesinde YAD'lar, yalnızca sensör olarak değil, aynı zamanda mikro ölçekli sıvıların karıştırılması ve hücrelerin yönlendirilmesi gibi görevlerde de aktif rol oynayarak Yonga Üstü Laboratuvar (Lab on a Chip, LoC) çalışmalarında da kullanılmaktadır [15, 16]. YAD'lar, farklı modlarda yayılım gösteren çeşitli dalga türlerine sahiptir. Şekil 2.1'de sıklıkla kullanılan YAD türleri arasında Love dalgaları, Lamb dalgaları ve Rayleigh dalgaları yer almaktadır [2].



Şekil 2.1: Farklı YAD türleri; a) Love dalgası, b) Lamb dalgası, c) Rayleigh dalgası [2].

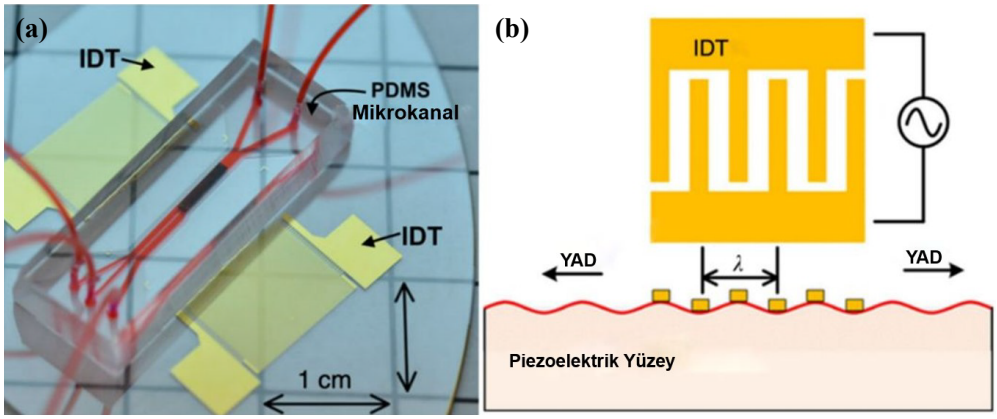
1911 yılında Augustus Edward Hough Love izotropik bir elastik tabakanın, izotropik özelliklere sahip yarı sonsuz bir alt tabaka üzerinde elastik dalgaların yayılım koşullarını incelemiştir [17]. Analitik olarak ortaya koyduğu bu modelde, üst tabakadaki kütlesel kayma dalgası hızının, alt tabakadakinden daha düşük olması durumunda, yüzey dalgalarının üst katman boyunca yayıldığı ve alt tabaka yönünde derinliğe indikçe genliklerinin üstel biçimde sönümlendiğini göstermiştir [17]. Bu dalga tipi, Love dalgaları olarak bilinmektedir. Love dalgaları, yalnızca kayma yatay (shear horizontal, SH) bileşen içerir. Bu yönüyle, parçacık hareketi yalnızca dalga yayılım yönüne dik, yüzeye paralel bir doğrultudadır [18]. Lamb dalgaları ise, hareketin hem dalga yayılım yönünü hem de levhaya dik yönü içeren bir düzlemde gerçekleştiği dalga türüdür. Bu dalgalar, ilk olarak

1917 yılında Horace Lamb tarafından ince plakalar içerisindeki elastik dalga yayılımının karakteristiklerini tanımlamak amacıyla teorik olarak ortaya konmuştur [19]. Bu dalga türü, sınırlı kalınlığa sahip elastik levhalar içerisinde yayılan, hem simetrik (S) hem de antisimetrik (A) modlara sahip olan dispersif yüzey dalgalarıdır. Lamb dalgaları, yalnızca yüzey boyunca yayılan klasik yüzey dalgalarından farklı olarak, levhanın hem üst hem de alt yüzeyinde titreşim meydana getirir ve bu yönüyle çift taraflı etkileşim gerektiren uygulamalar için uygun bir dalga türüdür [20]. Bir diğer dalga türü Rayleigh dalgaları, ilk olarak Lord Rayleigh tarafından teorik olarak tanımlanmış olup, parçacık hareketi hem yüzeye paralel hem de yüzeye dik bileşen içerir ve bu hareket genellikle eliptik bir yörünge izler. Dalganın enerjisi yüzeyden derinliğe doğru üstel biçimde azaldığı için, enerjinin büyük bir kısmı yüzeyde yoğunlaşır. Bu nedenle Rayleigh dalgaları, yüzeye yakın bölgelerdeki sıvı ve parçacıklarla güçlü etkileşim kurarak akustoakışkan uygulamalar için oldukça uygun hale gelir [3–5].

Bu bağlamda, Rayleigh tipi yüzey akustik dalgaların akustoakışkan sistemlerdeki rolü, bir sonraki bölümde detaylı biçimde ele alınacaktır. Öncelikle bu sistemlerin genel yapısı tanıtılacak, ardından mikroparçacık manipülasyonuna olanak sağlayan temel fiziksel ilkeler açıklanacaktır.

2.1.1. Akustoakışkan Sistemler

Akustoakışkanlar, akustik ve mikroakışkan sistemlerin bir araya getirilmesi ile oluşturulan yenilikçi bir yaklaşımdır [4, 8]. Temassız, biyo-uyumlu ve bir belirtece ihtiyaç duymadan kullanılabilir olma özellikleriyle önemli avantajlara sahiptir [4]. Bu sayede hücre ve parçacıklar hassas şekilde manipüle edilebilir, analiz edilebilir ve yönlendirilebilir. Bu sistemlerde yaygın olarak kullanılan akustoakışkan aygıtların temel bileşenleri, Şekil 2.2a'da gösterildiği üzere; piezoelektrik bir alttaş, sıvıların yönlendirilmesini sağlayan PDMS mikrokanal ve YAD oluşturulmasında kullanılan IDT'dir Şekil 2.2b [8]. 128° YX kesimli $LiNbO_3$, uygulamada yüksek elektromekanik eşlenim sabiti ve YAD hızına sahip olması sebebiyle en yaygın kullanılan piezoelektrik alttaştır.



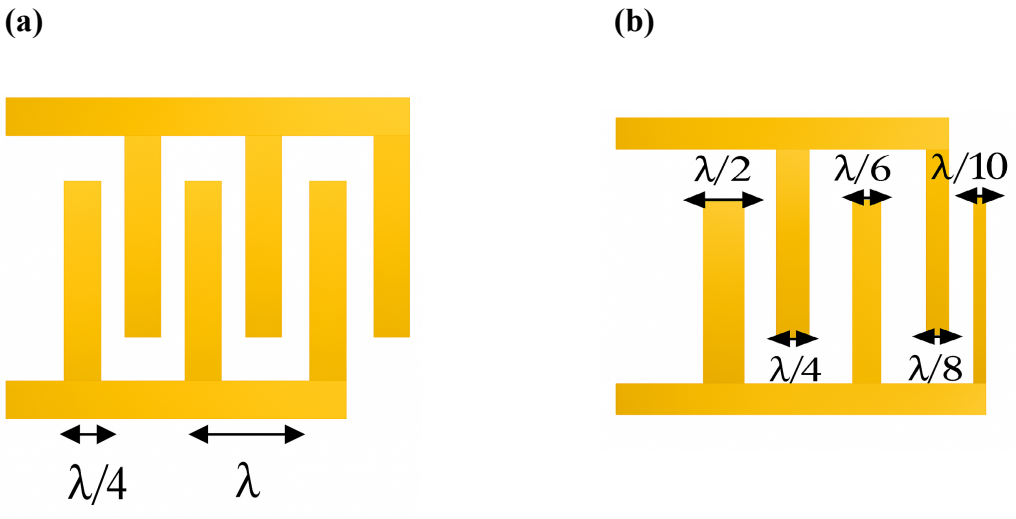
Şekil 2.2: a) IDT çifti ve PDMS kanaldan oluşan akustoakışkan sistem, b) IDT'ye potansiyel fark uygulanması ile piezoelektrik alttaş yüzeyinde YAD oluşturulması [8].

YAD üretiminde kullanılan bileşenlerden biri olan IDT'ler, en basit haliyle parmakları periyodik olarak değişen yapıda iç içe geçmiş iki tarak benzeri metal elektrottan oluşur. Bu yapı, piezoelektrik malzeme üzerine geleneksel litografi yöntemleri kullanılarak oluşturulur. IDT'ye sinüzoidal bir gerilim uygulandığında, piezoelektrik alttaş deformasyona uğrar ve bu deformasyon sonucunda yüzeyde YAD oluşur. Oluşan YAD'ın dalga boyunu (λ) parmak çiftlerinin periyodikliği tanımlar. Bir parmaktan bir sonraki parmağa olan mesafe $\lambda/4$ olacak şekilde ayarlanır [21]. Şekil 2.3a'da IDT yapsı gösterilmiştir. [22]. IDT'nin çalışma frekansı, λ ve piezoelektrik alttaşta yayılan yüzey akustik dalganın hızı (v) arasındaki ilişkiyle tanımlanır:

IDT'nin çalışma frekansı (f):

$$f = \frac{v}{\lambda} \tag{2.1}$$

Bu bağıntıya göre, parmak genişlikleri ve aralıkları küçüldükçe dalga boyu azalır, bu da çalışma frekansının artmasına neden olur. Ayrıca, IDT'nin geometrik tasarımı da çalışma frekansını doğrudan etkiler. Şekil 2.3a'da görülen, parmak aralıkları ve genişlikleri sabit olan geleneksel IDT tasarımı yalnızca belirli bir frekans aralığında çalışabilirken, geometrik boyutların kademeli olarak değiştirildiği değişken aralıklı (chirped) IDT tasarımı ile tek bir aygıt üzerinden daha geniş frekans aralıklarında YAD üretimi mümkün hâle gelmektedir Şekil 2.3b [7, 22].



Şekil 2.3: a) Sabit aralıklı IDT yapısı, b) Değişken aralıklı (chirped) IDT yapısı[22].

Durağan YAD'lar, karşılıklı yerleştirilmiş iki IDT'nin beslenmesiyle zıt yönlerde yayılan yüzey akustik dalgalarının süperpozisyonu sonucu oluşur. Bu sistemler de parçacık manipülasyonu akustik ışıma kuvvetleri ile sürükleme kuvvetleri arasındaki etkileşimden kaynaklanır [4].

Akustik ışıma kuvveti:

$$\mathbf{F_a} = \left(\frac{2\pi p_0^2 r^3}{3\lambda}\right) \beta_s \Phi \sin\left(\frac{4\pi x}{\lambda}\right) \hat{\mathbf{x}} \tag{2.2}$$

Bu ifade, uygulanan akustik alanın dalga boyu λ'ya göre çok küçük yarıçapa sahip ($r \ll \lambda$), ancak çevresindeki termo-viskoz sınır katman kalınlığına göre büyük olan küresel parçacıklar için geçerli olup, mikrokanalda indüklenen basınç genliği p_0, dalga boyu λ, parçacığın yarıçapı r, parçacıkların ve sıvının sıkıştırılabilirlikleri β_p ve β_s ile, parçacıkların sıvıya göre sıkıştırılabilirlik ve yoğunluk farkını temsil eden kontrast faktörü ϕ'ye bağlıdır.

$$\phi = \left(\frac{5\rho_p - 2\rho_s}{2\rho_p + \rho_s}\right) - \frac{\beta_p}{\beta_s} \tag{2.3}$$

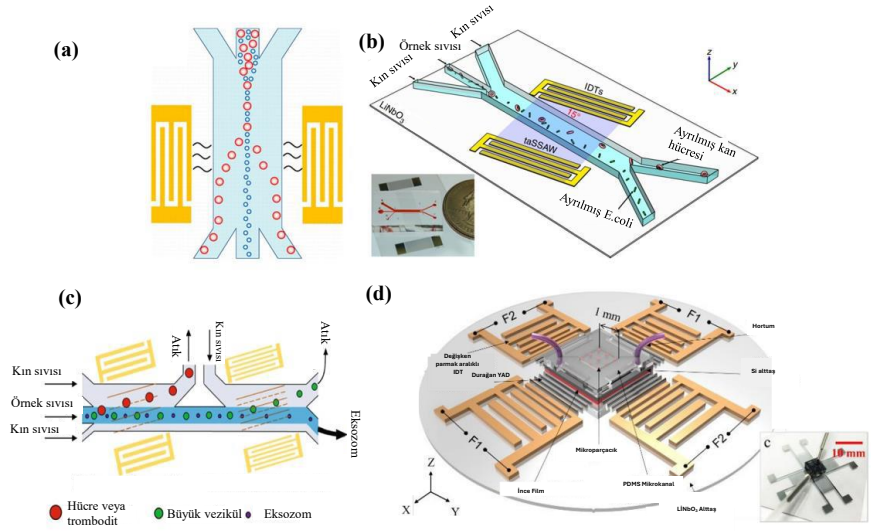
Eşitlik (2.3)'de verilen ρ_p, parçacıkların yoğunluğu ve ρ_s sıvının yoğunluğu'dur. Su içerisindeki kan hücreleri ve bakteriler gibi biyomalzemelerin büyük bir kısmı için akustik kontrast faktörü $\phi > 0$ olmaktadır. Bu nedenle, bu tür parçacıklar için akustik ışıma kuvvetinin büyüklüğü $F_a > 0$ olur ve parçacıkların mikrokanalda oluşturulan

akustik dalga alanında düğüm noktalarına doğru yönelmesi beklenir [4]. Tez çalışmasında kullanılan polistiren mikroparçacıklar için bu değer $\phi = 0.526$'dır. Mikrokanaldaki parçacıklara etki eden tek kuvvet $\mathbf{F}_a$ değildir aynı zamanda bu kuvvete karşı koyan bir Stokes sürüklenme kuvveti ($\mathbf{F_d}$) de mevcuttur:

$$\mathbf{F_d} = -6\pi\eta r\Delta\mathbf{v} \tag{2.4}$$

Burada η sıvının dinamik viskozitesini, $\Delta\mathbf{v}$ ise parçacığın sıvıya göre bağıl hızını ifade etmektedir [4]. $\mathbf{F_a}$ ve $\mathbf{F_d}$, sırasıyla, yarıçapın 3. ve 1. kuvveti ile değiştiğinden, durağan YAD mikroakışkan sistemde parçacıkların boyutlarına bağlı olarak farklı oranlarda sürüklenmelerine neden olur. Bu durum, parçacıkların boyutlarına göre ayrılmasını ve örüntülenmesini mümkün kılan boyutsal ayırıcılık mekanizmasını oluşturmaktadır [4].

Bu tür uygulamalara yönelik örnekler, Şekil 2.4'de gösterildiği gibi çeşitli biyolojik parçacıkların (virüsler, biyomoleküller, eksozomlar vb.) akustoakışkan aygıtlar aracılığıyla yüzeyde oluşturulan duran akustik dalgalar sayesinde mikrokanal içerisinde yönlendirilmesi, örüntülenmesi ve boyutlarına göre ayrıştırılması esasına dayanmaktadır [4, 8]



Şekil 2.4: YAD mikroakışkan aygıtlara örnekler: a) Duran YAD tekniği kullanılarak kan hücrelerinden bakterilerin ayrılması [8], b) Eğik açılı IDT kullanılarak kan hücrelerinden bakterilerin ayrılması [8], c) Çoklu IDT çifti kullanımı ile plazma örneklerden eksozom ayrıştırma [4], d) Çoklu IDT çifti kullanımı ile iki boyutlu (2B) parçacık örüntülenmesi [23].

Bu mekanizmanın deneysel uygulamalarına örnek olarak Şekil 2.4a ve b'de karşılıklı ve eğik açılı IDT'ler kullanılarak biyolojik mikroparçacıkların YAD alanında hizalanması ve yönlendirilmesi gösterilmektedir. Şekil 2.4c ve d'de ise çoklu IDT çifti kullanılarak mikroparçacıkların boyutlarına göre ayrıştırılması ve kontrol edilmesi de mümkündür [4, 23]. Bununla birlikte, YAD tabanlı sistemlerin fiziksel boyutlarını ve enerji tüketimini azaltmak ve aynı zamanda parçacık ayırma verimliliğini artırmak amacıyla çeşitli araştırma ve geliştirme çalışmaları sürdürülmektedir. Bu hedeflere ulaşmak amacıyla, PFK uygulamaları gibi yenilikçi yaklaşımlar üzerine yoğunlaşılmaktadır. Bu kristallerin sunduğu frekans seçiciliği ve enerji odaklama yeteneği, mikroparçacıkların hassas biçimde yönlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu doğrultuda geliştirilen akustoakışkan aygıtlar, yalnızca tek bir IDT ile çalışabilen ve belirli frekanslara duyarlı örüntüleme sağlayan sistemler olarak öne çıkmaktadır. Böylece, geleneksel YAD sistemlerine kıyasla daha kompakt yapılar içinde yüksek performans elde edilmesi mümkün hale gelmektedir.

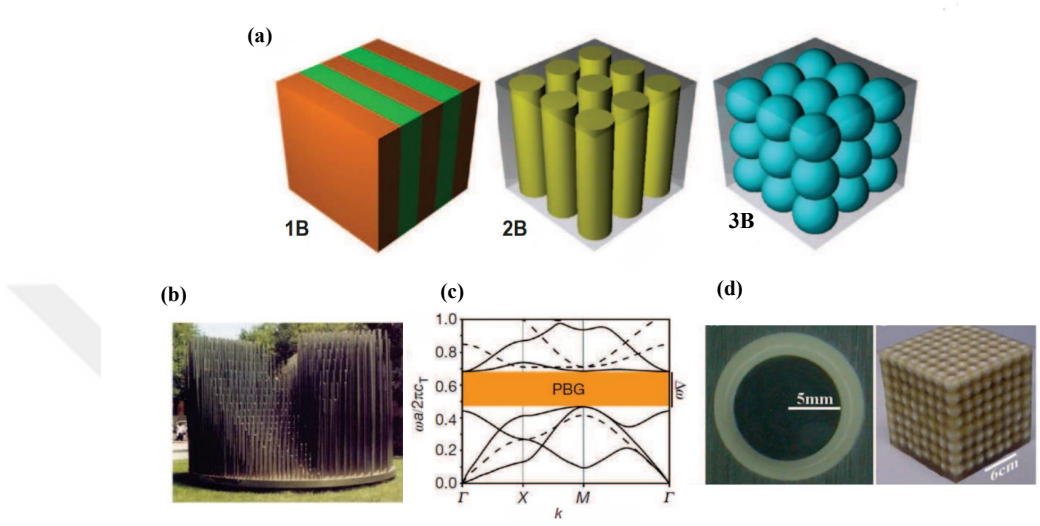
Bir sonraki bölümde, fononik kristallerin temel yapısı ve fiziksel prensipleri tanıtılacak ardından piezoelektrik fononik kristallerin özellikleri ele alınacaktır. Son olarak, bu yapıların akustoakışkan sistemlerdeki uygulamalarına dair literatürde yer alan örnekler ve ilgili mekanizmalar ayrıntılı biçimde sunulacaktır.

2.2. FONONİK KRİSTALLER VE PİEZOELEKTRİK FONONİK KRİSTALLER

FK'ler, elektromanyetik dalgaların yayılımını kontrol eden fotonik kristallere yapısal olarak benzerlik gösteren, ancak elektromanyetik dalgalar yerine akustik dalgaların yayılımını yönlendirmek ve kontrol etmek amacıyla tasarlanmış periyodik yapılı yapay malzemelerdir [24, 25]. Şekil 2.5a'da, farklı boyutlardaki FK'lerin şematik gösterimini sunmaktadır [26].

1993 yılında M. S. Kushwaha ve Sigalas, tarafından birbirine yakın tarihlerde fononik kristal kavramı ortaya atılmıştır. Bu çalışmalarda, iki boyutlu periyodik elastik yapılarda bant aralığı varlığı teorik olarak gösterilmiştir [27, 28]. Şekil 2.5b'de gösterilen heykel üzerinden akustik dalgalarının belirli frekanslarda engellendiğini göstererek fononik kristal bant aralığı kavramını deneysel olarak doğrulanmıştır [26]. FK'lerin dalga iletim özellikleri, çoğunlukla yapının geometrik periyodu ve Bragg saçılması etkisiyle belirlenir.

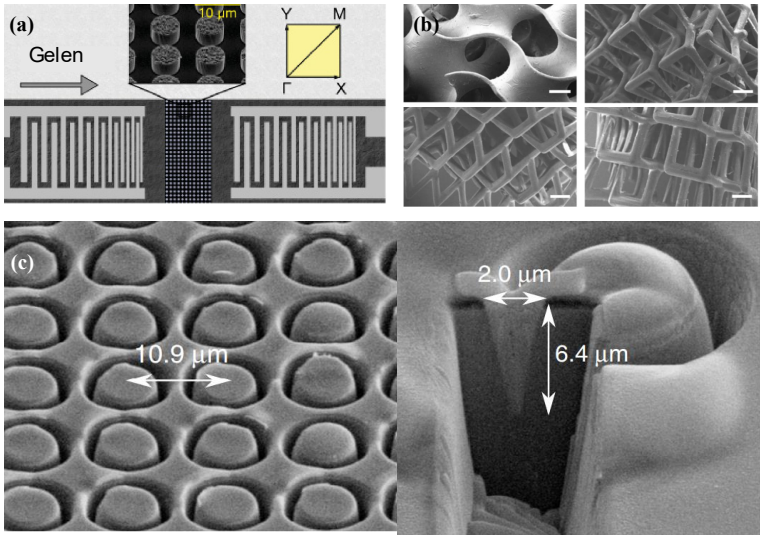
Şekil 2.5c'de iki boyutlu kare örgüde düzenlenmiş bir fononik kristalin bant yapsı gösterilmektedir [26]. Sürekli çizgiler, FK yapı içerisindeki yayılabilir akustik dalga modlarını temsil eder. Turuncu ile gösterilen bölge, akustik dalgaların belirli bir frekans aralığında yayılımının engellendiği bant aralığını temsil etmektedir.



Şekil 2.5: a) Farklı boyutlarda FK yapıları [26], b) kHz frekansındaki ses dalgalarını engellemek amacıyla, 2.9 cm periyotlu iki boyutlu bir FK yapısı [26] c) FK'ye ait bant yapısı [26] d) Yerel rezonansa dayalı fononik kristalin temel yapı birimini gösteren kesit ve ilgili yapının şematik gösterimi [29].

Şekil 2.5d'de, Bragg saçılımına dayalı klasik bant aralığı oluşumundan farklı olarak, yüksek yoğunluklu bir çekirdeğin düşük elastik modüllü bir ortam içerisine yerleştirilmesiyle tasarlanmış, yerel rezonansa dayalı bir fononik kristal yapısı örneği sunulmaktadır. Bu yapı, belirli frekanslarda güçlü yerel rezonanslar oluşturarak bant aralığı meydana getirebilmektedir [29].

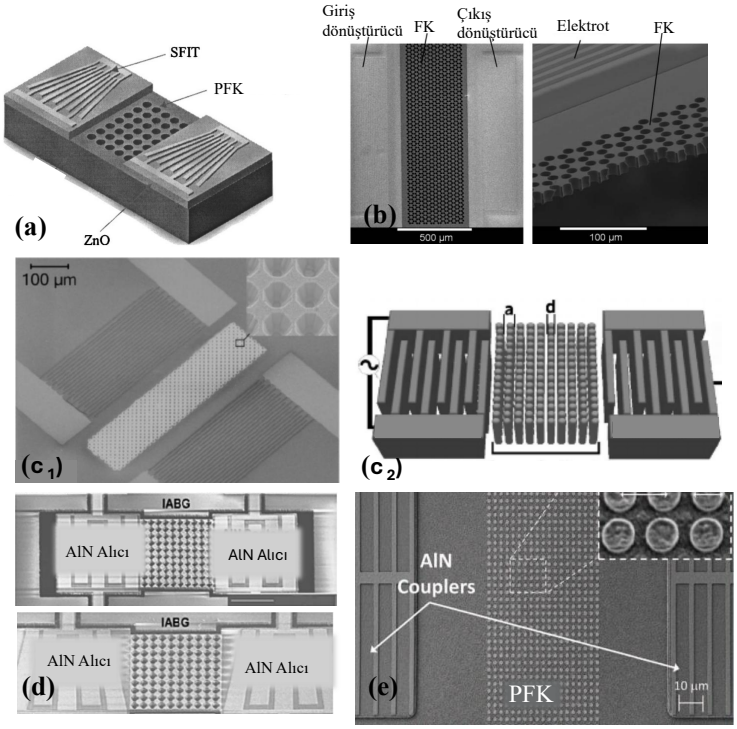
PFK'ler piezoelektrik malzemelerin elektromekanik özelliklerini, FK'lerin bant aralığı oluşturma yeteneğiyle birleştiren ileri düzey metamalzeme yapılardır [11]. Bu yapılar, piezoelektrik özellik taşıyan alttaşlar (örneğin $LiNbO_3$, ZnO, AlN) üzerine periyodik olarak çıkıntı veya oyuklar şeklinde tasarlanmaktadır. Bu yapıların üretiminde, Şekil 2.6'da gösterildiği üzere, FIB litografisi, periyodik metal saçıcıların elektrokaplama yöntemiyle biriktirilmesi ve üç boyutlu yazıcı teknolojileri gibi ileri mikro/nano üretim teknikleri kullanılmaktadır [30–32].



Şekil 2.6: PFK üretiminde kullanılan farklı üretim yöntemleri: a) Elektrokaplama yöntemi [30], b) 3 boyutlu yazdırma yöntemi [31], c) Odaklanmış iyon demeti litografisi yöntemi [32].

FK ve PFK'nın YAD uygulamalarına entegrasyonu, özellikle mikro ve nano ölçekte çalışan aygıtlarda akustik kontrolün sağlanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Yapılan çalışmalarda, iki boyutlu hava/silisyum FK yapısı, Silisyum (Si) bir alttaş üzerine düzenli aralıklarla açılmış mikro ölçekli delik dizileriyle oluşturulmuştur [33]. Yapının elektriksel olarak karakterize edilebilmesi amacıyla, FK'ye yakın konumlandırılan IDT'ler, sistemin entegre bir parçası olarak yapı üzerine yerleştirilmiştir. Bu dönüştürücüler, Si alt tabaka üzerine kaplanan ince çinko oksit (ZnO) piezoelektrik film tabakası üzerine üretilmiştir. Bu yapı sayesinde, YAD etkin biçimde uyarılması ve FK bant aralığı özelliklerinin detaylı olarak incelenmesi mümkün hale getirilmiştir Şekil 2.7a [33] .

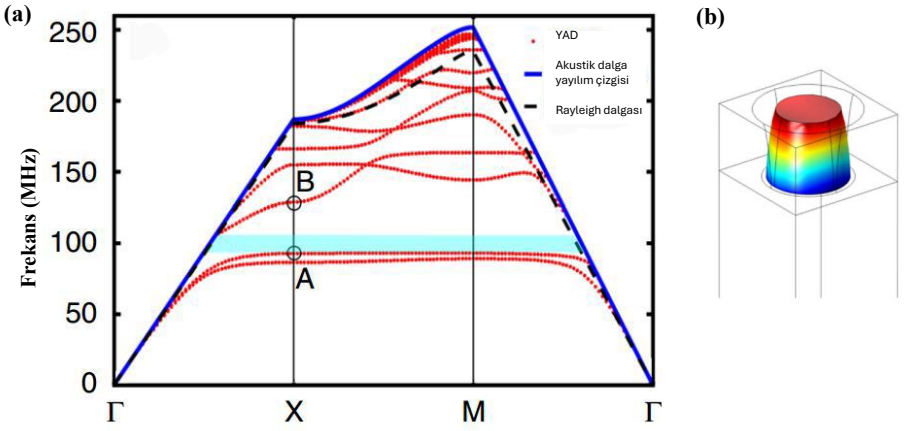
Benzer şekilde FK'ler Si alttaş üzerine altıgensel dizilimli delikler açılarak geliştirilmiş, ZnO katmanı ve IDT'lerle desteklenmiş bu yapılar geniş frekans aralığında gözlenen tam bant aralığı sayesinde yüksek frekanslı akustik uygulamalarda kullanılabilirliğini göstermiştir Şekil 2.7b [34]. Daha sonrasında, $LiNbO_3$ piezoelektrik bir alttaş üzerine doğrudan delik açarak fononik kristaller üretilmiş ve böylelikle ek bir dönüşüm katmanı kullanma gereksiniminden kaçınılmıştır Şekil 2.7c [35].



Şekil 2.7: a) Derin reaktif iyon aşındırma (Deep Reactive Ion Etching, (DRIE)) yoluyla elde edilmiş kare örgüde delikli bir Si alttaş [33], b) Altıgen dizilimli fononik kristal yapısı ve yapının iki ucuna yerleştirilmiş giriş-çıkış dönüştürücüleri [34]. c1 ve c2)Reaktif iyon aşındırma kullanılarak elde edilmiş kare örgüye sahip delikli bir $LiNbO_3$ yonga ve yapının elektriksel karakterizasyonu için kullanılan deney düzeneğinin şeması [35]. d) AlN üzerine entegre edilen iki boyutlu fononik kristal yapısı [36], e) Katı-katı kare fononik kristal örgü [37].

Bir diğer çalışmada ince bir alüminyum nitrür (AlN) tabakası kullanılarak, hacimsel akustik dalgaların yayılımını engelleyen bir yapı geliştirilmiştir. Bu yapının fononik özellikler kazanabilmesi amacıyla, AlN tabakası üzerinde doğrudan açılan periyodik delikler aracılığıyla iki boyutlu bir fononik kristal düzlemi oluşturulmuştur Şekil 2.7d [36]. Fononik kristalin birim hücresinde etkili katkıları tanımlamak için, düzlemi boydan boya geçen deliklerin kullanılması tek çözüm değildir. Katı çıkıntılar ile periyodik yapılar üreterek, örneğin Şekil 2.7e'deki şeklindeki durum gibi, etkili yapılar tanımlanabilir [37]. Ash ve diğerleri tarafından yapılan bir başka çalışmada halkasal oyuk geometrisine sahip PFK dizilerinin, yerel rezonansa dayalı yerelleşmiş kip bant aralığı (YKBA) sayesinde yüzey akustik dalgaların iletimini etkili bir şekilde engelleyebildiğini göstermektedir Şekil 2.8 [32]. Bu tür yapıların bant yapılarını belirleyen temel unsurlar arasında

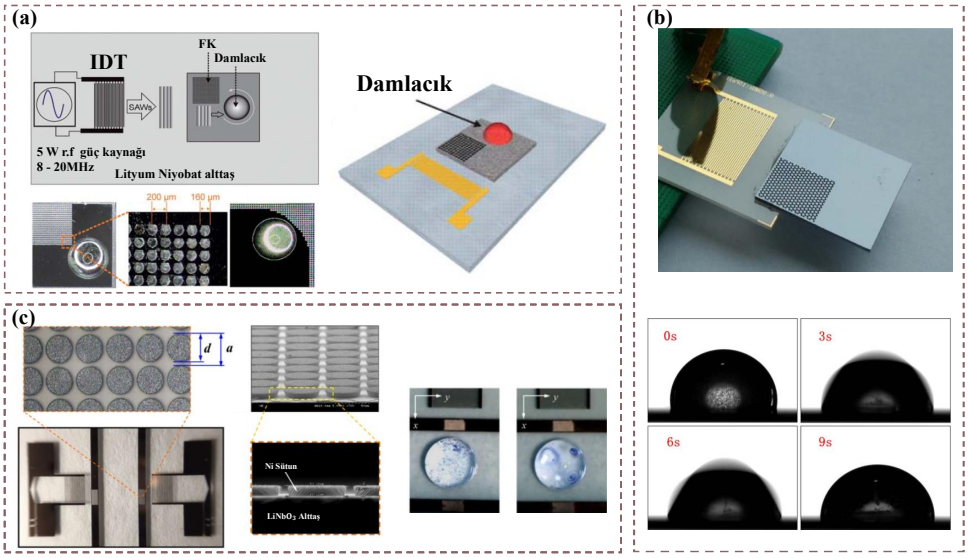
oyuk yarıçapı, oyuk yüksekliği gibi geometrik parametreler bulunmaktadır. Söz konusu parametreler, PFK'nın çalışacağı frekans aralığını doğrudan etkilemekte ve dalga yayılımı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.



Şekil 2.8: a) Halkasal oyuklardan oluşan 2B FK bant yapısı b) Halkasal oyuğa ait birim hücre [32].

2.3. FONONİK KRİSTALLERİN AKUSTOAKIŞKAN SİSTEMLERDE UYGULAMALARI

Litarütürde FK'ların akustoakışkan sistemlerde kullanılmasına yönelik çeşitli çalışmalar mevcuttur [12–14]. Bu çalışmalardan birinde $LiNbO_3$ piezoelektrik tabaka üzerine yerleştirilen mikrofabrikasyonla üretilmiş fononik yapılar içeren Si üsttabaka aracılığıyla, YAD'ların akustik alanı şekillendirmesi ve sıvı içindeki parçacıkların yönlendirilmesi sağlanmıştır (Şekil 2.9a) [12]. Başka bir çalışmada, altıgensel dizilimli FK'ler kullanılarak geliştirilen ve YAD'ları ile çalışan mikroakışkan aygıt sunulmuştur. YAD, FK yapıların geometrisine bağlı olarak odaklanmış, yönlendirilmiş veya zayıflatılmış enerji bölgeleri oluşturarak, mikro ölçekli damlacıklar içerisindeki parçacıkların istenilen konumlarda toplanmasını sağlamaktadır (Şekil 2.9b) [13]. Diğer bir çalışmada $LiNbO_3$ piezoelektrik alttaş üzerine üretilen fononik kristallerin, YAD'ların sıvı içindeki parçacıkların yönlendirme ve yoğunlaştırma yeteneğini artırdığı gösterilmiştir. Bu yapılar, YAD enerjisini belirli bölgelerde yoğunlaştırarak mikroakışkan ortamlarda parçacık birikimi ve odaklanması sağlamaktadır (Şekil 2.9c) [14].



Şekil 2.9: a), b) ve c), PFK içeren YAD mikroakışkan sistem örnekleri [12-14]

Şimdiye kadar mikroakışkan sistemlerde FK kullanımı, genellikle serbest damlacıkların manipülasyonu ile sınırlı kalmıştır. Bu tez çalışmasında, piezoelektrik bir alt tabaka üzerine doğrudan entegre edilen FK yapılarıyla PFK tasarlanmış ve mikroparçacık örüntülemesine yönelik akustoakışkan uygulamalarda yenilikçi bir yaklaşım sunulmuştur. Çalışmada, PFK tasarımında halkasal oyuk geometrisi tercih edilmiştir. Bu geometri, düşük frekans bölgelerinde yerel rezonans mekanizmasına dayanarak YKBA oluşturmaktadır. Literatürde, bu yapının diğer FK geometrilerine göre 16 kata kadar daha yüksek akustik sönümleme sağladığı gösterildiğinden, söz konusu geometri özellikle tercih edilmiştir [32].

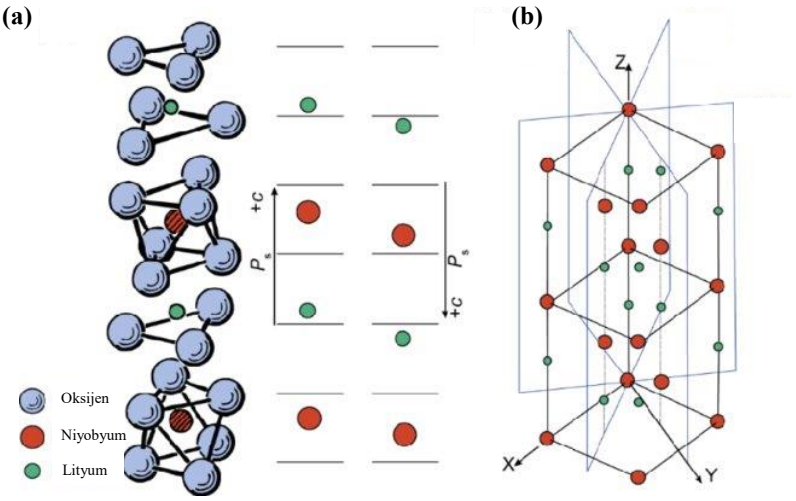
3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. MALZEME

3.1.1. Lityum Niyobat

$LiNbO_3$, YAD'ların üretilmesi için oldukça yaygın olarak kullanılan piezoelektrik ve ferroelektrik özellikler gösteren bir kristaldir [6]. Kristal yapısı, oksijen oktahedrası içerisinde yer alan niyobyum iyonları (Nb^{5+}) ile bu yapıdaki arayer boşluklarını dolduran lityum iyonlarıdan (Li^{+}) oluşur. Oksijen iyonlarının oluşturduğu örgü, kristalin yapısal kararlılığını sağlamanın yanı sıra, $LiNbO_3$'ün fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde temel bir rol oynar [38]. $LiNbO_3$,'ün merkez simetrisi bulunmayan kristal yapısı, malzeme içerisinde kalıcı bir dipol momentin oluşmasına yol açar ve bu durum, onun ferroelektrik özelliklerinin temelini oluşturur. Bu asimetrik yapı sayesinde, uygulanan mekanik gerilimin yüksek verimlilikle elektriksel yanıta dönüştürülmesini sağladığı gibi, aynı zamanda uygulanan elektrik alan karşılığında da mekanik deformasyon oluşturulmasını sağlamaktadır. Tüm bunlar, $LiNbO_3$,'ün yüksek piezoelektrik katsayılar sergilemesini sağlar [39]. Şekil 3.1(a)'da gösterildiği gibi, $LiNbO_3$ kristalinin altıgen birim hücresi, c-ekseni etrafındaki üç katlı dönel simetri ile karakterize edilir [40]. Bu simetri, mühendislik ve malzeme bilimi uygulamalarında kristal eksenlerinin hassas biçimde tanımlanmasını gerekli kılar [41]. Kristalin yapısal ve piezoelektrik özelliklerine ilişkin bazı temel parametreler Tablo 1'de özetlenmiştir [6]. YAD cihazlarında kristal yönelimi, yüzey normalinin ana kristal eksenleriyle yaptığı açı (θ) ve akustik dalga yayılma yönü (γ) ile tanımlanan (θ, γ) gösterimiyle ifade edilir. Kristal yüzey normali, ana kristalografik eksenlerden sapma gösterdiğinde, bu sapma Euler açıları kullanılarak daha hassas bir şekilde tanımlanabilir. Bu yöntem, karmaşık yönelimli kesimlerde kristalin doğrusal ve doğrusal olmayan fiziksel özelliklerinin kontrollü bir şekilde optimize edilmesine olanak tanır. Euler açıları (α, β, γ), ana eksenler (X, Y, Z) ile Euler dönüşümlü eksenler (x, y, z) arasındaki yönelim dönüşümlerini tanımlamak için kullanılır. Bu dönüşüm, önce Z-ekseni etrafında α derece döndürülmeyi, ardından oluşan düğüm çizgisi (N) etrafında β derece döndürülmeyi ve son olarak X-ekseni ile hizalanmak üzere γ derece daha döndürülmeyi

içerir. Bu dönüşümler sonucunda elde edilen kristal yönelimi, yüzey akustik dalga hızını doğrudan etkiler. Farklı kesimlerin bu hıza etkisi, Tablo 3.2'de sunulmuştur.



Şekil 3.1: a) $LiNbO_3$ kristal yapısını gösteren şematik çizim, b) Hekzagonal birim hücrenin gösterimi [40].

Tablo 3.1: $LiNbO_3$'ün Fiziksel Özellikleri [6]

Özellik	**Değer**
Kaynama Sıcaklığı (°C)	1253
Kristal Nokta Grubu	3m
Örgü Parametreleri a (Å) / c (Å)	5.148 / 13.863
Sertlik (Mohs)	5
Yoğunluk ($\times 10^3$ kg/m^3)	4.647
Dielektrik sabiti $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{33}$	85.2, 28.7
Piezoelektrik zorlanma katsayıları (C/m^2) $(e_{15}, e_{22}, e_{31}, e_{33})$	(3.76, 2.43, 0.23, 1.33)

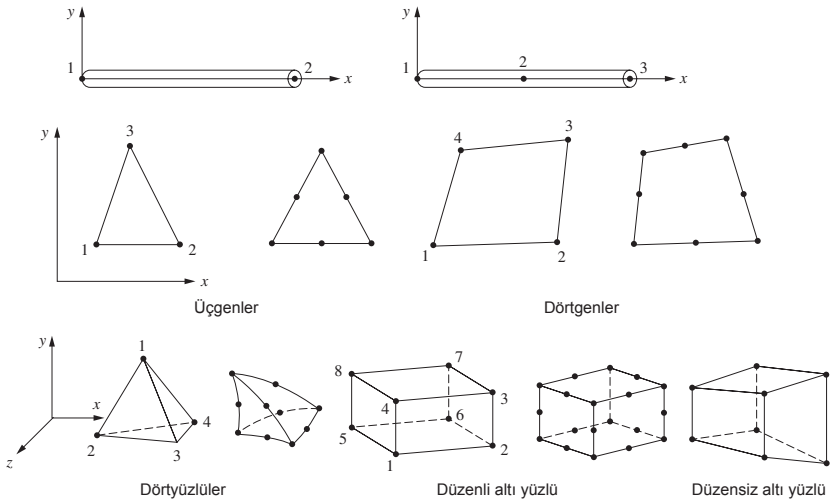
Tablo 3.2: Farklı kesimlere sahip $LiNbO_3$ kristallerinin YAD özellikleri.

Kristal Kesim	YAD Ekseni	Tasarımı	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

128° YX kesimli $LiNb_3$ kristali, enerjisini yüzeyde yoğunlaştıran Rayleigh tipi YAD üretir ve bu sayede sıvı ortamlarla verimli ve kararlı bir etkileşim sağlar [42]. Buna karşın, 41°YX ve 64°YX kesimleri, her ne kadar daha yüksek YAD hızı ve eşlenim katsayısına sahip olsalar da, sızan yüzey akustik dalgaları (Leaky Surface Acoustic Waves, LYAD) üretmeleri nedeniyle enerjiyi kristal içine sızdırarak sıvı ortamlarda yüksek enerji kaybına yol açar. Bu nedenle tez kapsamında, 128°YX kesimli $LiNbO_3$ kristali tercih edilmiştir.Söz konusu kristal yönelimi, Euler açılarıyla $(0, -38, 0)$ tanımlanır.

3.2. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ SİMÜLASYONU

Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM), fiziksel sistemlerin kısmi diferansiyel denklemlerle tanımlandığında durumlarda kullanılan sayısal bir analiz yöntemidir. Bu yöntem, analitik çözümlerin belirli simetrilere sahip sistemler için elde edilebildiği karmaşık fiziksel sistemlerde yaklaşık çözümler bulmak için kullanılır. FEM, yapısal mekanik, akışkanlar mekaniği, termodinamik, elektromanyetik, akustik ve yarı iletkenler gibi birçok temel bilim ve mühendislik problemine başarıyla uygulanabilir. Bu yöntem, incelenen sistemi küçük elemanlara böler ve her bir eleman için matematiksel denklemler oluşturur. Bu denklemler, sistemin davranışını yorumlamada kullanılır. FEM hesaplamalarında kullanılan elemanlar, 1B, 2B veya 3B olabilir. 1B elemanlar, en az iki düğüm noktasına sahip olan çizgisel veya eğrisel elemanlardır. 2B elemanlar, en az üç düğüm noktasına sahip olan üçgen veya dört-kenarlı şeklinde olabilir. 3B elemanlar ise en az dört düğüm noktasına sahip olan kübik veya tetrahedral şeklinde olabilir. Bu eleman tiplerine ait geometrik temsiller ve düğüm noktaları Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Hesaplama uzayının boyutsallığına göre, FEM analizlerinde farklı interpolasyon teknikleri kullanılabilir. Düğüm noktaları, elemanların köşelerinde



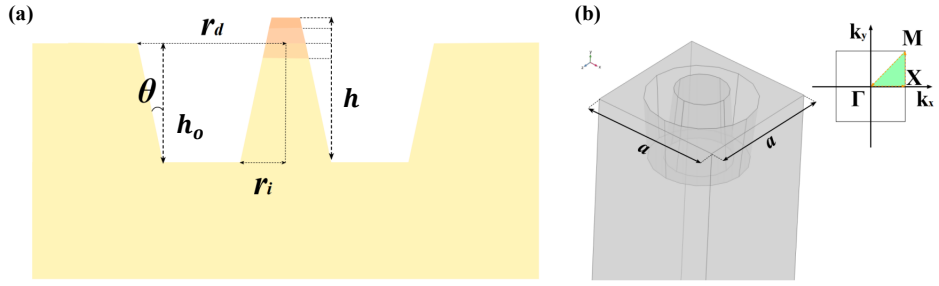
Şekil 3.2: 1B, 2B ve 3B elemanlar için tanımlanabilecek geometriler ve düğüm noktaları

veya eleman kenarlarının ortasında olabilir [43]. İnterpolasyon teknikleri, çözümün hassasiyetini artırmak için ikinci derece (kuadratik) veya daha yüksek dereceli fonksiyonlar kullanabilir. FEM, hesaplama uzayında farklı fiziksel özelliklerin aynı anda çözümlenebildiği bir yöntemdir. Aynı zamanda karmaşık geometrilere sahip yapılar için çözüm hesaplanabilir ve geometrik birimlerin simetrilerine bağlı olarak farklı sonlu elemanlar kullanılabilir. FEM analizlerinde yüksek hassasiyet elde edilebilir ve doğru sonuçlar elde edilebilir. Sonuç olarak, FEM, kısmi diferansiyel denklemlerle tasvir edilen fiziksel sistemlerin yaklaşık çözümlerini bulmak için kullanılan bir sayısal analiz yöntemidir. Bu yöntem, birçok bilim ve mühendislik alanında başarıyla uygulanabilir ve hassas sonuçlar elde edilebilir.

Bu çalışmada, COMSOL Multiphysics adlı FEM yazılımının 5.6 ve 6.0 sürümleri kullanılmıştır. COMSOL, sahip olduğu spesifik modülleri bağımsız olarak ya da birbirleriyle kombinasyon halinde kullanılabilir ve Multiphysics adı verilen birden fazla fizik arasında eşleştirmeler yapabilir. Örneğin, katı mekaniği ve elektrostatik modüllerin birleştirilmesiyle piezoelektrik etki simüle edilebilir. COMSOL modelinin oluşturulması evrensel bir dizi adımdan oluşur. İlk olarak, araştırılan mekansal boyut (1B, 2B, 3B ve simetrik eksen) tanımlanır. Ardından, fizik modülleri seçilir. Geometrik parametreler, örgü vektörleri, global değişkenler ve manuel olarak girilen malzeme özellikleri gibi tanımlamalar yapılır. Ayrıca, Mükemmel eşleşen katman (Perfectly Matched Layer, PML) ve kristalografi eksenlerini tanımlamak için özel koordinat

sistemleri de uygulanır. Geometri oluşturulduktan sonra, her alt alan için malzeme özellikleri uygulanır. Malzeme tanımlamaları kullanıcı tarafından elle yapılabilir veya hazır malzeme listesinden seçilebilir. Seçilen fizik modüllerine uygun sınır ve alan koşulları uygulanarak periyodik koşullar belirlenebilir. Bu çalışmada periyodik sınır koşulu olarak Bloch-Floquet periyodikliği ile malzeme periyodikliği tanımlanmıştır. Multiphysics eşleştirmesi, kullanılan fizik modüllerine ve sınır koşullarına bağlı olarak uygulanabilir. Tüm bunlar tamamlandığında, örgü oluşturulabilir ve çalışma adımları seçilebilir. Özfrekans çalışması, zamana bağımlı çalışma, frekans alanı çalışması, sabit çalışma gibi çeşitli çalışma adımları simüle edilebilir. Ayrıca tanımlanmış bir değişkene göre çalışmalar üzerinden parametrelere dayalı bir tarama da uygulanabilir. Model çalışmaya hazır olduğunda, çözücü seçilir. COMSOL'da hem doğrudan (MUMPS, PARDISO, SPOOLES) hem de yinelemeli çözücüler bulunur. Doğrudan çözücüler tek bir büyük adımda çözümü hesaplar. İyi tanımlanmış problemlerde, doğrudan çözücülerin seçimi sonucu etkilemez, sadece hesaplama süresini etkiler. Yinelemeli çözücüler ise çözümleri adım adım bulur. Adım sayısı arttıkça hata oranı azalır ve yinelemeli çözücüler, belirli bir hata toleransının altına ulaşıldığında çözüm bulunmuş kabul edilir. Yinelemeli çözücüler, doğrudan çözücülere kıyasla daha az bellek kullanır. Ancak hangi yinelemeli çözücünün kullanılacağı, çözülecek denklem sisteminin özelliklerine bağımlıdır.

Tez çalışmaları kapsamında, PFK tasarımı öncelikle Şekil 3.3'te gösterildiği şekilde modellenmiştir. Modelde; r_d oyuk çapını, r_i sütun taban yarıçapını, h_o oyuk yüksekliğini ve h sütun yüksekliğini temsil etmektedir. PFK'nın bant aralığı, IDT'nin hedef çalışma frekansına karşılık gelecek şekilde belirlenmiş ve bu doğrultuda geometrik parametreleri ile periyodik yapısı optimize edilmiştir. Bulgular bölümünde, bu parametrelerin simülasyon sonuçları üzerindeki etkilerine ayrıntılı biçimde yer verilmiştir. Elde edilen simülasyon verileri doğrultusunda PFK tasarımı tamamlanmış ve yapı, FIB litografi yöntemi kullanılarak başarıyla üretilmiştir.



Şekil 3.3: a) Birim hücre içerisinde PFK modellemesinin kesit görünümü ve kullanılan geometrik parametreler, b) Kare örgü düzeninde PFK birim hücresi modelinin 3-boyutlu gösterimi ve 1.Brillouin bölgesindeki dalga vektörü yönü.

3.3. AYGIT FABRİKASYONU

Bu bölümde, YAD üretiminde kullanılan IDT yapılarına ait üretim süreci ile bu süreçte uygulanan fotolitografi yöntemi ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Ardından, PFK yapılarına yönelik olarak, FIB litografisi ile gerçekleştirilen üretim adımları anlatılacaktır. Bölümün son kısmında ise, akustoakışkan sistemlerin mikrokanal üretiminde yaygın olarak tercih edilen PDMS malzemesinin özelliklerine yer verilecek, ardından PDMS kullanılarak mikrokanal üretimine ilişkin fabrikasyon süreci detaylı biçimde açıklanacaktır.

Mikro boyutta üretilen akustik dalga temelli aygıtlar ile elektronik ve optoelektronik aygıtların üretiminde, yüzey üzerinde desen oluşturma imkanı sunan temel fabrikasyon yöntemlerinden biri litografidir. Bu tez çalışmasında, iki farklı litografi yöntemi olan fotolitografi ve FIB litografisi birlikte kullanılarak çok aşamalı bir üretim süreci gerçekleştirilmiştir. Mikrometre boyutundaki IDT yapılarının üretiminde, fotolitografi yöntemi tercih edilmiştir. Buna karşılık, halkasal oyuk geometrisine sahip PFK üretimi FIB litografi yöntemi kullanılar gerçekleştirilmiştir. Bu iki yöntemin birlikte uygulanması, farklı mikro ölçekteki yapıların kontrollü ve hassas bir şekilde tanımlanmasına olanak sağlamıştır.

Tüm litografi adımları, parçacık kontaminasyonunun en aza indirilmesi ve işlem kararlılığının sağlanması amacıyla temiz oda koşullarında yürütülmüştür. Temiz oda, havada bulunan parçacık yoğunluğunun belirli sınırların altında tutulduğu, sıcaklık, nem

ve hava akışının kontrollü olduğu özel laboratuvardır. Temiz oda koşulları, genellikle ISO 14644-1 standardına göre sınıflandırılır ve bu sınıflandırma, birim hacimde (1 ft^3 veya 1 m^3) bulunan belirli boyutlardaki partikül sayısına göre yapılır. Bu çalışmalar, İstanbul Üniversitesi Fizik Bölümü Nano ve Optoelektronik Araştırma Laboratuvarları bünyesinde bulunan İleri Litografik Yöntemler Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Fotolitografi süreci, 0.5 µm boyutundaki parçacık sayısının bir fit küpte 100'ü geçmediği ISO Sınıf 5 (Class 100) seviyesindeki temiz alanda gerçekleştirilmiştir. Bu seviye, fotodirenç kaplama, maske hizalama ve UV pozlama gibi işlemler sırasında yüzeye parçacık teması riskini azaltmak için öneme sahiptir. FIB litografi ve onu takip eden işlem basamakları ise, parçacık yoğunluğunun nispeten daha yüksek olmasına izin verilen, ancak hâlâ kontrollü bir ortam sağlayan ISO Sınıf 6 (Class 1000) koşullarında yürütülmüştür. Bu seviyede 0.5 µm boyutundaki parçacık sayısı bir fit küpte 1000 adedi geçmemektedir.

3.3.1. IDT Fabrikasyonu

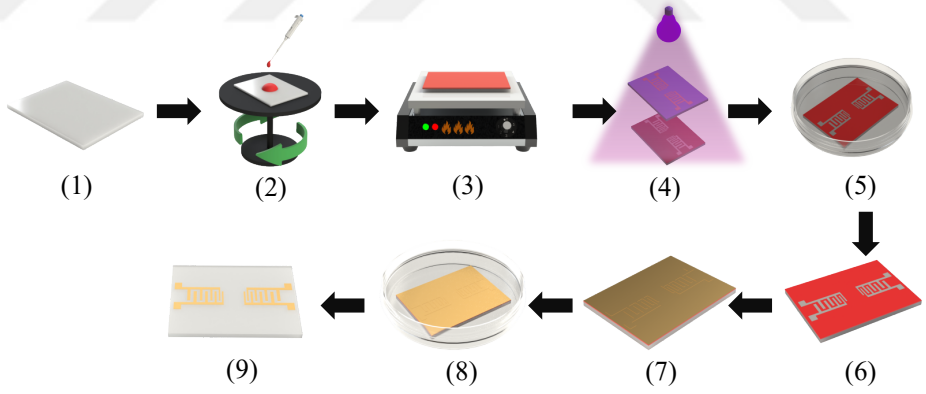
3.3.1.1. Örneklerin Temizlenmesi

128° YX kesimli $LiNb_3$ kristali, yüzeyde bulunabilecek toz, organik kalıntı ve parçacıkların giderilmesi amacıyla belirli bir temizlik sürecine tabi tutulmuştur. Bu süreç kapsamında, 40 mm × 30 mm boyutlarında kesilen örnek öncelikle 5 dakika süreyle oda sıcaklığında aseton içerisinde bekletilmiştir. Bu işlem sonrası, örnek sırasıyla izopropil alkol (IPA) ve deiyonize su (DI su) içerisinde beşer dakika bekletilerek kuru azot yardımıyla kurutulmuştur. Bu adım, asetonun yüzeyde bırakabileceği çözünmüş kalıntıların ve uçucu olmayan bileşenlerin tamamen uzaklaştırılması amacıyla uygulanmıştır. Deiyonize su ise yüzeyin iyonik kalıntılardan arındırılmasını sağlamıştır. Uygulanan temizlik işleminin etkinliği, optik mikroskop altında gerçekleştirilen yüzey incelemesi ile doğrulanmıştır.

3.3.1.2. Fotolitografi

Fotolitografi veya Ultraviyole (UV) litografi, fotodirenç kaplı alttaş üzerine mikro veya nano yapıda desen oluşturmak için güvenilir ve hızlı bir tekniktir. Fotolitografi süreci fotodirenç kaplama, pozlama ve banyolama adımlarını içerir (Şekil 3.4). Fotodirençler, ışığa duyarlı özellikleri sayesinde mikro ve nano ölçekli yapı oluşturma süreçlerinde yaygın olarak kullanılan polimer esaslı malzemelerdir. Bu malzemeler, yapısal özelliklerine göre pozitif ve negatif olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Pozitif

fotodirençlerde, UV ışığa maruz kalan bölgelerde moleküler bağlar zayıflayarak çözünürlükleri artarken negatif fotodirençlerde ise UV ışığa maruz kalmayan bölgeler çözünür, ışık gören alanlarda ise bağ yapısı kuvvetlenerek çözünürlük azalır. Bu çalışmada, pozitif karakteristik sergileyen AZ 5214-E fotodirenç kullanılmıştır. Kaplama sürecinde örnek, döner tabla üzerine yerleştirilmiş ve vakumla sabitlenmiştir. Fotodirenç, yüzeyin merkezine damlatıldıktan sonra kısa bir süre yayılması beklenmiş, ardından başlatılan döndürme işlemiyle santrifüj kuvveti etkisiyle fotodirenç yüzeye düzgün bir şekilde yayılmış ve böylece hedeflenen film kalınlığına ulaşmak amacıyla belirlenen parametreler doğrultusunda kontrollü bir kaplama gerçekleştirilmiştir. Döndürme hızı, kullanılan fotodirenç tipi ve istenen film kalınlığına göre optimize edilir. Bu bağlamda, yaklaşık 6000 rpm hızında ve 60 saniye süreyle gerçekleştirilen döndürme işlemi, istenilen kalınlık değerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Kaplama işlemini takiben, film içerisindeki çözücülerin uzaklaştırılması ve kaplamanın mekanik ve kimyasal kararlılığının artırılması amacıyla örnek, 110°C sıcaklıkta 60 saniye boyunca tavlanmıştır.



Şekil 3.4: Fotolitografi adımlarının şematik gösterimi. 1) Uygun boyutlarda alttaşın kesilmesi, 2) Döndürerek kaplama yöntemi ile fotodirenç kaplanması, 3) Çözücünün uzaklaştırılması için uygulanan ısıl işlem, 4) Maske kullanımı ve UV ışık yardımı ile desenin fotodirenç üzerine aktarılması, 5) Banyolama işlemi, 6) Litografi işlemi sonucu desen elde edilmesi ve incelenmesi, 7) Fiziksel buharlaştırma yöntemi ile metal kaplanması, 8) Lift-off işlemi 9) Lift-off sonrasında elde edilen aygıt.

3.3.1.3. Pozlama

Bu çalışmada, istenilen desenin fotodirenç kaplı örnek üzerine aktarılması için kuvartz üzerine krom kaplı maske kullanılmıştır. Maskedeki krom bölgeler UV ışığını geçirmezken, krom olmayan bölgeler UV ışığını geçirerek fotodirencin yapısını değiştirir. Böylece maske deseni örneğe aktarılır. Pozlama işlemi, Karl-Suss MicroTec MJB4 maske hizalayıcıda, 405 nm UV ışığı ile gerçekleştirilmiştir.

3.3.1.4. Banyolama (Develop Etme)

Fotolitografi sürecinde UV ışığına maruz bırakılarak yapısal özellikleri değiştirilen pozitif fotodirenç tabakasının, UV ışığa maruz kalan kısımların yüzeyden kaldırılması amacıyla yapılan kimyasal işlem banyolama (develop etme) olarak adlandırılır. Bu adımda kullanılan geliştirici çözelti, fotodirencin ışığa duyarlı bölgelerinde çözünme sağlayarak hedeflenen mikro desenlerin alt tabaka üzerinde açığa çıkmasını mümkün kılar. Bu çalışmada kullanılan AZ 5214-E tipi pozitif fotodirenç ile uyumlu olarak, AZ 400K isimli kimyasal tercih edilmiştir. Örnekler AZ 400K:DI su (1:4) karışımında 35-40 saniye bekletilmiştir. Ardından DI su ile durulanmış ve azot gazı ile kurutulmuştur.

3.3.1.5. Metalizasyon

YAD üretimi ve elektriksel karakterizasyon işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi için, örnek yüzeylerine uygun metal kontakların oluşturulması gerekmektedir. Bu amaçla, bu çalışmada metalizasyon işlemleri uygulanmıştır. Metal kaplamalar, çift odacıklı termal buharlaştırma sistemi (Vaksis Twin Chamber Thermal Evaporator) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Termal buharlaştırma süreci sırasında, metal filmlerin homojen şekilde yüzeye aktarılmasını ve oksidasyon gibi istenmeyen reaksiyonların önlenmesini sağlamak adına, işlem $\sim 2 \times 10^{-5}$ Torr düzeyinde yüksek vakum koşulları altında yürütülmüştür. Bu yöntemde, önce yaklaşık 10 nm kalınlığında krom (Cr) tabakası ara katman olarak buharlaştırılmış, ardından 150 nm kalınlığında altın (Au) tabakası kaldırılmıştır. Cr, Au ile alt tabaka arasında tutunma sağlamak amacıyla kullanılmıştır.

3.3.1.6. Lift-Off

Lift-off işlemi, örneklerin yüzeyindeki fotodirenç tabakasını çözerek sadece metal kontak alanlarında metalizasyon malzemesinin kalmasını sağlamak için uygulanır. Bu

tez çalışmasında, metal kaplı örneğin altında kalan fotodirençin çözülmesi için örnek asetonda bekletilmiştir.

3.3.2. Pizeoelektrik Fononik Kristal Fabrikasyonu

Elektriksel karakterizasyon kapsamında gerçekleştirilen S-parametresi ölçümleri sonucunda, istenilen frekans aralığında YAD üretimi elde edildiğinin belirlenmesinin ardından, PFK yapılarının üretimi FIB litografi yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

Bu litografi yöntemi, sıvı metal iyon kaynağı (Liquid Metal Ion Source – LMIS) kullanılarak üretilen ve genellikle Ga^{+} içeren yoğun bir iyon demetinin, belirli bir bölgeye yüksek hassasiyetle odaklanması esasına dayanır. Yüksek kinetik enerjiye sahip bu iyonlar, hedef yüzeye çarparak malzemenin fiziksel olarak uzaklaştırılmasını sağlar ya da uygun gaz ortamında iyon-kaynaklı biriktirme işlemleri gerçekleştirilir. Bu çok yönlü yapı sayesinde FIB sistemi, aynı anda hem görüntüleme, hem aşındırma hem de biriktirme işlevlerini yerine getirebilmektedir.

Aşındırma işlemi öncesinde yüzeyin kirlenmesini ve iyon implantasyonu kaynaklı hasarı önlemek amacıyla, 1.4 μm kalınlığında AZ 5214-E pozitif fotodirenç uygulanarak yüzey koruyucu bir tabaka ile kaplanmıştır. Ayrıca, alttaş olarak kullanılan $LiNbO_3$ kristalinin yarıiletken karakteri nedeniyle, iyon demetiyle yapılan işlem sırasında yüzeyde elektrostatik yük birikimini önlemek amacıyla, yüzey 55 nm kalınlığında bir Au tabakası ile kaplanmıştır. Bu ön işlemler sayesinde yüzeyin yapısal bütünlüğü korunmuştur. PFK yapılarının oluşturulmasına yönelik aşındırma işlemleri, 30 kV hızlandırma gerilimi altında Ga^{+} iyonları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu işlem koşulları altında, FIB yöntemiyle elde edilebilen aşındırma oranı, genel olarak 0.1–1$\mu m^3/nC$ aralığında değişmektedir. Literatürde, $LiNbO_3$ için bu değer yaklaşık 0.15 $\mu m^3/nC$ olarak rapor edilmiştir. Bu tez çalışmasında uygulanan iyon dozuna ve tarama parametrelerine bağlı olarak benzer bir aşındırma oranı elde edilmiştir. Böylece hedeflenen boyutsal hassasiyete sahip mikro yapıların başarılı bir şekilde üretilmesi sağlanmıştır.

3.3.3. PDMS Mikrokanal Fabrikasyonu

PDMS, biyolojik bozunmaya karşı yüksek direnç, biyouyumluluk, kimyasal stabilite, gaz geçirgenliği, iyi mekanik özellikler ve yüksek optik geçirgenlik gibi özellikler

sergileyen elastomerik yapıda bir polimerdir [44–46]. PDMS'in temel fiziksel özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir [47] .

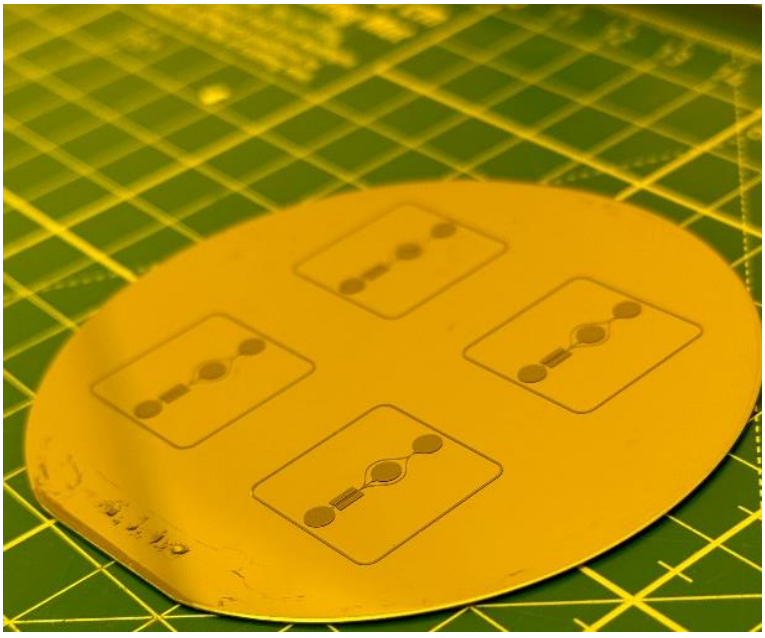
Tablo 3.3: PDMS'in Fiziksel Özellikleri [47].

Özellik	**Değer**
390–780 nm aralığında geçirgenlik (%)	75–92
Young modülü (kPa)	360–870
Poisson oranı	0.5
Çekme dayanımı (MPa)	2.24–6.7
Sertlik (Shore A)	41–43
Hidrofobiklik – temas açısı (°)	$\sim 108^\circ \pm 7^\circ$

PDMS'in sahip olduğu bu özellikler, onu birçok alanda ideal bir malzeme haline getirmiştir. Bu alanlar arasında mikropompalar [48], mikrovalfler [49], mikroakışkan sistemler ve bu sistemlerden biri olan akustoakışkan sistemler yer almaktadır [8, 50–52]. Mikroakışkan ve akustoakışkan sistemlerde kullanılan mikrokanal yapı malzemelerinin biyouyumlu, optik olarak geçirgen ve düşük maliyetli olması, bu sistemlerin uygulama potansiyelini önemli ölçüde artırmaktadır. PDMS, söz konusu tüm nitelikleri bir arada sağlaması sayesinde, bu alanda en yaygın tercih edilen malzemelerden biri hâline gelmiştir. Ayrıca PDMS hiperelastik davranış sergileyen bir malzemedir. Bu davranış, biyolojik dokuların davranışlarıyla benzerlik gösterdiğinden, özellikle kan damarlarının taklidi gibi uygulamalar için PDMS'i son derece uygun bir malzeme haline getirir [53]. PDMS'in optik geçirgenliğe sahip olması mikrokanal içerisindeki akış davranışlarının mikroskop altında doğrudan gözlemlenmesine olanak tanımaktadır [54]. Bu tez çalışmasında yüksek biyouyumluluğu, şeffaflığı ve ucuz olması nedeniyle mikrokanal üretimde PDMS tercih edilmiştir. Mikrokanalın geometrisini belirleyen SU-8 kalıp, Si yonga üzerinde fotolitografi yöntemiyle oluşturulmuştur. Mikroanal geometrisi, giriş ve çıkış kısımlarında 3 mm genişliğe, 0.1 mm kanal genişliğine ve 6 mm uzunluğa sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Üretilen SU-8 kalıp Şekil 3.5'te sunulmaktadır. Sylgard-184 elastomer kiti kullanılarak hazırlanan PDMS karışımı bu kalıp üzerine dökülmüş ve kürleme sürecine tabi tutulmuştur. PDMS'in kürlenmiş yapısının SU-8 kalıptan temiz ve deformasyonsuz bir şekilde ayrılabilmesi amacıyla, kalıp yüzeyine önceden silanizasyon işlemi uygulanmıştır. Bu işlem, kalıp yüzeyinde düşük yüzey

enerjisine sahip bir tabaka oluşturarak PDMS'in kalıba yapışmasını engellemekte ve ayrılabilirliğini artırmaktadır.

PDMS, doğası gereği hidrofobik bir polimer olup, yüzeyinde metil ($-CH_3$) grupları barındırır. Bu durum, PDMS'in diğer yüzeylerle kalıcı kimyasal bağ oluşturmasını kısıtlamaktadır [55]. Bu sorunun üstesinden gelmek amacıyla, PDMS yüzeyine oksijen plazma işlemi uygulanmıştır. Plazma ortamındaki reaktif oksijen türleri, yüzeydeki metil gruplarını uzaklaştırarak silisyum atomlarına hidroksil (Si–OH) gruplarının bağlanmasını sağlar. Bu dönüşüm, yüzeyin hidrofobik karakterini hidrofilik hale getirerek, silanol gruplarının diğer oksijenli yüzeylerle kovalent bağ oluşturmasına olanak tanır.



Şekil 3.5: Mikrokanal üretimi için kullanılan SU-8 kalıp

Bu tez çalışmasında kullanılan PDMS mikrokanal yapısı ile YX-128° yönelimli $LiNbO_3$ piezoelektrik alttaş üzerine önceden üretilmiş olan IDT ve PFK yapılarıyla kalıcı olarak birleştirilmesini sağlamak amacıyla, oksijen plazma işlemi 20 W güçte ve yaklaşık 1 mbar basınç altında 120 saniye süreyle uygulanmıştır. Her iki yüzeyin yüzeyleri arasında kalıcı bir bağlanma sağlamak amacıyla belirli bir süre boyunca ısıl işlem uygulanmaktadır. Bu çalışmada, doğrudan yüksek sıcaklığa maruz bırakıldığında oluşabilecek termal hasarları önlemek amacıyla sıcaklık başlangıçta 50 °C'ye ayarlanmış, ardından her bir dakikada

yaklaşık 10 °C artırılarak kademeli şekilde 70 °C'ye çıkarılmış ve bu sıcaklıkta 6 dakika süreyle bekletilmiştir. Bu kontrollü sıcaklık artışı sayesinde hem PDMS ile $LiNbO_3$ yüzeyleri arasında güçlü ve kalıcı bir bağlanma sağlanmış hem de piezoelektrik yüzeye entegre edilen metalik IDT parmak yapılarında deformasyon oluşması engellenmiştir.

PDMS ile $LiNbO_3$ arasındaki kalıcı bağlanmanın başarısı yalnızca yüzey aktivasyonuna bağlı değildir aynı zamanda bu bağın mekanik dayanımı ve sızdırmazlık performansı ile de doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, ara yüzeyin bütünlüğünü ve uygulamalardaki güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla çeşitli karakterizasyon yöntemlerine başvurulmaktadır. Bu yöntemler arasında öne çıkan çekme dayanımı testi ve sızdırmazlık testi, bağlanmanın hem fiziksel hem de işlevsel yeterliliğini ortaya koymada kritik rol oynamaktadır. Çekme testi, PDMS ile alttaş arasında oluşan bağ kuvvetini sayısal olarak değerlendirerek bağın mekanik dayanıklılığını ortaya koyarken sızdırmazlık testi, mikroakışkan kanal sisteminin sıvı geçirmezliğini test eder. Her iki yöntem birlikte ele alındığında, PDMS'in $LiNbO_3$ yüzeyine etkin biçimde yapışıp yapışmadığı hem yapısal hem de işlevsel yönleriyle kapsamlı bir şekilde analiz edilebilmektedir.

Bu çalışmada, bağ bütünlüğünün değerlendirilmesine yönelik olarak sızdırmazlık testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerde, iç çapı 1.8 mm olan PTFE tüp ile bağlanmış New Era 300 model programlanabilir şırınga pompası kullanılmıştır. Akış hızı başlangıçta 10 µL/dk olarak belirlenmiş; her adımda 50 µL/dk artışla 500 µL/dk'ya kadar çıkarılmıştır. Her bir akış hızı adımı sonrasında sistemin dengelenmesi için 5 dakikalık bekleme süresi uygulanmıştır. Çekme dayanımı ölçümleri ise Instron 8872 test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve 0.5 mm/dk uzama hızı ile test edilmiştir.

3.4. ELEKTRİKSEL ÖLÇÜMLER

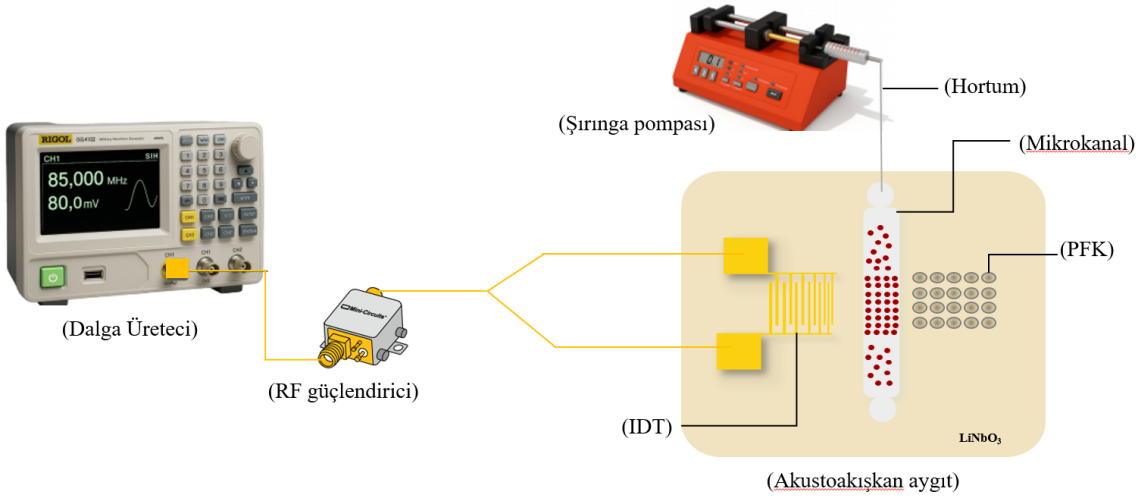
3.4.1. S-parametreleri Ölçümü

4.5.4'te IDT üretim süreci tamamlandıktan sonra, IDT'nin hedeflenen çalışma frekansında YAD üretimini değerlendirmek amacıyla S-parametreleri ölçümleri gerçekleştirilmiştir. S-parametreleri, çok portlu sistemlerde elektriksel sinyallerin frekansa bağlı olarak yansıma ve iletim davranışlarını tanımlar. Bu bağlamda, S_{11}/S_{22} parametresi sinyalin giriş veya çıkış portundan geri yansıyan bileşeninin yansıma

katsayısını, S_{21}/S_{12} parametresi ise sinyalin karşı porta iletilen bileşeninin iletim katsayısını gösterir. Bu tez çalışması kapsamında, karşılıklı üretilen iki IDT'den biri kaynak diğeri ise prob elektrodu olarak kullanılarak S-parametre ölçümleri alınmıştır. Ölçümler, PICO Vektör Ağ Analizörü (Vector Network Analyzer, VNA) ile 50–150 MHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir.

3.4.2. Mikroparçacık Örüntüleme Sistemi

Akustoakışkan aygıtın üretim süreci tamamlandıktan sonra, PDMS mikrokanal içerisinde oluşan durağan YAD'nın neden olduğu maksimum ve minimum akustik basınç dağılımları sayesinde mikroparçacık örüntülemesi gerçekleştirilmiştir. Bu örüntülemenin gözlemlenebilmesi için aygıt, 3 boyutlu yazıcı ile özel olarak tasarlanan bir tutucuya sabitlenmiş, gerekli elektriksel bağlantılar ise iletken tel ve gümüş iletken pasta kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında kullanılan deney düzeneği Şekil 3.6'da sunulmuştur. Çalışma sırasında, IDT'ye 84.925 MHz rezonans frekansında sinüzoidal bir sinyal uygulanmış (Rigol DG4102), bu sinyal dalga üreteciden çıktıktan sonra RF güçlendirici (Mini-Circuit, LZY-22+) aracılığıyla 100 kat güçlendirilerek kaynak IDT'ye iletilmiştir. Üretilen yüzey akustik dalgaların, PFK yapıdan yansımasıyla mikrokanal içerisinde durağan YAD alanları oluşmuş ve bu alanlarda oluşan maksimum ve minimum basınç bölgeleri, polistren mikroparçacıkların akustik düğümlerde toplanmasına ve belirli bir örüntü oluşturmasını sağlamıştır.



Şekil 3.6: Miroparçacık örüntüleme sistemi

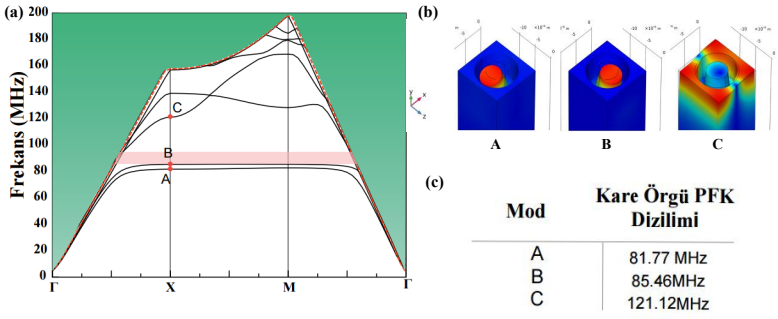
4. BULGULAR

4.1. PİEZOELEKTRİK FONONİK KRİSTALLERİN BANT YAPISI HESABI

FEM simülasyonlarında kare örgü dizilimine sahip PFK birim hücresi modellenmiş ve özfrekans değerleri k uzayında 1. Brillouin bölgesi içinde Brillouin bölgesi sınırlarında incelenmiştir. Kare örgü için **k** (dalga vektörü) sırasıyla $\Gamma \rightarrow X \rightarrow M \rightarrow \Gamma$ doğrultusunda taranmıştır. Şekil 3.3'te oluşturulan birim hücre içerisinde yer alan PFK modellemesinde kullanılan geometrik parametreleri şematik olarak göstermektedir. Tez kapsamında yürütülen simülasyon çalışmalarında, YX-128° $LiNbO_3$' ün aşındırma sırasında sahip olduğu duvar eğimi, yapılacak deneysel çalışmalar ile uyum içerisinde olması için simülasyonlarda da θ=10.2° olarak alınmıştır. Bunun yanı sıra deneysel çalışmalarda kullanılması planlanan YX-128° $LiNbO_3$ tanımlamasını yapabilmek adına simülasyonun yapıldığı COMSOL programında tanımlı Euler açıları (α, β, γ)=(0,-38°,0) şeklinde tanımlanmıştır.

Şekil 4.1'de kare örgü dizilimine sahip, halkasal oyuklardan oluşan FK yapıya ait dispersiyon eğrisi gösterilmektedir. Modelde, dış oyuk yarıçapı (r_d) 5 μm, sütun taban yarıçapı (r_i) 3 μm ve oyuk yüksekliği 6 μm olarak belirlenmiştir. Verilen grafikte kırmızı kesikli çizgi ile gösterilen eğri, PFK olmayan yapıya ait simülasyon sonucu elde edilen Rayleigh moduna ait eğriyi göstermektedir. PFK için gerçekleştirilen simülasyon sonucu Rayleigh modu dışına taşan sızıntı YAD modları, ilgili alanın üzeri yeşil renkle boyanarak gösterilmiştir.

Elde edilen sonuçlar neticesinde geniş frekans aralığında kare örgü dizilimine sahip PFK düzeni için yerelleşmiş kip band aralığı elde edilmiştir. Şekil 4.1a'da A ve B ile işaretlenen ilk iki bant, bu yapının sütununda meydana gelen bükülme ve genişleme modlarına karşılık gelen Bloch modlarını içermektedir. Buna karşılık, C harfiyle gösterilen üçüncü bant ise kare örgü dizilimine sahip PFK tasarımının içerdiği oyuğun anti-rezonans modlarına karşılık gelmektedir [56] .

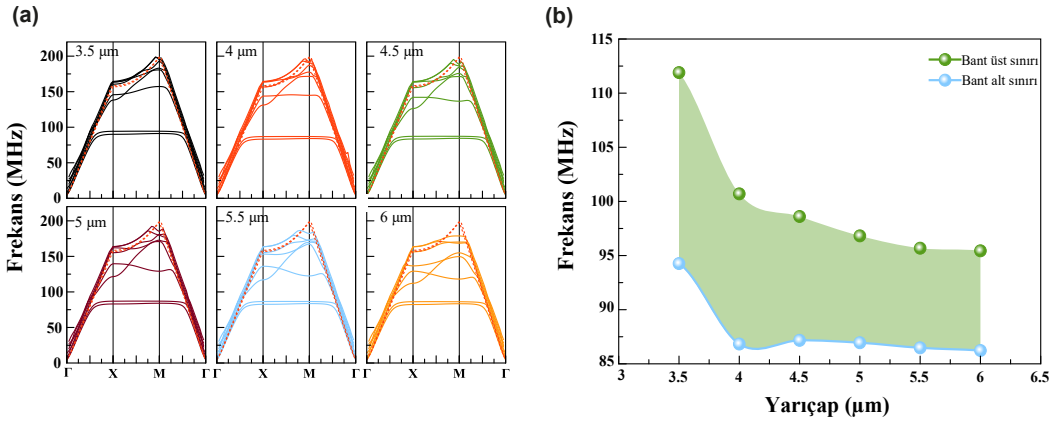


Şekil 4.1: Kare örgü dizilimine sahip fononik kristale ait a) dispersiyon eğrileri, b) dispersiyon eğrisine karşılık gelen yer değiştirme davranışları, c) modlara karşılık gelen frekans değerleri

Kare örgü dizilmine sahip PFK için elde edilen dispersiyon eğrilerinin davranışlarına sebep olan modların daha detaylı incelenebilmesi için yer değişim davranışları Şekil 4.1b'de ve bu modlara karşılık gelen frekans değerleri Şekil 4.1c'de verilmiştir. Sırası ile birinci, ikinci ve üçüncü dispersiyon eğrilerinin X dalga vektörü değerlerine karşılık gelen davranışlar görülmektedir. Kare örgü dizilimi için de sütun yer değiştirme davranışı sergilerken, birim hücrenin diğer bölgeleri için yer değişimi görülmemektedir. Bu nedenle, bu sütun yerelleşmiş rezonans modlarını uyarır. Antirezonans modlara karşılık gelen 3. dispersiyon eğrisinde, kare örgü dizilimine sahip örnekte sütun sabit kalırken, oyuk çevresinde maksimum yer değiştirme davranışı gözlenmiştir. Kare örgü dizilimlerinde elde edilen bant yapılarında yer değiştirme davranışlarının modlara bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Bant aralığı ve bant yapısı özellikleri geometrik parametrelerle yakından ilişkilidir, bu da malzemenin çeşitli frekans aralıklarındaki davranışının hassas kontrolüne ve özelleştirilmesine olanak sağlar [32]. Yapılan çalışmaların sonuçlarına göre, FEM simülasyonlarıyla PFK'nın r_d, r_i, h_o, h gibi geometrik değerlerin orantısal değişiminin bant yapısı ve bant aralığı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

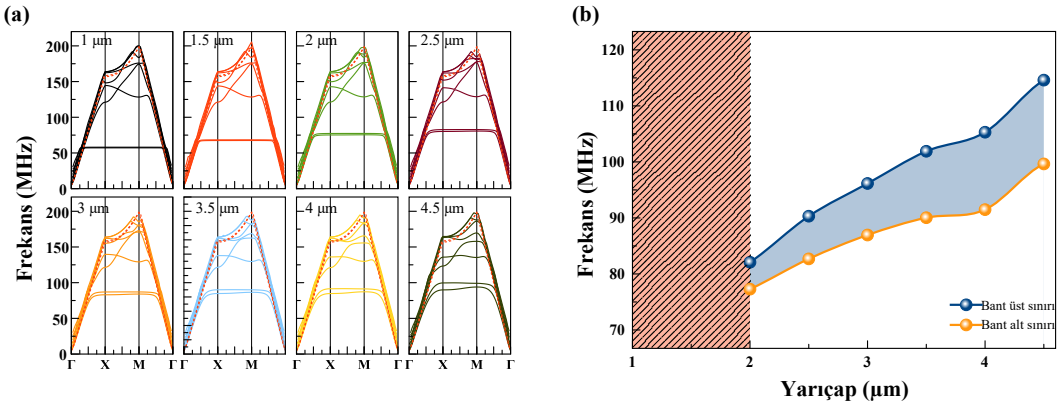
Farklı oyuk yarıçaplarına sahip olan PFK birim hücresinin kare örgü düzenine sahip olduğu durumda elde edilen bant profilleri Şekil 4.2a'da görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, bant aralığının alt sınırında oluşan iki düz bantın davranışında ve frekans değerinde herhangi bir değişim gözlenmemiştir. Daha yüksek frekans değerlerine karşılık gelen bantların ise oyuk geometrisiyle ilişkili olduğu ve artan yarıçapla daha düşük frekanslara kaydığı gözlenmiştir. Ayrıca, bantların karakteristiklerinin de oyuk çapıyla değiştiği görülmüştür. Şekil 4.2b'de, bant yapılarının incelenmesiyle elde edilen bant

aralığı sınırlarının oyuk yarıçapına göre nasıl değiştiği gösterilmektedir.



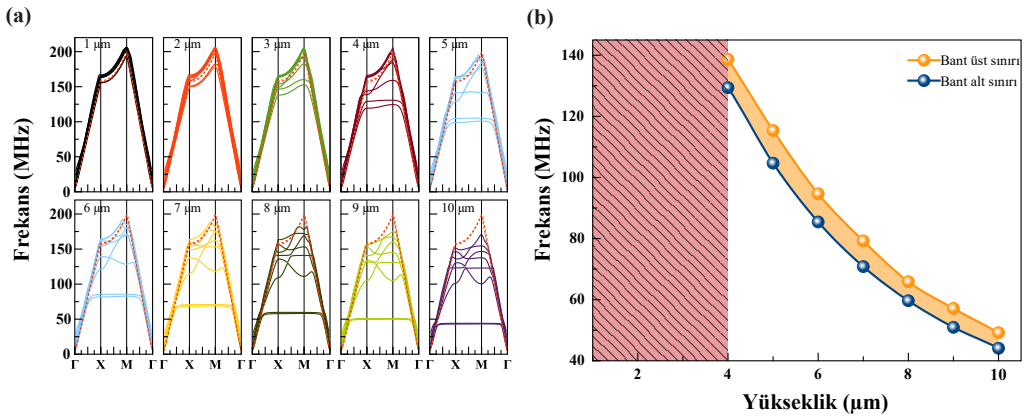
Şekil 4.2: a) Kare örgü dizilimine sahip birim PFK hücresinin dispersiyon eğrisinin r_d ile değişimi ve b) Dispersiyon eğrisi üzerinden elde edilen bant aralığı maksimum-minimum değerlerinin r_d ile değişimi.

Bir diğer çalışma, PFK modelinde yer alan sütun taban yarıçapının bant yapısına etkilerinin incelenmesi için gerekli olan simülasyonları içermektedir. Sütun taban yarıçapının artışı ile düşük frekans bölgesinde yer alan ilişkili bantların daha yüksek frekanslara doğru kaydığı Şekil 4.3a'da verilen bant profillerinde görülmüştür. Sütun rezonans modları ile ilişkili iki bant arasındaki frekans farkının da artan yarıçap ile birlikte artan davranış sergilediği görülmüştür. Oyuk yarıçapına bağlı bant değişimi incelemelerinden farklı olarak, r_i değeri 3μm'yi aştığında oyukla ilişkili olan üçüncü bantın karakteristiğinde de değişiklikler gözlemlenmiştir. Ancak, bu davranışın $LiNbO_3$'ün sahip olduğu aşındırma sonrası duvar eğiminin simülasyonda dikkate alınması nedeni ile oyuk ve sütun tabanları arasındaki boşluğun azalması ile bu iki yapının PFK tabanında birleşmesi sonucu oluştuğu düşünülmektedir. Şekil 4.3b'de kare örgü diziliminde bant aralığı ve sınırlarının görüldüğü frekans değerlerinin sütun taban yarıçapına bağlı olarak davranışı verilmiştir. Burada taralı olan bölge bant aralığının gözlenmediği geometrik PFK değerlerini ifade etmektedir.



Şekil 4.3: a) Kare örgü dizilimine sahip birim PFK hücresinin dispersiyon eğrisinin r_i değişimine göre gösterdiği davranış ve b) Dispersiyon eğrisi üzerinden elde edilen bant aralığı maksimum-minimumlarının r_i ile değişimi.

PFK modelinin yarıçap değerlerinin sabit tutularak oyuk yüksekliğinin değiştirilmesi sonucu elde edilen bant profilleri Şekil 4.4'te verilmiştir. Düşük oyuk yüksekliklerinde beklenildiği üzere bantların tümü Rayleigh modunu takip eden bir davranış sergilemektedir. Oyuk yüksekliğinin artmasıyla birlikte sütunla ilişkili olan bantların yarıçap davranışına benzer bir şekilde düşük frekans bölgesine doğru kaydığı görülmektedir. Buna ilaveten PFK geometrisinde yer olan oyuk ile ilişkili bant eğrilerinin, artan oyuk yüksekliği ile birbirinden ayrıştığı görülmektedir. Şekil 4.4b'de verilen, oyuk yüksekliğine bağlı olarak elde edilen bant aralığının minimum ve maksimum değerlerinin değişimi gösterilmektedir. Görüldüğü üzere bant aralığı sınırlarına karşılık gelen frekansların azaldığı ancak buna karşılık bant aralığının belirgin bir değişiklik göstermediği anlaşılmaktadır. Sütun taban yarıçapı ve oyuk yüksekliğinin değiştirilmesi sonucu bant sınırlarının ve bant aralığının değişim davranışı literatürde verilen farklı geometrik değerlere sahip olan PFK yapılarıyla uyum içerisindedir [32].

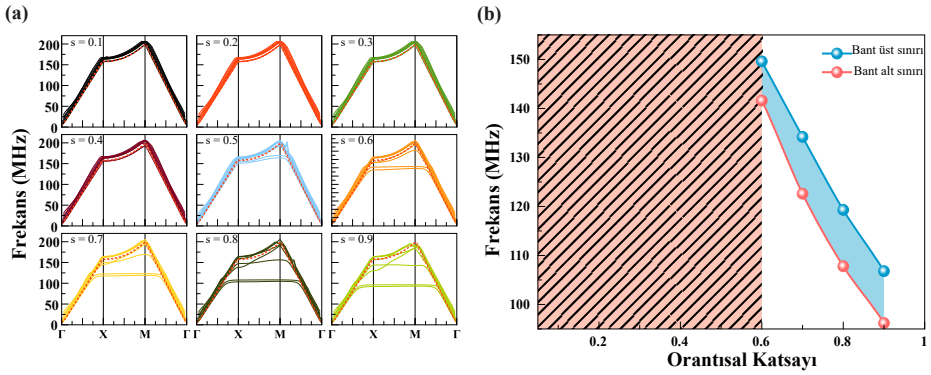


Şekil 4.4: a) Kare örgü dizilimine sahip birim PFK hücresinin dispersiyon eğrisinin h_o'ya bağlı değişimi ve b) Dispersiyon eğrisi üzerinden elde edilen bant aralığı maksimum-minimumlarının h_o ile değişimi.

PFK yapısının bant aralığı özelliklerini belirleyen temel geometrik parametreler olan r_i, r_d ve h birbirinden bağımsız olarak karşılaştırılmıştır. Tüm geometrik değişkenleri ortak bir ölçekte inceleyebilmek amacıyla, bu çalışmada bir orantısal katsayısı (S) tanımlanmıştır. Bu katsayı, her bir geometrik parametrenin referans boyutuna oranlanmasıyla elde edilen normalize değerleri ifade eder ve tüm parametrelerin aynı ölçekte değerlendirilmesine olanak tanır.

$$S = \begin{cases} r_i'/r_i \\ r_d'/r_d \\ h_o'/h_o \end{cases} \tag{4.1}$$

S'nin artmasıyla beraber bir bant aralığı oluşumu görülmüş ve bant aralığı elde edilen frekans değerlerinin artan orantısal sabitle düşük frekans bölgesine kaydığı görülmüştür (Şekil 4.5a). Kare örgü için bant sınırlarının elde edildiği frekans değerlerinin orantısal katsayıya bağlı değişimi Şekil 4.5b'de verilmiştir. Grafikte taralı olarak gösterilen bölgede kullanılan orantısal katsayı için bant aralığı gözlenmemiştir.

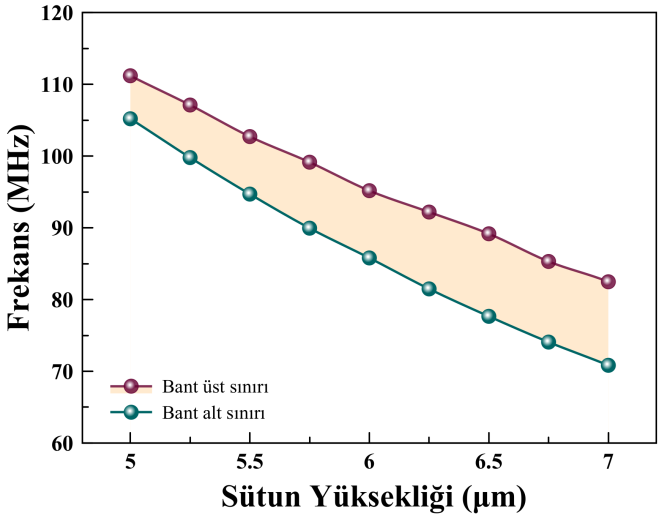


Şekil 4.5: a) Kare örgü dizilimine sahip birim PFK hücresinin dispersiyon eğrisinin *S* piezoelektrik fononik kristal yüksekliğine bağlı değişimi ve b) Dispersiyon eğrisi üzerinden elde edilen bant aralığı maksimum-minimumlarının *S* ile değişimi.

Yapılan simülasyon çalışmaları neticesinde PFK'nın bant aralığı sergilediği frekans bölgesi ve bant aralığının seçilecek geometrik parametreler ile ayarlanabildiği görülmüştür. Aynı zamanda, bant aralığı değerinin sütun taban yarıçapı ile arttırılabildiği ancak bunun PFK'nın bant aralığı sergilediği frekans değerini de arttırdığı görülmüştür.

Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, simülasyon çalışmalarında kullanılan geometrik parametrelerden hiçbiri, YKBA kenarlarını düşük frekanslara kaydırırken, YKBA genişliğini arttırma etkisine sahip değildir. Bu nedenle, yapılan çalışmalarda sütun yüksekliğinin oyuk yüksekliğinden bağımsız olarak değiştiği bir PFK modeli de FEM simülasyonlarıyla incelenmiştir.

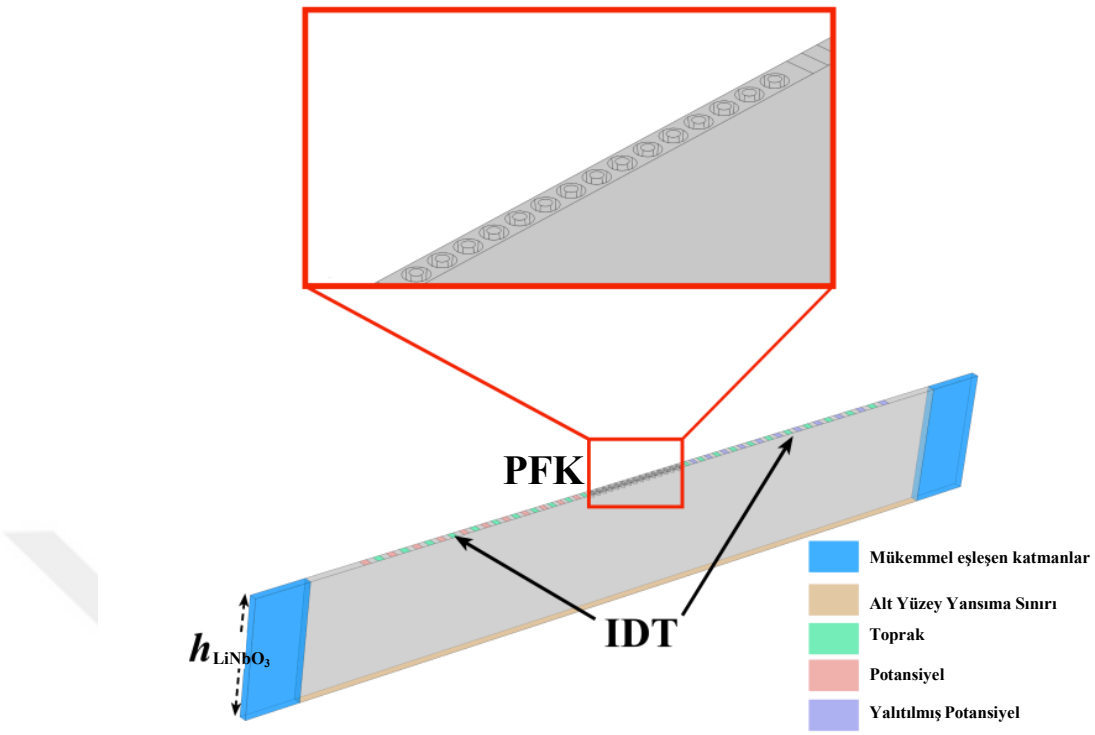
Şekil 4.6 incelendiğinde, sütun yüksekliği 5 μm olduğunda bant aralığının yaklaşık 110 MHz civarında olduğu ve genişliğinin 6 MHz olduğu görülmektedir. Sütun yüksekliği 7 μm'ye çıkarıldığında ise bant aralığı yaklaşık 75 MHz civarına kaymakta ve bant genişliği 11.6 MHz'ye yükselmektedir. Bu durum, sütun yüksekliği arttıkça yerel rezonansa bağlı bant aralığının daha düşük frekanslara kaydığını ve bant genişliğinin belirgin biçimde arttığını ortaya koymaktadır Şekil 4.6.



Şekil 4.6: Kare örgü dizilimine sahip birim PFK hücresinin r_d, r_i ve h_o değerlerinin sabit tutulup h değerinin değiştirlmesiyle elde edilen bant aralığı maksimum-minimumlarının değişimi.

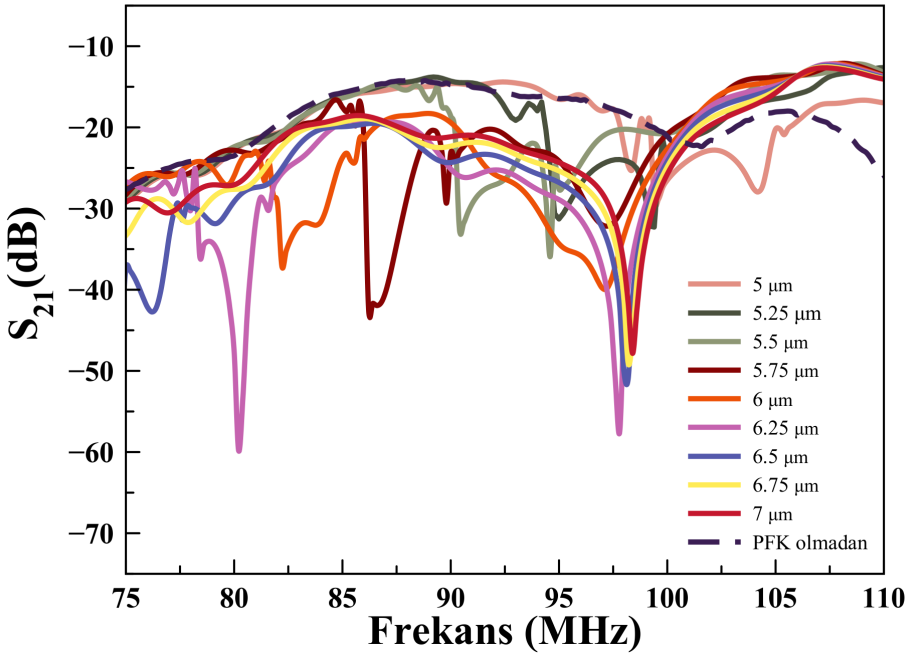
4.2. KARE ÖRGÜ İÇİN FEM İLE GEÇİRİM SPEKTRUMLARININ ELDE EDİLMESİ

PFK içeren yapılara ait geçirim spektrumları, frekans bölgesi FEM ile gerçekleştirilen simülasyonlar aracılığıyla elde edilmiştir. Bu simülasyonlarda, Rayleigh tipi YAD üretilebilmesi amacıyla, RF sistemlerinde dalga üretiminde yaygın olarak kullanılan IDT'ler modelde yer alacak şekilde tasarlanmıştır. YAD geçirim spektrumları, Şekil 4.7'de gösterildiği gibi, birbirine bakan iki özdeş IDT ve aradaki bir PFK dizisi içeren model üzerinden simüle edilmiştir. Tasarlanan IDT yapılarında, frekans aralığını genişletmek amacıyla değişken parmak genişliği uygulanmıştır. Parmak genişlikleri $9\,\mu$m ile $14\,\mu$m arasında olacak şekilde belirlenmiş; parmak genişliği adımı $|\Delta w|$ ile gösterilmiş ve bu değer $\Delta w = 0.5\,\mu$m olarak seçilmiştir. Ayrıca, her bir IDT'de yer alan parmak çifti sayısı N_p ile ifade edilmekte olup, tüm yapılar için bu sayı sabit olarak $N_p = 11$ alınmıştır. YAD'ın yayılım yönüne paralel olarak konumlandırılan PFK dizisi, 15 periyottan oluşacak şekilde tasarlanmış ve bu yapı, IDT'ler arasında eşit aralıklarla yerleştirilerek simülasyon modeline entegre edilmiştir. Şekil 4.7'de soldaki IDT yüzey akustik dalgayı (YAD) yaymak üzere kaynak olarak tanımlanmış, ve 50V RF sinyali uygulanmıştır. Sağ taraftaki IDT, potansiyel (V_{probe}) tanımı ile geçen sinyali belirlemek için kullanılır.

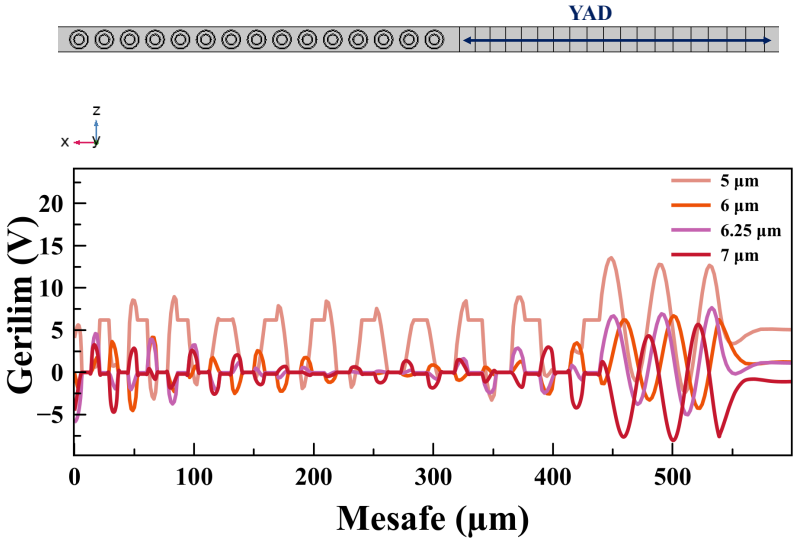


Şekil 4.7: Geçirim spektrumu simülasyonlarında kullanılan 3-boyutlu model ve model içerisinde yer alan PFK dizisinin yakınlaştırılmış görüntüsü.

YAD geçirgenliği (S_{21}), $S_{21} = 20 \times log(V_{probe}/V_0)$ eşitliği ile V_0= 50 V'nin üretilen RF YAD'ın genliği ile hesaplanır. Mükemmel eşleşen katmanlar, YAD yayılımı yönünde modelin kenarına yerleştirilmiştir ve alt taraf, istenmeyen yansımaları en aza indirmek için düşük yansıtmalı bir sınır olarak tanımlanmıştır. Modellenen yapının karşılıklı yan yüzeyleri için periyodik şart tanımlanmış ve modelin sürekliliği sağlanmıştır. PFK bant davranışı analizlerinde hem bant aralığının genişlemesi hem de düşük frekanslara doğru çalışma frekansının değiştirilebilmesi nedeni ile sütun yüksekliğine bağlı olan geçirim spektrumları incelenmiştir (Şekil 4.8). Geçirim spektrumlarında 80 MHz ve 100 MHz civarında 2 zayıflama piki belirlenmiş ve bunlardan 100 MHz civarında olan genel olarak daha yüksek zayıflama genliği sergilemiştir. Elde edilen spektrumlardan zayıflama piklerinin genlikleri ve frekans davranışları incelendiğinde pikler arasındaki frekans farkının giderek arttığı ve pik elde edilen frekansın daha düşük frekans bölgesine doğru kaydığı görülmüştür. Ayrıca pik genlikleri incelendiğinde, spektrumlarda görülen 2 pik için genliğin sütun yüksekliği oyuk yüksekliğine ulaşıncaya kadar arttığı ve sonrasında azalan bir davranış sergilediği görülmektedir Şekil 4.9.

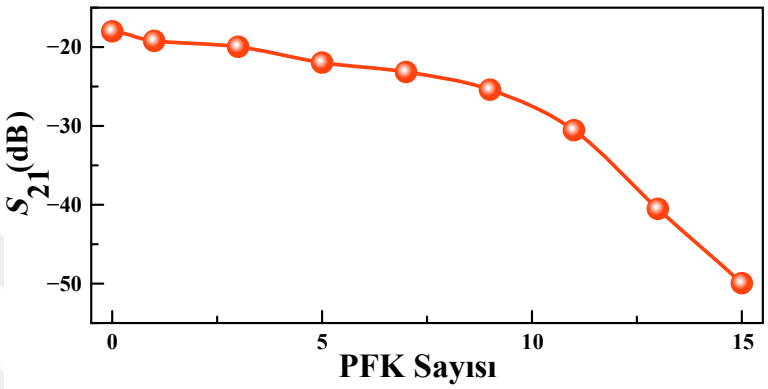


Şekil 4.8: Geçirim spektrumlarının farklı sütun yüksekliğine göre değişimi.



Şekil 4.9: Farklı halka şekilli PFK sütun yükseklikleri için hesaplanan elektriksel potansiyel dağılımının kesit görünümü, ilgili S_{21} ana pik frekanslarında (sırasıyla 99.4 MHz, 97.2 MHz, 97.8 MHz ve 98.4 MHz) hesaplanmıştır. b) Farklı sütun yükseklikleri için alltaş yüzeyindeki elektrik potansiyeli dağılımı ve probe IDT üzerindeki hat profilindeki voltaj dağılımı.

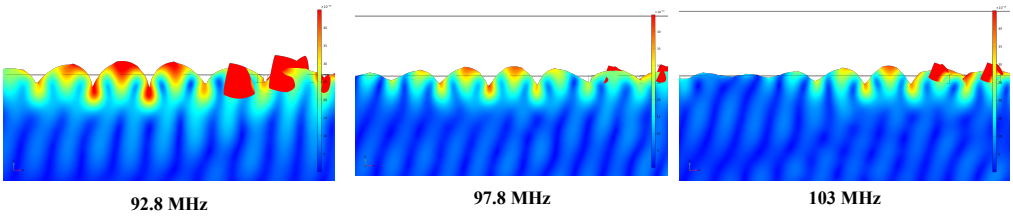
PFK'ların YAD geçirim performansı için hesaplanması gereken diğer bir değişken ise üretilmesi gereken ardaşık PFK sayısıdır. Bu nedenle 0-15 ardışık PFK dizisi için geçirim spektrumları FEM simülasyonları ile incelenmiştir. IDT çifti arasındaki PFK sayısı 9 olana kadar belirgin bir YAD sönümlemesi gözlenmezken, Şekil 4.10'de görüldüğü üzere artan PFK ile YAD sönümleme becerisi hızlıca artan bir karakteristik sergilemektedir.



Şekil 4.10: IDT çifti arasında yer alan piezoelektrik PFK dizi sayısına bağlı YAD sönümlemesinin değişimi.

4.3. PFK İLE DURAĞAN YAD ELDE EDİLMESİ

Bant dispersiyon davranışları ve geçirim spektrumu özellikleri belirlenen PFK kullanılarak durağan YAD elde edilmesine yönelik simülasyon çalışmaları, geçirim spektrumu simülasyon çalışmalarına benzer bir model kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Geçirim spektrumu simülasyonlarından farklı olarak karşılıklı yerleştirilmiş IDT çifti yerine IDT-PFK çifti kullanılmış ve bu iki yapı arasında kalan bölgede durağan YAD incelemesi yapılmıştır.



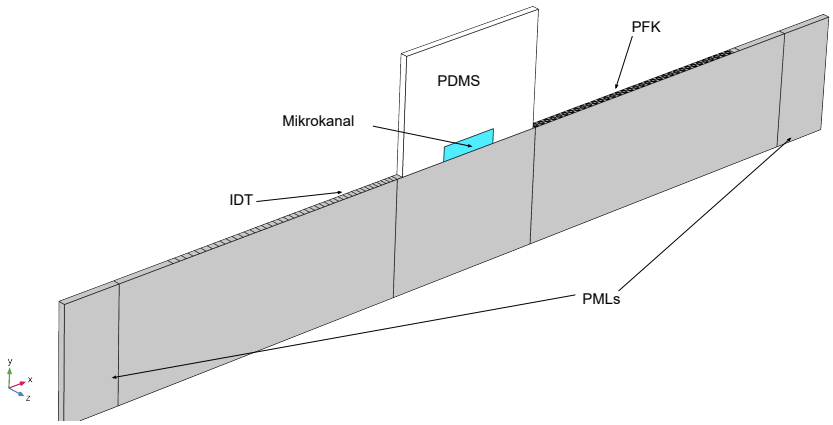
Şekil 4.11: Durağan YAD oluşumunun farklı frekanslar için gösterimi.

Şekil 4.11'de modellenen sistem üzerinde yer değiştirme değerlerinin görselleştirilmiş hali görülmektedir. Uyarım gerçekleştirmesi için tanımlanan IDT ve PFK arası incelendiğinde duran YAD oluşumu görülmektedir. Aynı zamanda Şekil 4.8'te verilen spektrumlar dikkate alındığında YAD elde edilmesinin mümkün olacağı frekans aralığı belirlenebilir. Buna göre genel olarak tüm modeller için 93 MHz-103 MHz aralığında durağan YAD elde edilmiştir.

4.4. MİKROAKIŞKAN AYGITLARIN SAYISAL TASARIMI

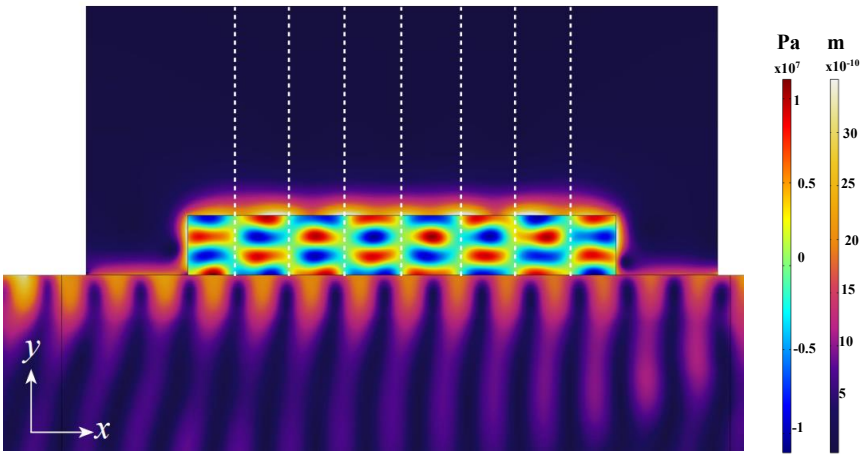
4.4.1. Mikrokanal İçerisinde Düğüm Noktalarının Simülasyon ile Elde Edilmesi

IDT-PFK dizisi arasındaki mesafe $7\lambda_0 \approx 280\,\mu$m, uyarım frekansı f_0=97.2 MHz (minimum S_{21} değerinin elde edildiği frekans) alınmıştır. 3B FEM simülasyonunda PDMS yüksekliği ve genişliği sırasıyla $200\,\mu$m ve $6.5\lambda_0 \approx 260\,\mu$m alınmıştır. 2 parametreli Mooney-Rivlin hiperelastik malzeme modeli ile tanımlanan PDMS yoğunluğu r_P=970 kg/m^3, yığınsal (bulk) modülü K=962 MPa, Mooney-Rivlin model parametreleri C_{10}=30.8 kPa ve C_{01}=0 kPa alınmıştır. Su yoğunluğu r_w=998 kg/m^3 ve suda ses hızı c_w=1488 m/s alınmıştır.



Şekil 4.12: Mikrokanal içerisinde basınç düğüm noktalarının simülasyon ile elde edilmesinde kullanılan 3-boyutlu model.

Şekil 4.12'de mikrokanal içerisinde basınç düğüm noktalarının incelenmesi için oluşturulan model gösterilmiştir. Piezoelektrik çoklu fizik modülüne ek olarak mikrokanal



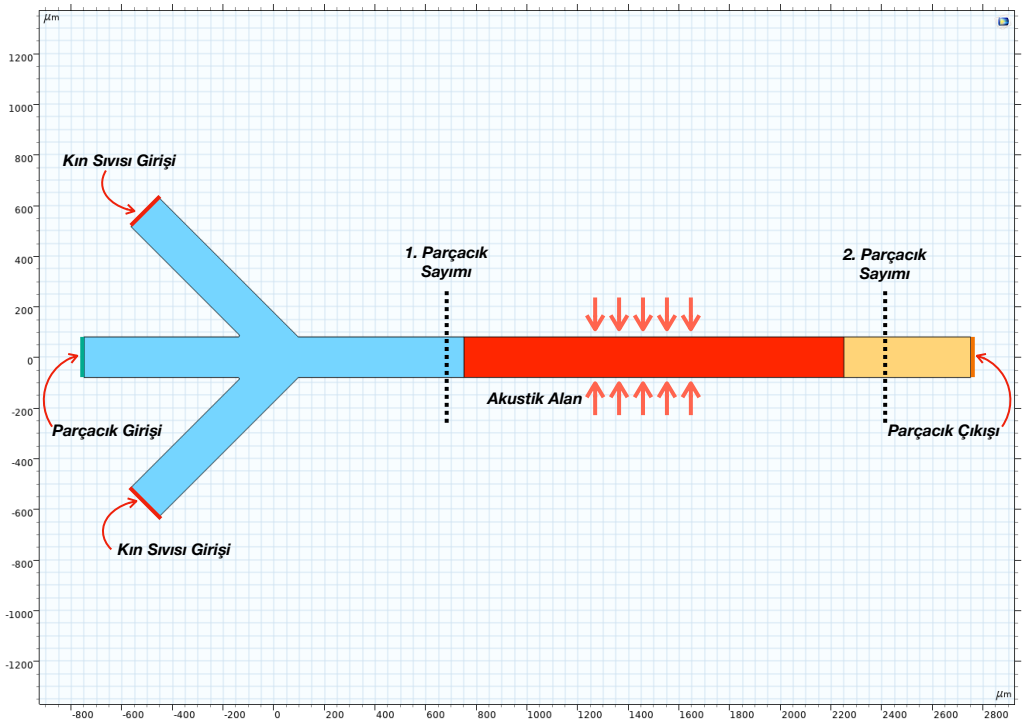
Şekil 4.13: Mikrokanal içerisinde basınç düğüm noktalarının ve piezoelektrik malzeme yüzeyinde durağan YAD oluşumunun gösterimi.

düğüm noktalarının incelenmesi için akustik-yapı sınır çoklu fizik modülü eklenerek FEM simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Mikrokanal ve referans PFK geometrisi kullanılarak oluşturulan modelde, PFK'nın maksimum YAD zayıflattığı rezonans frekansında mikrokanal içerisinde 7 adet basınç düğüm noktası elde edilmiştir. Mikrokanaldaki basınç dağılımı ile piezoelektrik malzeme yüzeyindeki yer değiştirmeyi gösteren simülasyon sonucu Şekil 4.13'te sunulmuştur.

Elde edilen bu sonuçlar neticesinde mikrokanal geometrisinin ayarlanması sonucu mikrokanal içerisinde durağan YAD'ın yer değiştirmesini takip edecek şekilde düğüm noktalarının elde edilmesi gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarında mikrokanal içerisinde MPa mertebesinde basınç değerine sahip olan düğüm noktalarının elde edilmesi, mikrokanal içerisinde mikroparçacık örüntüleme için yeterli ayrıştırmayı sağlamıştır.

4.4.2. Mikrokanal İçerisinde Mikroparçacıkların Örüntülenmesinin Simülasyon ile İncelenmesi

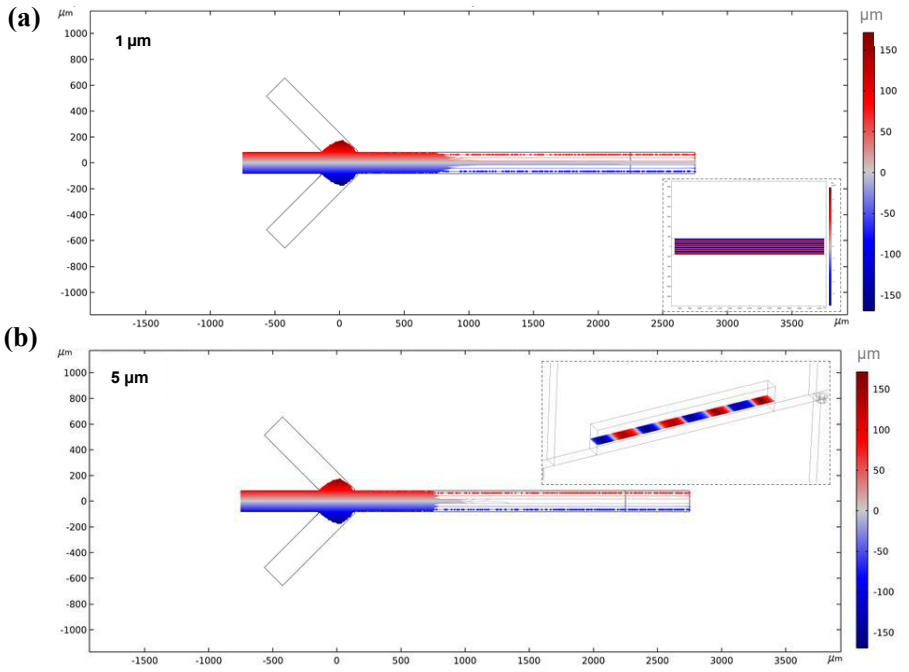
Mikrokanal içerisinde mikroparçacık örüntülenmesi için gerekli düğüm noktalarının elde edilmesi sonrasında, akustik alan kaynaklı bu düğüm noktalarının yer aldığı basınç alanı ile mikroparçacıkların etkileşiminin simülasyon çalışması ile incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyon çalışması için IDT, PFK ve PDMS mikrokanal



Şekil 4.14: 1 μm-5 μm arasında boyutlara sahip polistiren mikroparçacıkların su içeren mikrokanalda 1 boyutlu akustik örüntülenmesinin incelenmesi için göz önünde bulundurulan 2B hesaplama modeli.

yapılarının tümünün 3-boyutlu olarak simülasyon modelinde incelenmesinin getirdiği işlem yükü nedeniyle problem aşamalı olarak ele alınmıştır. Bir önceki bölümde sonuçları verilen kanal içerisinde yer alan düğüm noktaları sonucundan faydalanarak, kanal içerisindeki basınç dağılımı 2B olarak başka bir simülasyon modeline aktarılmıştır. Bu sayede mikrokanal içerisinde akustik alan ile oluşturulan basınç bölgesinde parçacıkların izledikleri yol simüle edilmiştir.

Şekil 4.14'te verilen geometriye sahip bir model kullanılarak tek bir kanaldan mikroparçacık girişi tanımlanmıştır. Şekil 4.14'te kırmızı ile gösterilen kısımda $p(y) = p_0.cos(k.y)$ şeklinde akustik alan tanımlanmıştır. 2 faklı noktadan kesit içerisinde geçen parçacık sayımı yapılarak akustik alan sonrasında parçacıkların düğüm noktalarına yerleşmeleri sayısal olarak belirlenmiştir. Polistiren mikroparçacıklar için parçacık yoğunluğu ρ_p=1060 kg/m^3 olarak alınmıştır. Kanal içerisinde parçacıkların sürüklenme hızı ve kın sıvısı kolarak kullanılan deiyonize suyun (DI su) akış hızı eşit ve 1 mm/s olarak kabul edilmiştir. Mikroparçacıkların kanala girişi, kanal başlangıcından rastgele yayılacak şekilde tanımlanmıştır. Farklı boyutlarda parçacıkların kanal içerisinde akustik

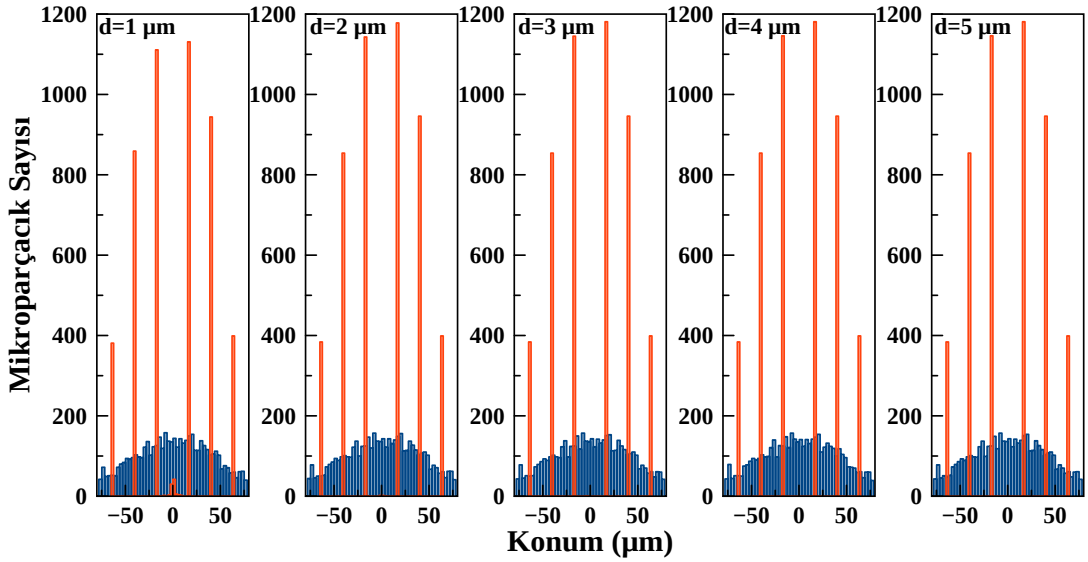


Şekil 4.15: Kın sıvısı kullanılmayan durumda farklı boyutlardaki mikroparçacıkların akustik alan etkisiyle örüntülenmesi: a) $1\,\mu$m çapındaki mikroparçacıkların örüntülenmesi; alttaki iç şekil, mikroakışkan kanal içerisinde tanımlanan akustik basınç dağılımını göstermektedir. b) $5\,\mu$m parçacık çapındaki mikroparçacıkların örüntülenmesi; üstteki iç şekil, ilgili kanal içerisindeki akustik basınç dağılımını göstermektedir.

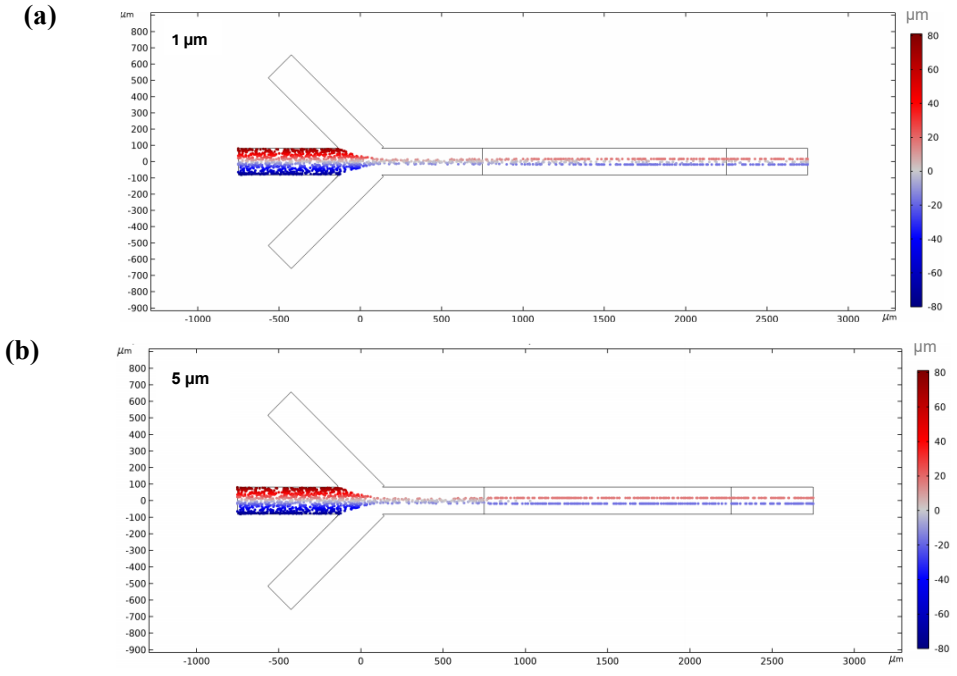
alan ile dağılımları aynı zamanda kın sıvısı ile kanal merkezine odaklanmış durum için de incelenmiştir.

Şekil 4.15a ve b'de kın sıvısı olmaksızın mikrokanal içerisinde farklı boyutlardaki mikroparçacıkların akustik alan ile etkileşmeleri sonucu izlemiş oldukları rotalar görselleştirilmiştir. Şekil 4.16'da mikrokanal kesitinden geçen farklı boyutlardaki mikroparçacık sayılarının kanal konumuna göre dağılımları görülmektedir. Mavi sütunlar mikroparçacıkların akustik alana girmeden önceki dağılımlarını verirken kırmızı sütunlar akustik alandan çıktıktan sonra mikroparçacıkların dağılımını vermektedir. Görüldüğü üzere farklı mikroparçacık boyutları için $\lambda/2$ aralıklarla örüntüleme gözlenmiştir.

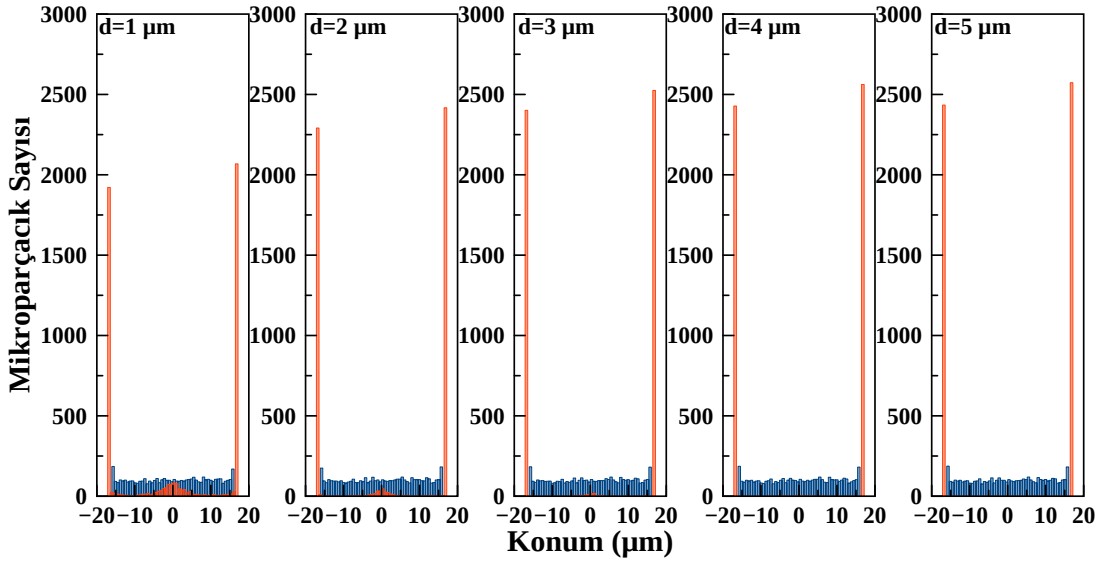
Kın sıvısı ile mikrokanal merkezine odaklanan farklı boyutlardaki mikroparçacıkların davranışlarını gösteren simülasyon sonucu Şekil 4.17a ve b'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere mikroparçacıklar akustik alan içerisine girdiklerinde kanal içerisindeki düğüm noktalarına doğru ilerlemektedir. Parçacık sayımı için tanımlanan kesitlerden elde edilen farklı boyutlardaki mikroparçacık dağılımları Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.16: Kın sıvısı kullanılmadığı durumda $1\,\mu$m-$5\,\mu$m çaplarındaki mikroparçacıkların mikrokanal içerisindeki enine konuma göre dağılımları. Mavi sütunlar akustik alan öncesindeki ve kırmızı sütunlar akustik alan sonrasındaki mikroparçacık dağılımlarını göstermektedir.



Şekil 4.17: Kın sıvısı kullanılarak mikroparçacıkların kanal merkezine odaklanması durumunda a) $1\,\mu$m, b) $5\,\mu$m çapındaki parçacıklar için akustik alan ile mikroparçacıkların örüntülenmesi.



Şekil 4.18: Kın sıvısı kullanılarak 1 μm-5 μm çapındaki mikroparçacıkların konuma göre dağılımları. Mavi sütunlar akustik alan öncesindeki ve kırmızı sütunlar akustik alan sonrasındaki mikroparçacık dağılımlarını göstermektedir.

1 μm, 2 μm ve 3 μm çaplı mikroparçacıkların bir kısmı düğüm noktalarına ayrışmayarak kanal merkezi boyunca ilerlemeye devam etse de 4 μm ve 5 μm çaplı parçacıkların tümü düğüm noktalarına örüntülenmiştir. Böylelikle kın sıvı olmaksızın ve kın sıvısı ile kanal merkezine ortalanmış mikroküreciklerin 1 μm-5 μm açap aralığındaki parçacıklar, %90 üzerinde bir oranda düğüm noktalarına örüntüleme simülasyon sonuçları ile elde edilmiştir.

4.5. AKUSTOAKIŞKAN AYGIT KARAKETERİZASYONU

4.5.1. IDT Karakterizasyonu

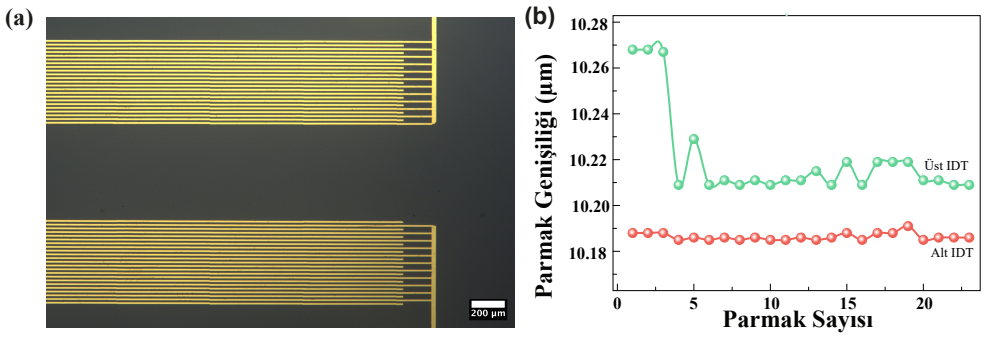
IDT metal elektrotların üretimi amacıyla, tez çalışması kapsamında piezoelektrik malzeme olarak seçilen YX-128° yönelimli $LiNbO_3$ kristali üzerinde litografi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Elektrot desenlerinin oluşturulmasında, tez süresince hem Elektron Demeti ile Litografi (EBL) yöntemi hem de fotolitografi yöntemi kullanılmıştır. Bu iki yöntem, farklı çözünürlük gereksinimlerine ve uygulama adımlarına bağlı olarak seçilmiş ve üretim süreci her iki tekniğin avantajlarından yararlanacak şekilde planlanmıştır. Çalışmalarda kullanılan IDT yapıları, iki farklı geometrik tasarıma sahiptir. İlk tasarımda,

parmak genişlikleri $10\,\mu$m olacak şekilde sabit tutulmuştur. İkinci tasarımda ise merkez parmak genişliği $11.5\,\mu$m olarak belirlenmiş ve bu merkezden itibaren $\pm 0.5\,\mu$m adımlarla değişen parmak genişlikleri kullanılarak değişken aralıklı bir yapı oluşturulmuştur.

EBL yöntemi ile IDT üretiminde pozitif ton EBL direnç olarak PMMA-A7 kullanılmış ve 10 kV hızlandırma gerilimi ile litografi işlemleri gerçekleştirilmiştir. EBL yönteminde, yüksek enerjili elektronların $LiNbO_3$ yüzeyinde neden olduğu yük birikimi, IDT deseninin bozulmasına yol açabileceğinden, tüm EBL işlemleri öncesinde yüzey termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak yaklaşık 5-10 nm kalınlığında Au tabakası ile kaplanmıştır. Bu iletken katman, yüzeydeki yük birikimini önleyerek litografi sürecinin kararlı bir şekilde yürütülmesini sağlamıştır. Potasyum iyodür (KI) ve iyot (I_2) içeren bir çözelti (KI/I_2) içerisinde bekletilen örnekten, iletkenlik amacıyla geçici olarak kaplanmış olan altın tabaka uzaklaştırılmıştır. Bu işlemin ardından, örnek metil izobütil keton (MIBK) ve IPA içeren 1:3 oranındaki geliştirici çözeltiye daldırılarak banyolama işlemine tabi tutulmuştur. Banyolama aşamasında, yalnızca elektron demetine maruz kalan bölgelerdeki direnç çözündürülerek kaldırılmış ve böylece yüzeyde IDT desenleri başarıyla oluşturulmuştur.

IDT deseni oluşturulmuş $LiNbO_3$ üzerine metal kaplama işlemi termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 5 nm Cr tabakası yüzey tutuculuğunu arttırmak için öncelikle yüzeye kaplanmış ve bunun ardından 100 nm Au tabaka elektrot metali olarak kaplanmıştır. Metal buharlaştırma işlemi ardından yüzeyden istenmeyen metal kısımların EBL rezisti ile birlikte uzaklaştırılması için örnek organik çözücü içerisinde (Aseton, PG-Remover vb.) bekletilmiş ve tüm istenmeyen kısımların uzaklaştırılması sonrasında kurutularak karakterizasyon işlemlerine geçilmiştir. IDT çalışmasını etkileyecek olası parmaklar arasında kopukluk ya da kısa devre oluşturacak kalıntıların incelenmesi için Şekil 4.19a'da verildiği gibi optik mikroskop incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.19a'da görüldüğü gibi IDT parmakları arasında herhangi bir kısa devre ya da parmaklar üzerinde bir kopukluk olmaksızın üretim işlemi tamamlanmıştır. Optik mikroskop görüntüleri üzerinden IDT parmak kalınlıklarının ve aralıkların istenilen boyut değerlerine sahip olup olmadıklarının kontrolü için karşılıklı IDT çiftlerinin parmak kalınlıkları ölçülmüştür.

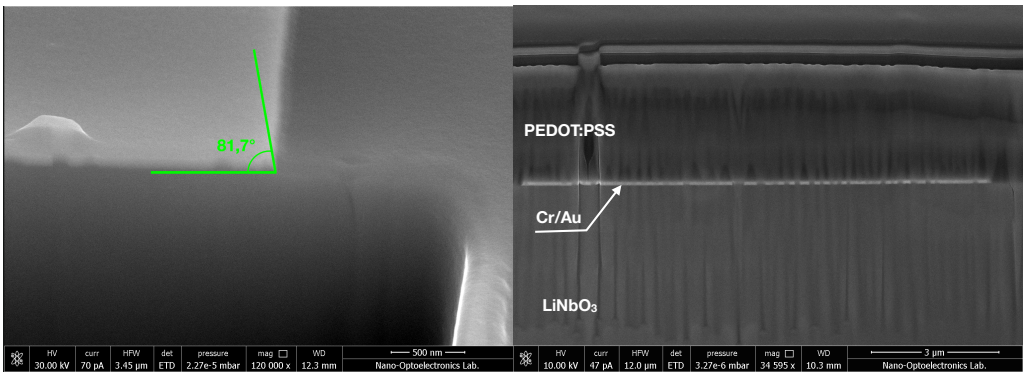
$10\,\mu$m sabit parmak genişliğine sahip olacak şekilde tasarlanan IDT çiftine ait



Şekil 4.19: a) EBL ile elde edilen karşılıklı IDT çiftine ait optik mikroskop görüntüsü ve b) IDT çiftinin parmak genişliğinin sahip olduğu değerlerin parmak sayısına bağlı olarak değişimi.

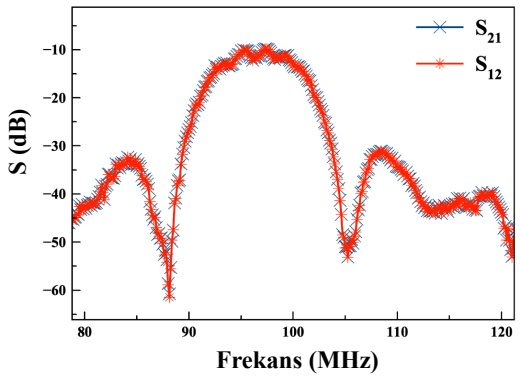
üretim sonrası elde edilen boyutsal değerler, Şekil 4.19b'de grafik olarak verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere tüm IDT parmak boyutları birbirleri ile özdeş değerlere sahiptir. IDT üretim sürecinin karakterize edilmesi için yapılan çalışmalardan bir diğeri de kaplama kalınlığının, metal alttaş yüzeyinin homojenliğinin ve metalin yüzeye başarıyla tutunduğunun incelenmesi ve IDT parmak kenarlarının olabildiğince dik duvar eğimlerine sahip olduğunun belirlenmesidir. Bu incelemelerin optik mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmesinin mümkün olmaması nedeniyle incelemeler taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope, SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ancak, SEM gözlemleri sırasında yalıtkan yüzey kaynaklı yüklenme etkisini önlemek amacıyla, örnek yüzey iletken bir polimer olan *Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):Polystyrene sulfonate* (PEDOT:PSS) ile kaplanmıştır. SEM ile kesit görüntüleri elde edilebilmesi için ise PEDOT:PSS kaplı IDT yapılar, FIB kullanılarak lokal olarak aşındırılmış ve böylece Şekil 4.20'de görülen kesit görüntüleri elde edilmiştir.

Bu kesit görüntüler üzerinden yapılan incelemelerde, IDT parmak genişliğinin 10.4 μm olduğu ve kenar duvar eğiminin 81.7°'lik değere sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca IDT parmağının 104 nm Cr/Au kalınlığına sahip olduğu ve parmak boyunca homojen kalınlığını koruduğu görülmüştür.



Şekil 4.20: IDT üretiminde kullanılan Cr/Au metal tabakanın kesit SEM görüntüleri.

Bunun yanısıra kesit görüntüsü ile metalizasyon işlemi ile alttaş üzerine başarılı yüzey tutuculuğunun sağlandığı görülmektedir. EBL kullanılarak üretilen IDT çiftinin optik mikroskop ve SEM incelemeleri her ne kadar özdeş yapıya sahip olduklarını gösterse de, özdeş elektriksel karakteristik sergilediklerinin de ayrıca teyit edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle IDT çifti için S-parametresi ölçümü elde edilmiştir.

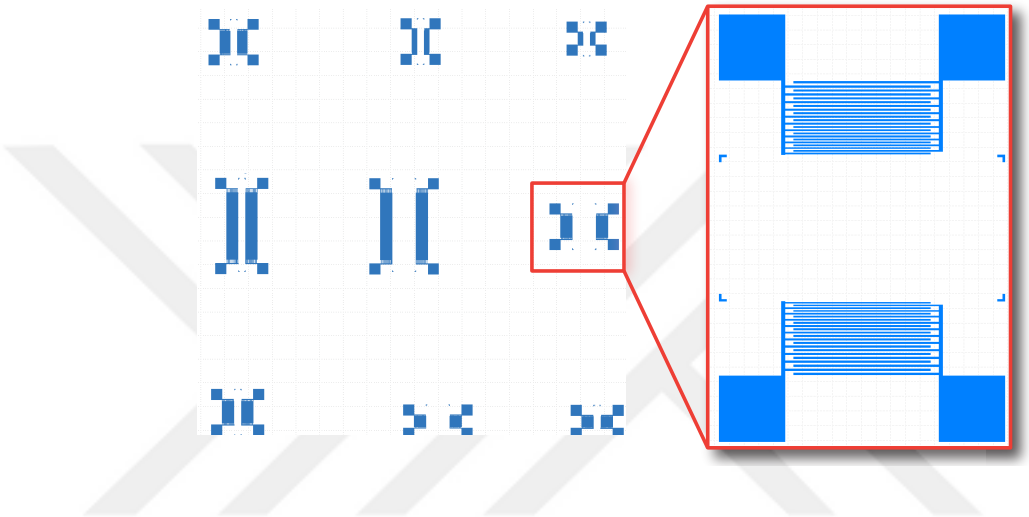


Şekil 4.21: Karşılıklı IDT çiftine ait geçirim spektrumları.

Şekil 4.21'de görüldüğü üzere karşılıklı IDT çifti ile elde edilen S_{12} ve S_{21} ölçümleri birbirleri ile özdeş davranış sergilemiştir. Bu sonuç doğrultusunda EBL ile üretilen IDT çiftlerinin yapısal olarak özdeşliğinin yanı sıra elektriksel olarak da özdeş davranış sergilediği görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.21'de görülen S-parametresine ait tepe noktaları yaklaşık olarak 96.25 MHz civarında görülmekte ve bu değer yapılan yapısal incelemelerde belirlenen parmak genişlikleri ile uygun bir sonuç teşkil etmektedir.

EBL yöntemi her ne kadar tasarım aşamasında serbestlik tanısa da, $LiNbO_3$ üzerinde

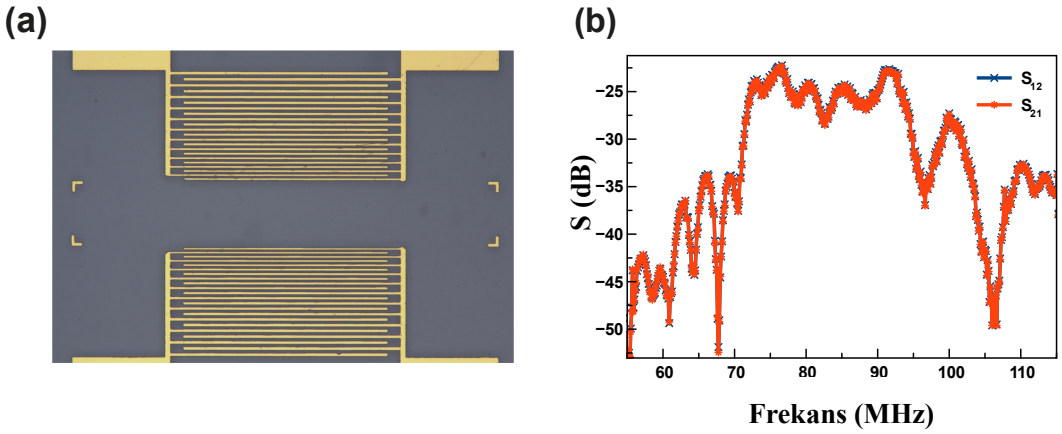
üretim aşamasında ihtiyaç duyulan ilave işlemler üretim sürecini karmaşıklaştırıp malzeme ve zaman kaybına neden olmaktadır. Bu nedenle IDT üretimi için fotolitografi kullanımı süre ve malzeme tüketimi açısından daha pratik bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Fotolitografi ile IDT üretiminde kullanılan maske tasarımı Şekil 4.22'de verilmiştir. IDT ile oluşturulan YAD band genişliğini arttırmak için 11.5 μm merkez parmak genişliği olmak üzere $\pm$0.5 μm adım aralığına sahip IDT'ler fotolitografi maskesine eklenmiştir.



Şekil 4.22: Fotolitografi sürecinde kullanılan Cr maske tasarımı.

Üretimi tamamlanan IDT'nin optik mikroskop görüntüsü Şekil 4.23a'da verilmiştir. Görüldüğü üzere birbiri ile temas etmeyen ve parmak genişliği düzenli değişime sahip IDT çifti fotolitografi yöntemi ile başarıyla elde edilmiştir. EBL ile üretilen IDT çifti için yapılan incelemeye benzer şekilde, değişken parmak aralıklı IDT çiftinin de elektriksel olarak özdeş yapıya sahip olduğunun gösterilmesi için VNA ölçümleri ile S_{12} ve S_{21} değerleri Şekil 4.23b'de görüldüğü gibi ölçülmüştür. Yapılan ölçüm sonucunda IDT çiftinin elektriksel olarak özdeş karakteristik davranışa sahip olduğu ve değişken parmak genişlikleri sayesinde uyarım frekansı aralığının yaklaşık 70-100 MHz aralığı boyunca elde edildiği görülmüştür.

Her iki litografi yöntemi ile gerçekleştirilen üretim süreci sonucunda, IDT çiftleri gerek yapısal gerekse elektriksel açıdan birbiriyle uyumlu biçimde üretilmiştir. Bu aşamadan sonra, YAD sistemlerinde daha geniş bir bant genişliği hedeflenerek, sonraki çalışmalarda değişken parmak aralığına sahip IDT tasarımına odaklanılmıştır.

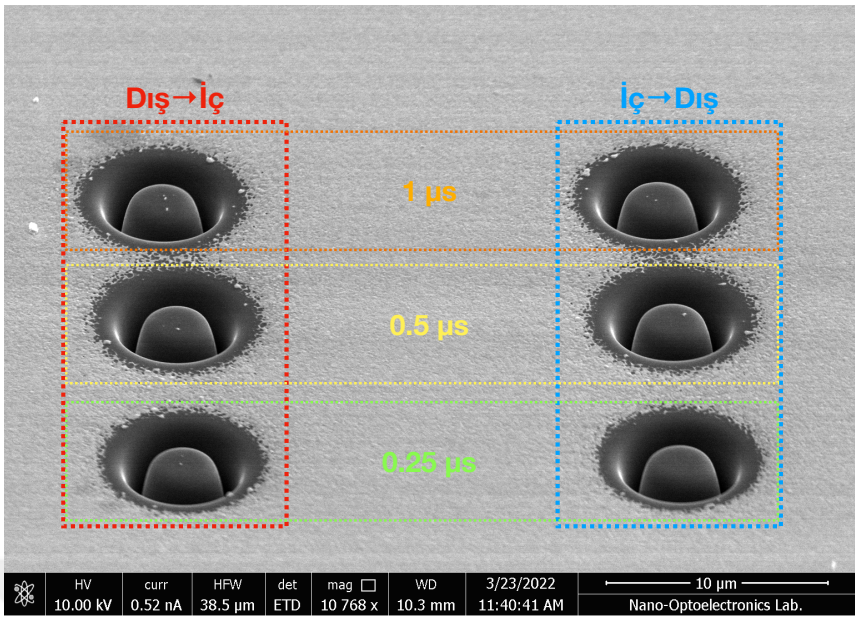


Şekil 4.23: Değişken parmak aralıklı IDT çiftine ait a) optik mikroskop görüntüsü ve b) geçirim spektrumu ölçümü.

4.5.2. Piezoelektrik Fononik Kristal Üretiminin Karakterize Edilmesi

Simülasyon çalışmaları doğrultusunda PFK dizisi üretilebilmesi için çeşitli üretim parametreleri değerlendirilmiştir. Üretim sürecine başlamadan önce, FIB yöntemiyle gerçekleştirilen aşındırma işlemi sırasında yüzeyi korumak amacıyla yüzey üzerine yaklaşık $1.4\,\mu$m kalınlığında AZ 5214-E tipi fotodirenç kaplanmıştır. Ga^+ iyonları ile yapılan aşındırma sürecinde yüzeyin iletkenliğini sağlamak amacıyla yüzey 55 nm kalınlığında altın filmi ile kaplanmıştır.

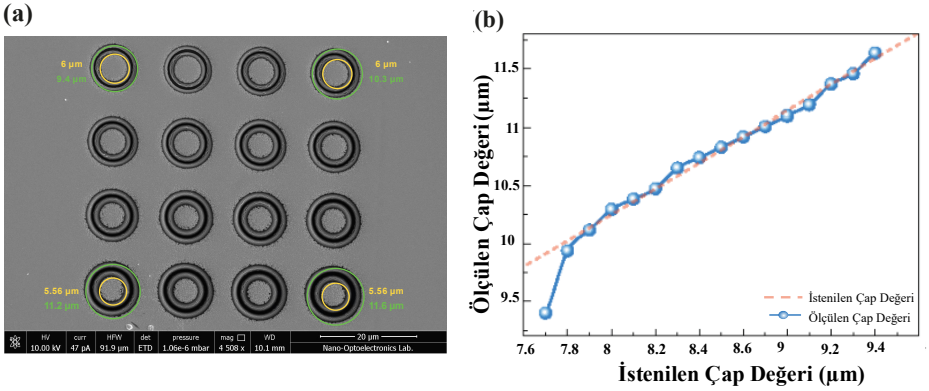
PFK üretimi için gerekli tüm aşındırma işlemleri 30 kV hızlandırma gerilimi değerine sahip Ga^+ kullanılarak $0.15\,\mu$m/nC aşındırma oranı değerleri ile gerçekleştirilmiştir. Geometrik parametrelerin optimizasyonuna geçilmeden önce, aşındırmanın etkinliğini değerlendirmek üzere, farklı tarama yönleri (Dış→İç ve İç→Dış) ve farklı iyon demeti uygulama süreleri $1\,\mu$s, $0.5\,\mu$s ve $0.25\,\mu$s kullanılarak elde edilen yapılar, SEM görüntüleri aracılığıyla incelenmiştir. Şekil 4.24'te sunulan SEM görüntülerine dayanarak yapılan karşılaştırmalar, görüldüğü üzere aşındırma doğrultusu ve bekleme süresinin geometriye görülür bir etkisi tespit edilmemiştir. Bu nedenle, işlem süresini kısaltmak ve örnek başına düşen toplam ışınlama yükünü azaltmak amacıyla $0.25\,\mu$s bekleme süresi tercih edilmiştir. Ayrıca, daha kontrollü kenar profilleri elde edilmesi açısından tarama yönü olarak içten dışa doğru (İç→Dış) tarama seçilmiştir.



Şekil 4.24: Bekleme süresi ve aşındırma doğrultusunun değişimi sonucu elde edilen PFK birim yapıları.

Öncelikle oyuk yüksekliği h_o ve r_i sabit kalacak şekilde oyuk çapının (d_o) değişimi ile PFK üretilmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. 30 kV hızlandırma gerilimi ve 15 nA demet akımı kullanılarak d_o değerinin kontrollü olarak değiştirilmesi Şekil 4.25a'da görüldüğü gibi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.25b'de grafiksel olarak ifade edildiği gibi oyuk çapının ayarlandığı değer ile aşındırma işlemi sonrası SEM ile elde edilen boyutlar arasında doğrusal bir değişim olduğu görülmektedir.

PFK yapılarında geometrik parametrelerin kontrolü kapsamında, sütun çapının (d_i) aşındırma sürecinde istenilen değerlerde elde edilebilmesi amacıyla ilave çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, bir önceki aşamada optimize edilen aşındırma parametreleri ve uygulama yöntemi temel alınarak, sütun çapında hedeflenen değişikliklerin elde edilmesine yönelik işlemler uygulanmıştır. Yapılan SEM ölçümleri sonucunda, tüm PFK yapılarında oyuk çap değerinin sabit kaldığı buna karşın sütun çapının kontrollü bir şekilde değiştirilebildiği tespit edilmiştir Şekil 4.26. Ancak, $LiNbO_3$ kristalinin sahip olduğu karakteristik duvar eğimi, sütun çapının kontrol edilebilirliğini sınırlayan önemli bir faktör olarak gözlemlenmiştir. Bu yapı özelliği, hem alt hem de üst limit oluşturarak, sütun çapının belirli bir aralık dışında üretilebilmesini kısıtlamaktadır. d_o ile d_i arasındaki fark Δd olarak tanımlandığında, bu farkın $\Delta d < 1-3\,\mu$m aralığına düşmesi durumunda, istenilen geometrik hassasiyete sahip PFK yapıların üretimi



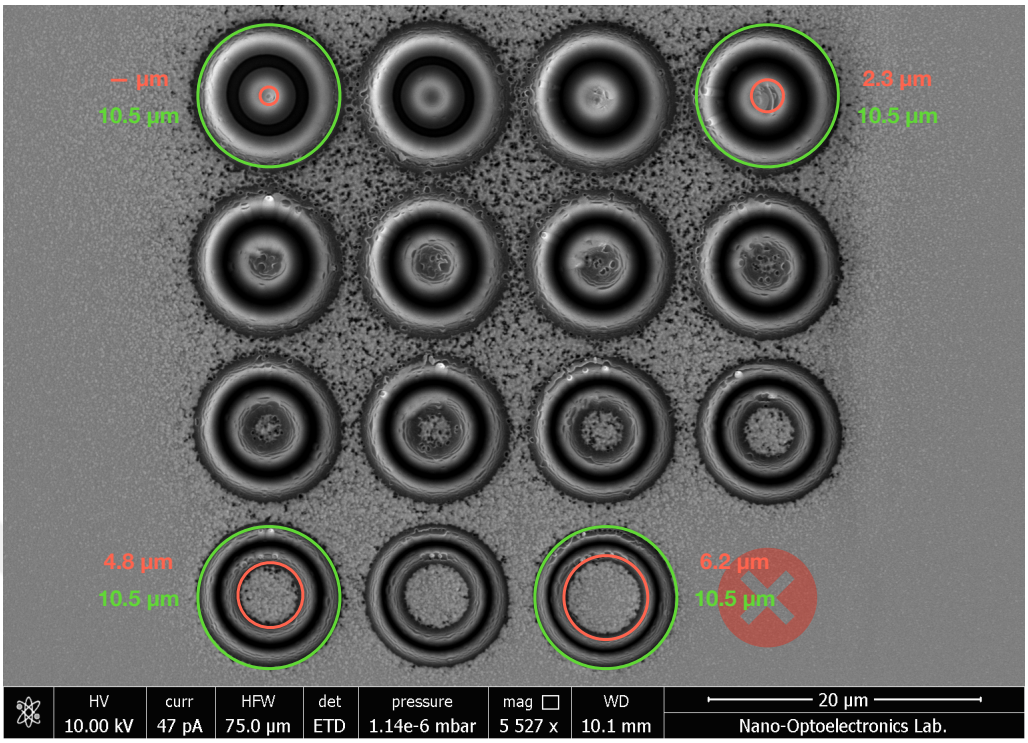
Şekil 4.25: a) r_i ve h_o sabit iken d_o değerinin değiştirildiği PFK dizisi. Sarı ve yeşil renkli daireler iç ve dış dairesel kesitleri göstermektedir. b) Aşındırma işlemi için tasarım olarak verilen boyutlar ve aşındırma sonrası ölçülen değerlerin değişimi.

mümkün olamamaktadır.

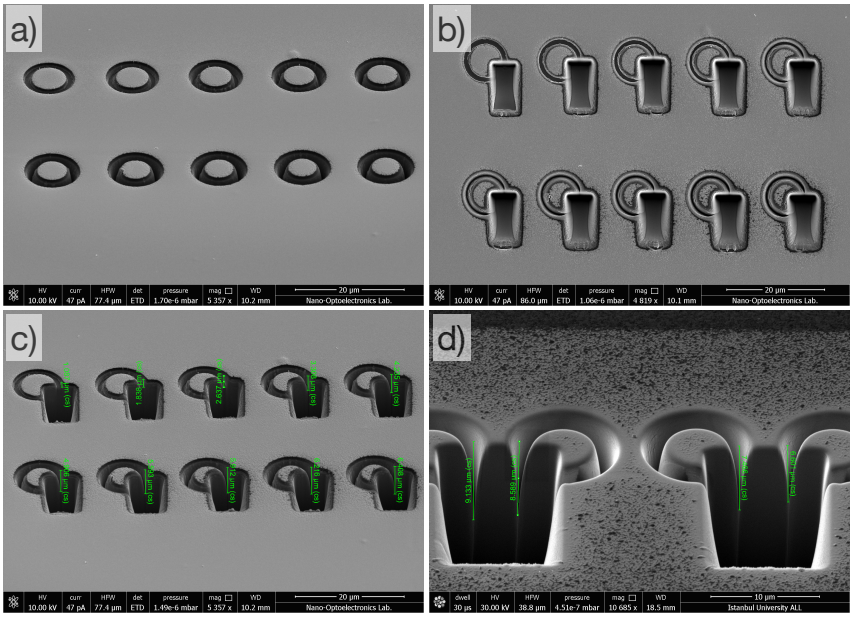
Simülasyon çalışmaları sonucunda, rezonans frekansının kontrol edilebildiği parametrelerden bir diğerinin de sütün yüksekliği olduğu belirlenmiştir. Kesit aşındırma işlemi uygulanarak her bir sütun yükseklik değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.27c ve Şekil 4.27d'de gösterildiği üzere, 1 µm ile 9 µm arasında değişen oyuk derinliklerine sahip PFK yapıları başarıyla üretilmiştir. Bununla birlikte, $LiNbO_3$ kristalinin karakteristik duvar eğimi, aşındırma derinliği arttıkça sabit tutulmak istenen Δd parametresi üzerinde sınırlayıcı bir etki göstermektedir. Şekil 4.27a ve b'de görülebileceği üzere, artan derinliğe rağmen dış PFK boyutlarında belirgin bir değişiklik meydana gelmemiştir.

PFK üretiminde incelenen bir diğer değişken ise, tüm yapının belirli bir orantısal katsayı üzerinden ölçeklendirilmesidir. Bu kapsamda oyuk çapı, sütun çapı ve sütun yükseklik değerleri sırasıyla $d_o \rightarrow Sd_o$, $d_i \rightarrow Sd_i$ ve $h \rightarrow Sh$ şeklinde ölçeklenmiş; burada S, ölçekleme katsayısını temsil etmektedir. Şekil 4.28'de gösterildiği üzere, referans olarak belirlenen $d_o = 10\,\mu$m, $d_i = 6\,\mu$m ve $h = 6\,\mu$m boyutlarına sahip yapıya göre, $S = 0.1$ katsayısı dışında tüm ölçekleme değerleri için PFK yapıları başarıyla üretilmiştir. Özellikle $S = 0.2$ katsayısıyla elde edilen yapıda, iç sütun geometrisinin neredeyse tam konik bir profile dönüştüğü gözlemlenmiştir.

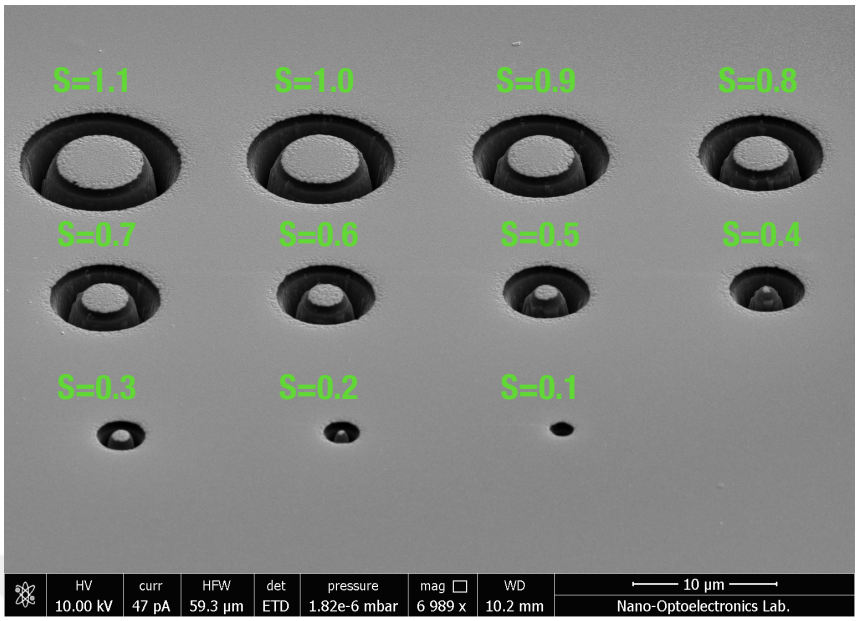
FEM simülasyonlarında incelenen geometrik parametrelerin, FIB yöntemiyle üretilebilmesine yönelik yapılan çalışmalar, bu bölümde sunulan SEM görüntüleriyle doğrulanmıştır. Elde edilen bulgular, hedeflenen geometrik boyutlarda PFK yapıların



Şekil 4.26: d_o ve h_o sabit iken d_i değerini değiştirildiği PFK dizisi. Kırmızı ve yeşil renkli daireler belirli saçıcılar için iç ve dış dairesel kesitleri göstermektedir.



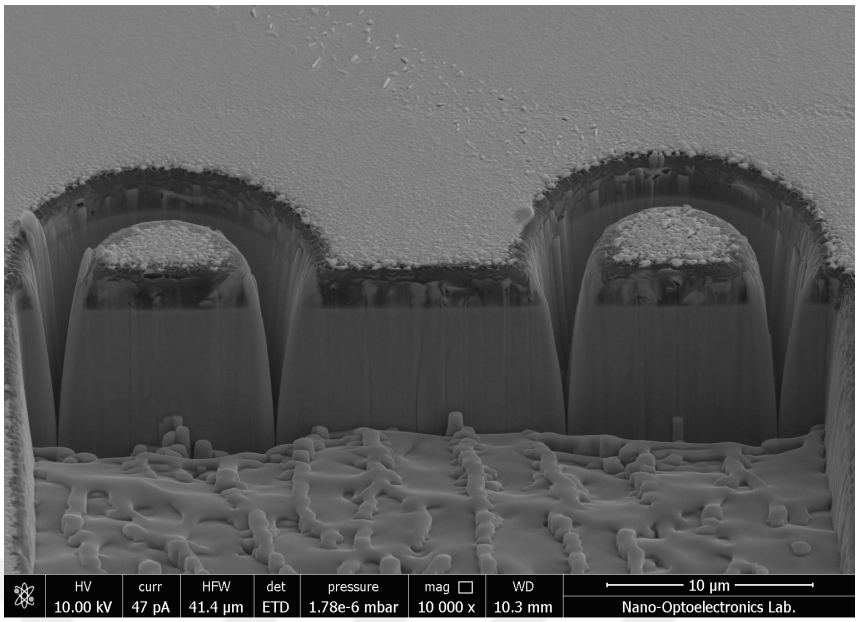
Şekil 4.27: d_o ve d_i'nin sabit olduğu durumda sütun yüksekliğinin değiştirildiği PFK dizisi.



Şekil 4.28: Orantısal *S* katsayısına bağlı olarak geometrik parametreleri değiştirilerek elde edilen PFK'lara ait SEM görüntüsü.

$LiNbO_3$ alttaş üzerine başarıyla üretilebildiğini göstermektedir. Ayrıca, alttaş yüzeyine kaplanan koruyucu fotodirenç tabakasının kalınlığına bağlı olarak yalnızca kısa süreli bir işlem ayarı gerekmekte olup, bu sayede yeni bir alttaş üzerinde benzer PFK geometrilerinin tekrarlanabilirliği mümkün olabilir.

Devam eden çalışmalar kapsamında, dış çapı $12\,\mu$m, iç çapı $7.25\,\mu$m ve yüksekliği $6\,\mu$m olan bir PFK geometrisi belirlenmiş ve üretim süreci bu parametrelere göre gerçekleştirilmiştir. Bu yapıların SEM görüntüleri Şekil 4.29'da sunulmaktadır. SEM görüntülerinde, PFK'nın üst yüzeyinde koyu renkli olarak görülen tabaka AZ 5214-E fotodirençtir.



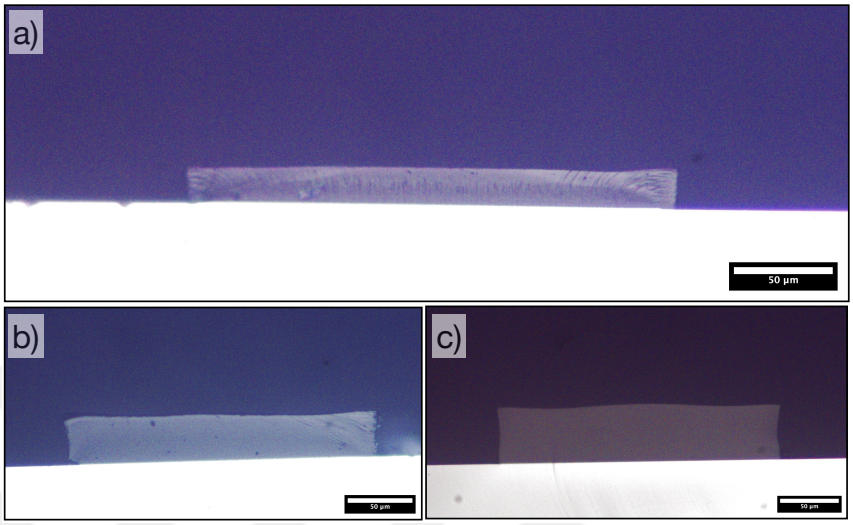
Şekil 4.29: FIB yöntemi ile üretilen birim PFK'ların kesit SEM görüntüsü.

4.5.3. Mikrokanal Karakterizasyonu

PDMS mikrokanal üretimi amacıyla, Si alttaş üzerine negatif tonlu SU-8 kullanılarak kalıp hazırlanmış ve bu kalıp yardımıyla soft-litografi yöntemiyle mikrokanal yapıları başarıyla elde edilmiştir. Mikrokanalın yüksekliği, doğrudan Si alttaş üzerine kaplanan SU-8 tabakasının kalınlığına bağlı olarak ayarlanabilmektedir. Bu nedenle, hem SU-8 filmine ait kesit profilinin hem de soft litografi sonrasında elde edilen PDMS mikrokanalının kesit geometrisinin detaylı biçimde incelenmesi gerekmektedir. Ayrıca, mikrokanal içerisinde oluşturulacak akustik basınç dağılımının, sayısal FEM simülasyonlarında öngörülen dağılımla uyumlu olabilmesi için, kanal profilinin dikdörtgen formda olması önem arz etmektedir. Bu bağlamda, elde edilen mikrokanal yapılarına ait kesit profillerinin karakterizasyonu, hem geometrik doğruluk hem de uygulama açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Hedeflenen kanal yüksekliğine uygun yapılar elde edebilmek adına, yüksek kalınlıkta kaplama imkânı sunan SU-8 2050 tercih edilmiştir. Şekil 4.30'da gösterildiği üzere, 25 µm, 35 µm ve 50 µm hedef kalınlıklarda kalıpları başarıyla üretilmiştir. Elde edilen tüm kalıp yapılarında duvar eğimlerinin dik formda olduğu ve kesit profillerinin ideal dikdörtgen geometrisini koruduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda, tez çalışmaları kapsamında istenilen geometriye sahip mikrokanal kalıplarının üretilebilmesi

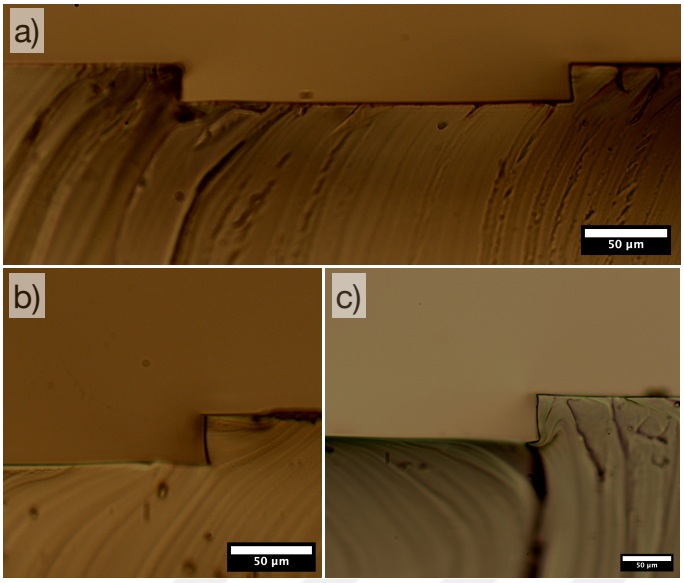
için gerekli fotolitografi parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen kalıplar, hem geometri doğruluğu hem de duvar keskinliği açısından soft litografi ile PDMS mikrokanal üretimi için uygunluk göstermektedir.



Şekil 4.30: a) 25 µm, b) 35 µm ve c) 50 µm hedef kalınlık için üretilen SU-8 kalıpların kesit optik mikroskop görüntüsü.

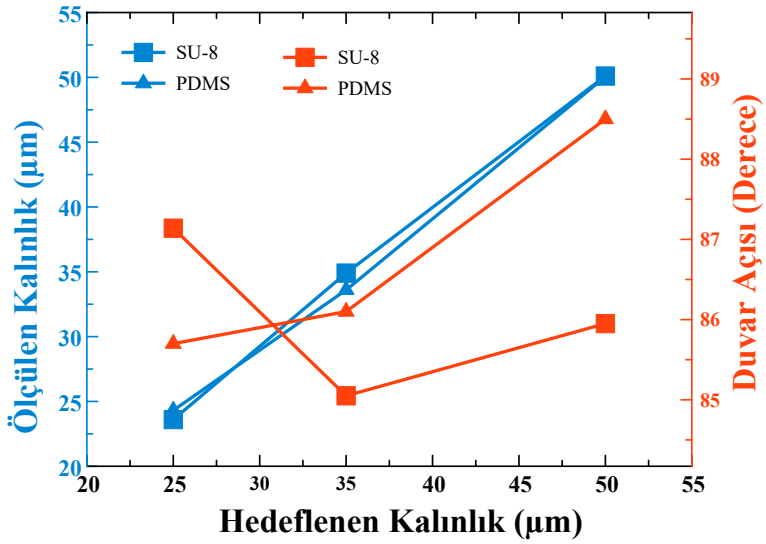
Şekil 4.31'de verilen kesit profilleri, SU-8 kalıplarına uygulanan *sertleştirme (hard bake)* işlemi sonrasında elde edilmiştir. Bu işlemle birlikte epoksi bazlı fotodirencin yapısı kalıcı hale geldiğinden, kalıp formunda herhangi bir geometrik değişim beklenmemektedir. SU-8 kalıbı, 3 inç çapındaki Si alttaş üzerine oluşturulduktan sonra, 6 mm yüksekliğe sahip, kesik çember şeklinde özel bir tutucuya yerleştirilmiştir. Bu tutucu, 3-boyutlu yazıcı ile üretilmiş olup, üst yüzeyi şeffaf pleksi ile kapatılmıştır. Böylece SU-8 kalıbı ile pleksi arasında PDMS karışımının dökületeceği kontrollü bir boşluk oluşturulmuştur. Ayrıca, 3D yazıcıdan elde edilen bu parçanın kalınlığı, dökülen PDMS yapının toplam kalınlığını belirlemiştir. Bu düzenek sayesinde, kürlenme işlemi tamamlandıktan sonra elde edilen PDMS mikrokanal yapısının yüzey deformasyonları önlenmiştir. Şekil 4.31'de gösterilen optik mikroskop kesit görüntülerinde, kanal yüksekliğinin kullanılan SU-8 kalıbın yüksekliğini doğru şekilde takip ettiği ve kanal duvarlarının dik formda kaldığı açıkça gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, hem SU-8 kalıbın hem de hazırlanan PDMS mikrokanalın geometrik açıdan başarılı bir şekilde tasarlandığını göstermektedir.

Optik mikroskop incelemeleri ile elde edilen kalınlık ve duvar eğimi değerlerinin grafikselleştirilmiş hali Şekil 4.32'de görülmektedir. Buradan da görüldüğü üzere elde



Şekil 4.31: a) 25 µm, b) 35 µm ve c) 50 µm hedef kalınlık için elde edilen PDMS mikrokanalların kesit optik mikroskop görüntüsü.

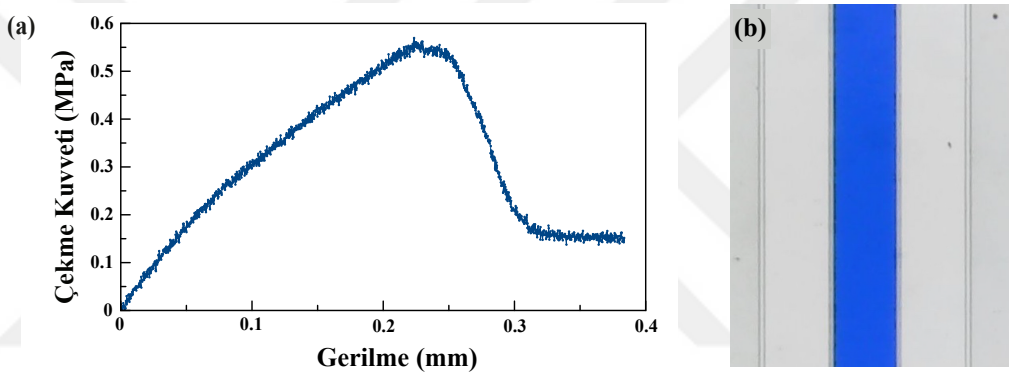
edilen SU-8 kalıp ve PDMS mikrokanal yükseklikleri birbiri ile örtüşmektedir. Üretilen kalıp ve mikrokanalın duvar eğimleri arasında ise $\pm 2^{\circ}$ fark olduğu gözlemlenmiş ve bu değişimin deneysel hata içerisinde kalması sonucu üretilen PDMS mikrokanalların tüm kalınlık değerleri için çalışmanın devamında kullanılması uygun bulunmuştur.



Şekil 4.32: SU-8 ile PDMS mikrokanal kalınlıklarının hedeflenen kalınlığa bağlı olarak değişimi.

4.5.3.1. PDMS Mikrokanalın IDT-PFK Dizisiyle Bağlanma Dayanımı

Malzeme ve Yöntem bölümünde açıklandığı üzere, PDMS mikrokanal yapısı ile IDT ve PFK yapıları, oksijen plazma işlemi uygulanarak birbirine bağlanmıştır. Bu bağlanma işleminin sağlamlığını ve uzun vadeli kullanımda güvenilirliğini değerlendirebilmek için çeşitli testlerin uygulanması gerekmektedir. Bu kapsamda, mekanik dayanıklılık doğrudan çekme testi ile değerlendirilebileceği gibi bağlanma dayanımını test etmek amacıyla, mikrokanal içerisinden yüksek debili sıvı akışı sağlanarak da test edilebilir. Bu yöntemlerle yapılan değerlendirmeler, elde edilen bağlanmanın uygulama için yeterli mekanik kararlılığa sahip olup olmadığını ortaya koymaktadır.



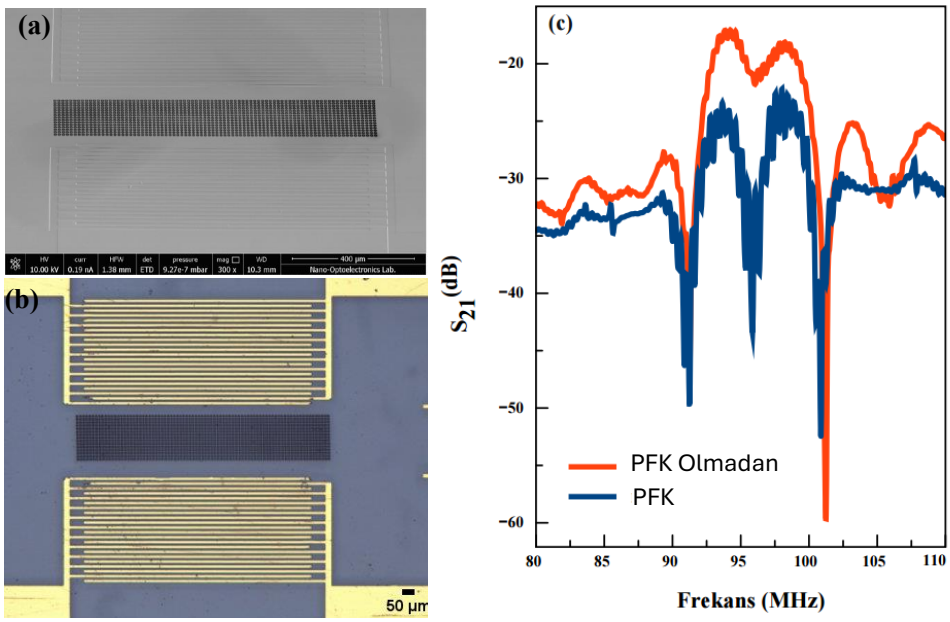
Şekil 4.33: a) $LiNbO_3$ ve PDMS yüzeyleri arasındaki bağlama işlemi sonrasında elde edilen gerilme-çekme kuvveti grafiği, b) Mikrokanal içerisinden basınç testi için yüksek akış hızlarında geçirilen metilen mavisinin optik mikroskop görüntüsü.

Şekil 4.33a'da görüldüğü gibi yüzeye dik bir gerilme kuvveti uygulanarak ölçülen uzama miktarı grafiğinde elde edilen maksimum uzama noktasından anlaşılacağı gibi PDMS mikrokanal yapısı ile IDT ve PFK yapıları arasında 500 kPa civarında basınca dayanıklı bir bağlanmanın elde edildiği anlaşılmıştır. Kanal içerisinden sıvı akışı ile gerçekleştirilen testlerde ise maksimum 463 kPa kanal içi basınca dayanım elde edilmiştir. Yapılan bu iki inceleme ile birbirine uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

4.5.4. Piezoelektrik Fononik Kristal - IDT İçeren Örneklerin Elektirksel Geçirim Ölçümleri

4.5.1'de üretim ve karakterizasyon bilgileri sunulan, 10μm sabit parmak aralığına sahip IDT çifti arasına, 4.5.2'de birim hücre geometrisine bağlı olarak üretimi

gerçekleştirilen PFK yapıları yerleştirildikten sonra bu yapıların elektriksel özelliklerinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu değerlendirme kapsamında, sinyal iletim davranışı ve buna bağlı olarak yüzey akustik dalga sönümleme performansı analiz edilmelidir. Ölçümlerin gerçekleştirilebilmesi için gerekli örnek üretiminde IDT uyarımının gerçekleştiği tüm doğrultuya PFK dizisi üretimi gerekmektedir. Bu ölçümler için kullanılan IDT çifti, Şekil 4.22'de tasarımı verilen 1000 μm parmak uzunluğuna sahip geometrilerdir. Şekil 4.10'da verilen FEM sonuçlarına göre YAD sönümleme becerisi 15 sıra PFK dizisi ile en yüksek değerdedir. Bu sonuç doğrultusunda IDT çifti arasına 15 sıra PFK üretimi tüm parmak uzunluğu boyunca gerçekleştirilmiştir. FIB ile belirtilen boyutta bir alanın aşındırılarak PFK dizisinin elde edilmesi yaklaşık 32 saatlik kesintisiz bir süre boyunca litografi işlemi gerçekleştirilmesiyle mümkün olmuştur.

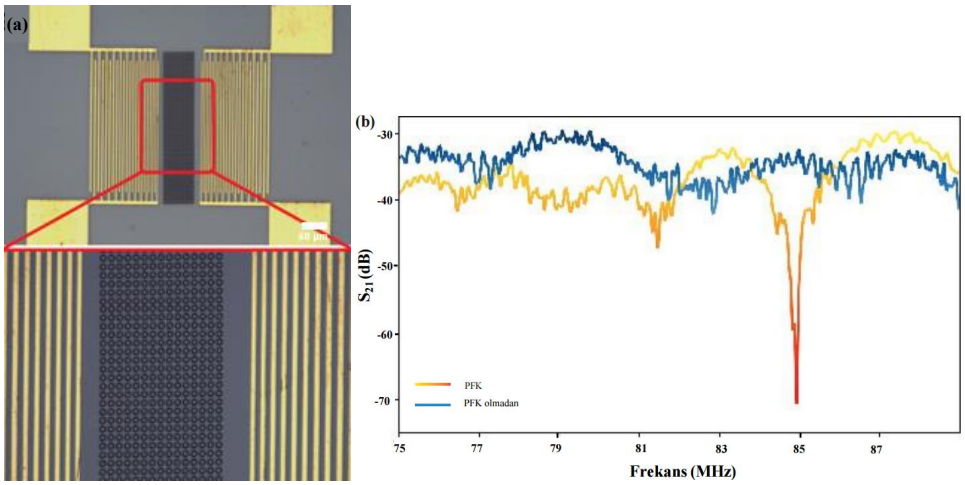


Şekil 4.34: Sabit parmak genişlikli IDT çifti arasına FIB ile üretilen PFK dizisini gösteren a) SEM ve b) optik mikroskop görüntüsü. c) Üretilen PFK ile elde edilen VNA ölçüm spektrumu.

Şekil 4.34a ve b'de görüldüğü üzere, FIB şekillendirmesi sonrasında alınan SEM görüntüsü ve lift-off sonrası optik mikroskop görüntüsü sabit parmak genişlikli IDT çifti arasına 15 sıra PFK dizisinin başarıyla üretildiğini göstermektedir. Üretilen aygıtın VNA ölçüm sonuçları ise Şekil 4.34c'de görülmektedir. Yapılan ölçüm sonucunda üretilen PFK dizisinin geçirim spektrumunda 23 dB'lik değişimi 95.87 MHz'de gözlenmiştir. Elde edilen bu ölçüm sonucu FEM simülasyonları ile elde edilen 97.2 MHz değerindeki

sonuçlar ile uyum içerisindedir.

Sabit parmak genişlikli IDT çifti arasına üretilen PFK dizisi ile elde edilen örnek ölçümü sonrasında, değişken parmak aralıklı IDT çifti arasına PFK üretimi benzer etkilere dikkat ederek gerçekleştirilmiştir. Elde edilen değişken parmak aralıklı IDT çifti ve arasındaki PFK dizisine ait optik mikroskop görüntüsü Şekil 4.35a'da görülmektedir. Optik mikroskop görüntüsünden anlaşılacağı üzere IDT parmak uzunluğu boyunca yerleştirilen 15 sıra olmak üzere 1200 ve 1000 adet PFK dizisinin üretimi başarıyla tamamlanmıştır.

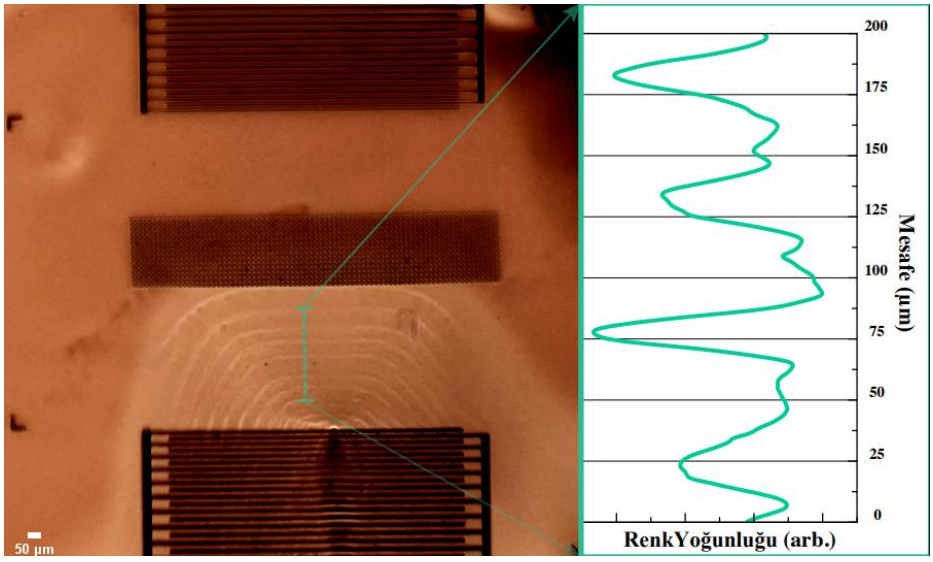


Şekil 4.35: a) Değişken parmak aralıklı IDT çifti arasına üretilen PFK dizisini gösteren optik mikroskop görüntüsü, b) IDT çifti arasına üretilen PFK ile VNA spektrumunun değişimi.

Şekil 4.35b'de verilen VNA ölçüm sonucu, üretilen bu PFK dizisinin 84.925 MHz değerinde minimum davranış sergilediğini göstermektedir. PFK içermeyen IDT çifti ölçümü ile kıyaslaması Şekil 4.35b'de görüldüğü gibi çizildiğinde gözlemlenen dip noktanın -37.9 dB değere sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuçlar doğrultusunda değişken parmak aralıklı IDT çifti ve PFK dizisinin hem mevcut ölçüm seti hem de geçirim spektrumları sonucuna göre çalışmaların devamında kullanılmasının uygunluğu doğrulanmıştır.

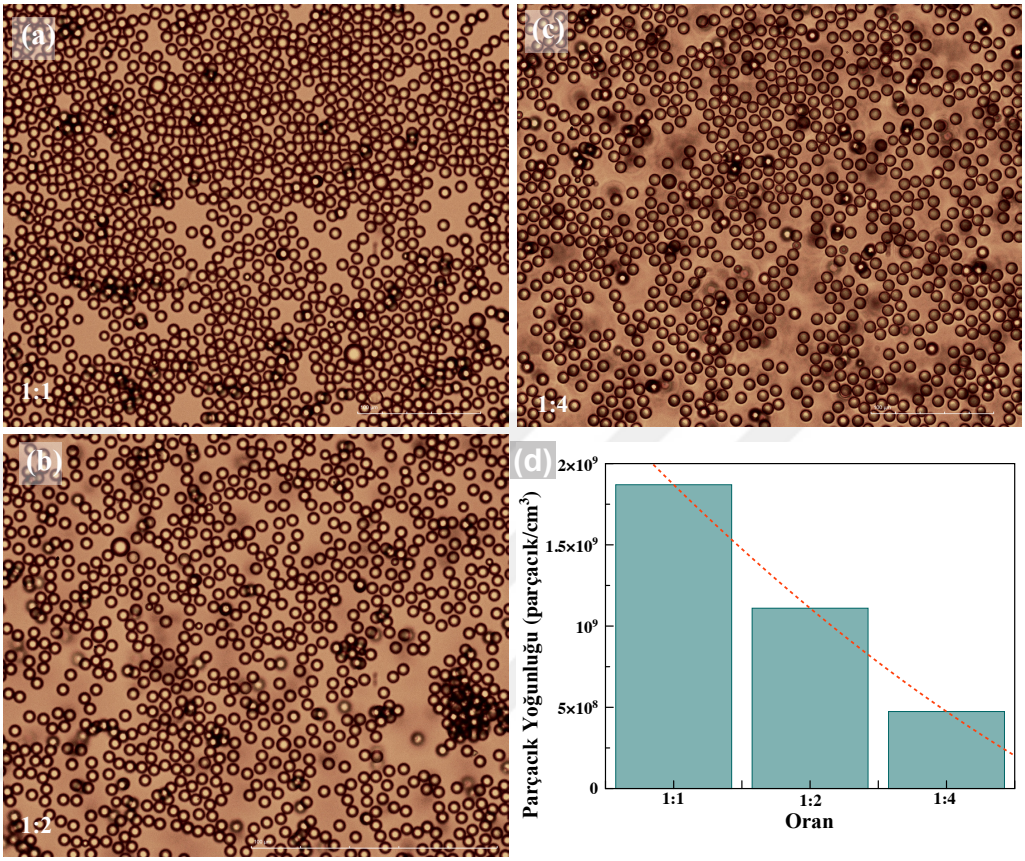
4.5.5. Pizeolektrik Fononik Kristaller ile Durağan Yüzey Akustik Dalga Görselleştirilmesi

IDT-PFK çiftinin YAD geçirim davranışlarının VNA ölçümleri ile incelenmesi sonrasında bölüm 4.3'te FEM analizleri ile gösterilen durağan dalganın deneysel olarak elde edilmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla yapılan çalışmalarda IDT ve PFK arasındaki alana metanol damlatılmış ve akustik uyarım sonrasında sıvı optik mikroskop ile görüntülenmiştir. Metanol, heptan ile birlikte YAD görüntülenmesine en uygun sıvılardan biri olarak literatürde bildirilen kimyasallardan biridir [57]. Bunun yanı sıra maliyet ve ulaşılabilirlik açısından da heptana göre daha avantajlı olması nedeniyle durağan dalga görüntüleme çalışmalarında tercih edilmiştir. Şekil 4.36'da görülen alt IDT ile PFK arasında durağan dalga, alt IDT'nin 84.925 MHz frekansında uyarılmasıyla birlikte metanol kullanılarak gözlemlenmiştir. Durağan dalga görüntüsü üzerinden çizgi profil incelemesi gerçekleştirildiğinde, Şekil 4.36'da verilen periyodik davranış grafikleştirilmiştir. Verilen grafikten görüldüğü üzere, dalga tepeleri arasındaki mesafe yaklaşık 46 μm olup bu değer VNA ölçümleriyle belirlenen PFK yansıtıcılığının elde edildiği frekansa karşılık gelen dalga boyuna karşılık gelmektedir. Elde edilen bu davranış mikroskop görüntüsünde görülen davranışın durağan YAD olduğunu doğrular niteliktedir.



Şekil 4.36: Durağan YAD elde edildiğini gösteren optik mikroskop görüntüsü ve görüntüden elde edilen çizgi profil grafiği ile YAD dalga boyunun belirlenmesi.

4.5.6. Mikrokanal İçerisinde Mikroparçacık Örüntülünmesi Analizi

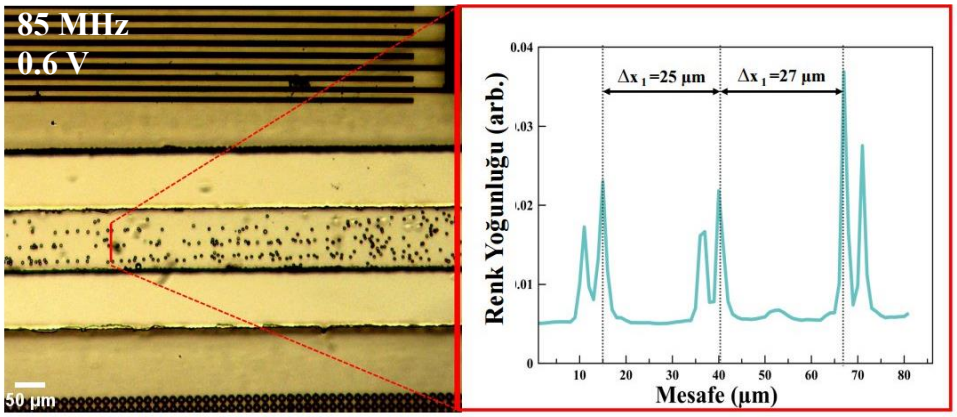


Şekil 4.37: 4.5 μm polistiren mikroparçacıklara ait a) 1:1, b) 1:2 ve c) 1:4 oranlarında mikroparçacık solüsyonu-deiyonize su karışımlarında yoğunluğu gösteren mikroskop görüntüleri. d) karşım oranına bağlı olarak mikroparçacık yoğunluğun değişimi.

PFK dizisi ile IDT'ler arasında durağan YAD alanı oluşturulmasının ardından, bu alanın yer aldığı bölgeye PDMS mikrokanal hizalanmış ve IDT–PFK yapısına kalıcı olarak bağlanmıştır. Bu yapının oluşturulmasının ardından, mikrokanal içerisine sırasıyla 2 μm, 4.5 μm ve 10 μm çapa sahip mikroparçacıklar enjekte edilerek, 84.925 MHz frekansında oluşturulan durağan YAD alanı altında parçacıkların örüntüleme davranışları incelenmiştir.

Bu çalışma için öncelikle mikrokanal içerisine enjekte edilecek olan mikroparçacık içeren sıvıdaki parçacık yoğunluğunun kontrol edilmesine yönelik ön hazırlık yapılması gerekmektedir. Bu amaçla hazırlanan farklı mikroparçacık solüsyonu (A) ve deionize su (B) (A:B) karışımlarının ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılması sonrasında elde edilen

mikroskop görüntüleri Şekil 4.37a-c'de görülmektedir. Optik mikroskop görüntülerinde görüldüğü gibi büyük oranda tek sıra halinde yer alan polistiren mikroparçacıkların inceleme yapılan hacim içerisindeki yoğunluklarının hazırlanan solüsyon oranlarına göre değişimide Şekil 4.37d'de görülmektedir. Buradan elde edilen sonuçlar neticesinde farklı çaplardaki mikroparçacıkların mikrokanal içerisinde örüntüleme çalışmaları için parçacık yoğunluğunun/sayısının fazla olduğu 1:1 oranı ile çalışmalara devam edilmiştir.

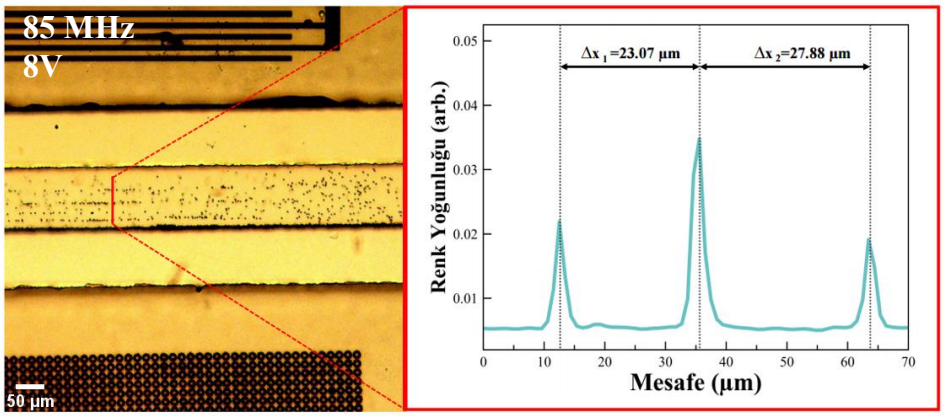


Şekil 4.38: Mikrokanal içerisinde akış esnasında IDT-PFK arasındaki bölgeye gelen 4.5 μm polistiren mikroparçacıkların düğüm noktalarına örüntülendiğini gösteren mikroskop görüntüsü ve bu görüntü üzerinden elde edilen çizgi profili ile örüntülenen parçacıklar arası mesafe grafiği.

Mikrokanal boyunca örüntülenme davranışını incelemek amacıyla, 2μm, 4.5μm ve 10μm çaplarındaki polistiren mikroparçacıklar, kın sıvı kullanılmadan her biri için 0.1μL/min akış hızıyla mikrokanala enjekte edilmiştir. Şekil 4.38'de, 4.5 μm çapındaki mikroparçacıkların bu akış koşulu altında mikrokanala enjekte edilmesiyle elde edilen örüntüleme davranışı sunulmaktadır. Akış sırasında IDT ve PFK yapıları arasındaki bölgede bulunan 4.5μm çapındaki polistiren mikroparçacıkların, uygulanan YAD etkisiyle düzenli örüntüler oluşturduğu gözlemlenmektedir. Akustik radyasyon kuvvetinin etkisiyle parçacıklar basınç düğümlerine taşınmış ve düzenli aralıklarla örüntülenmiştir. Bu durum, mikroskop görüntüsü ile birlikte verilen ImageJ analizine dayalı çizgi profili ile de doğrulanmaktadır. Bu analiz için, parçacıkların örüntülendiği doğrultuda görüntü üzerine bir çizgi tanımlanmış ve ardından ImageJ yazılım programının "Plot Profile" komutu kullanılarak bu çizgi boyunca yer alan piksellerin gri seviye ışık yoğunluğu değerleri çıkarılmıştır. Bu yöntem sayesinde, her bir parçacığın konumuna karşılık

gelen noktalar grafik üzerinde kolaylıkla belirlenebilmiştir. Ayrıca mikroparçacıkların örüntülenme mesafesi örüntü düzeninin periyodikliği, tepe noktaları arası mesafe Δx hesaplanarak sayısal olarak doğrulanmıştır. Deneysel analizler sonucunda, parçacıklar arasındaki ortalama mesafenin yaklaşık $\lambda/2 \approx 26\mu$m olduğu bulunmuş ve bu değer, sistemin rezonans frekansına karşılık gelen teorik akustik dalga boyu ile uyum göstermiştir.

Her bir parçacığa karşılık gelen yoğunluk profili, yapılan analizlerde çift tepe yapısı sergileyen karakteristik bir dağılım şeklinde gözlemlenmiştir. Bu karakteristik dağılım, 4.5 μm çapındaki büyük parçacıkların mikroskop altında ışığı özellikle kenar bölgelerinde daha yoğun şekilde saçması ve buna karşılık merkez bölgesinde ışığın daha zayıf algılanmasından kaynaklanmaktadır. Bu farklılık, görüntü işleme sürecine de yansımaktadır. Parçacık kenarları daha parlak, merkez bölgeleri ise daha soluk görünmektedir. Sonuç olarak, her parçacık, yoğunluk grafiğinde iki tepe ile temsil edilen bir dağılım profili oluşturmaktadır.



Şekil 4.39: Mikrokanal içerisinde akış esnasında IDT-PFK arasındaki bölgeye gelen 2 μm polistiren mikroküreciklerin düğüm noktalarına örüntülendiğini gösteren mikroskop görüntüsü ve bu görüntü üzerinden elde edilen çizgi profili ile örüntülenen parçacıklar arası mesafe grafiği.

Şekil 4.39'da ise, 2 μm çapındaki polistiren mikroparçacıkların akustik alan dışında kalan bölgelerdeki dağılımları ve akustik alanda etksinde kalan dağılımlarını gösteren optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Küçük parçacıklar da benzer şekilde belirli aralıklarla hizalanmıştır. Yapılan çizgi profili analizi sonucunda, parçacıklar arasındaki mesafenin yaklaşık $\lambda/2 \approx 25.47\,\mu$m olduğu görülmüştür. Bu değer, sistemin rezonans frekansına

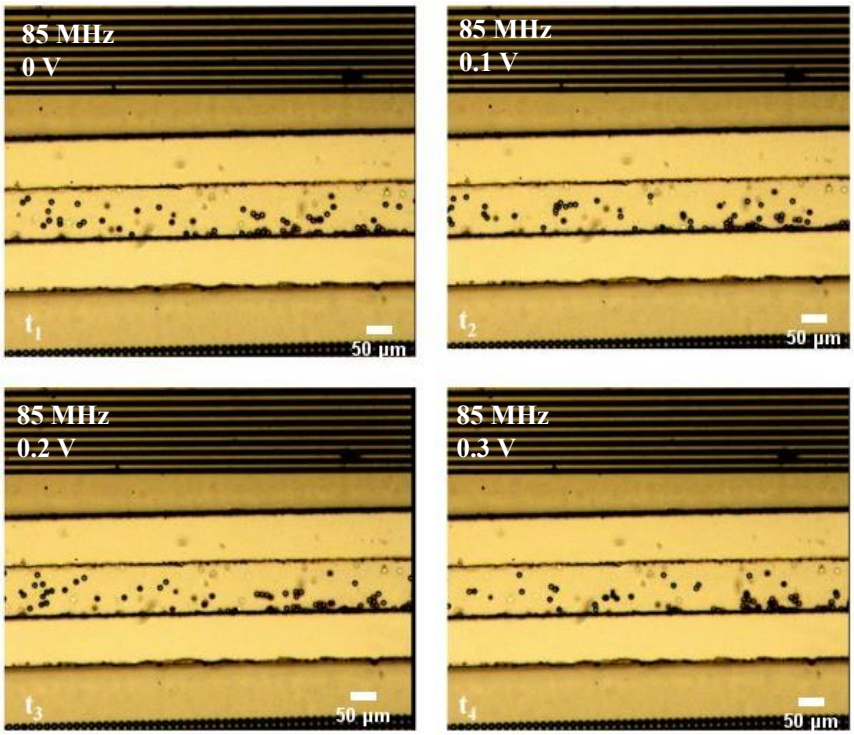
karşılık gelen teorik akustik dalga boyu yaklaşık olarak uyumlu olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte, iki farklı çapta parçacık arasında örüntüleme için gereken gerilim düzeylerinde belirgin bir fark gözlenmiştir. $2\,\mu$m çapındaki parçacıkların düzenli şekilde örüntülenebilmesi için sistemin $8\,V_{pp}$'lik bir uyarım gerilimi ile çalıştırılması gerekmiştir. Buna karşılık, $4.5\,\mu$m çapındaki parçacıklar yalnızca $0.6\,V_{pp}$ gerilimle örüntülenebilmiştir. Bu durumun, parçacık boyutunun akustik radyasyon kuvveti üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Daha küçük çaplı parçacıklar,daha düşük radyasyon kuvvetine maruz kaldıkları için örüntülenebilmeleri adına daha yüksek genlikli bir akustik alana ihtiyaç duymaktadır. Elde edilen deneysel bulgular, bu teorik beklentiyle örtüşmektedir.

$10\,\mu$m çapındaki polistiren mikroparçacıkların farklı gerilimler altındaki örüntülenme davranışları incelenmiştir. Ancak düşük gerilim değerlerinde, mikrokanal içerisindeki parçacıkların düzenli bir şekilde örüntülenmek yerine mikrokanal kenarlarına doğru birikme eğiliminde oldukları gözlemlenmiştir. 0.1–$0.3\,V_{pp}$ aralığında uygulanan gerilimler altında, beklenen örüntüleme davranışı elde edilememiştir (Şekil 4.40). Bunun yerine, parçacıkların akustik alanın merkezinden uzaklaşarak kanal duvarlarında yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Bu durum, mikrokanal geometrisiyle ilişkili olduğu düşünülmektedir. Mikrokanalın genişliği 100 μm olup, uygulanan yüzey akustik dalga frekansına karşılık gelen dalga boyunun yaklaşık yarısı aralıklarla kanalda dört adet düğüm çizgisi oluşmaktadır. 10 μm çapındaki parçacıkların bu düğüm çizgilerine çok yakın bölgelerde konumlanması, düğüm aralığının parçacık boyutuna kıyasla yetersiz kalmasından ötürü örüntülemenin kararsız hâle gelmesine ve parçacıkların kanal duvarlarına doğru sürüklenmesine yol açmış olabilir. Bu durum, parçacık boyutu ile düğüm aralığı arasındaki rezonans uyumunun, örüntüleme performansı açısından kritik bir parametre olduğunu göstermektedir.

Yapılan çalışmalar kapsamında, 128° YX $LiNbO_3$ piezoelektrik alttaş üzerine değişken parmak aralığına sahip IDT yapıları yerleştirilerek, PFK'nın bant aralığında akustik dalga iletiminin engellendiği bir yapı tasarlanmıştır. Tasarlanan bu yapıda, yaklaşık 84.925 MHz merkez frekansta, PFK'nın oluşturduğu bant aralığı nedeniyle YAD'nın iletimi engellenmiş ve yüzeyde durağan YAD alanı oluşmasına neden olmuştur. Bu durağan YAD alanı, mikrokanal içerisinde farklı çaplardaki polistiren mikroparçacıkların,

basınç düğüm noktalarına yönlendirilerek düzenli biçimde örüntülenmesine olanak sağlamıştır. Elde edilen bulgular, piezoelektrik alttaş üzerinde entegre PFK yapılarının, 2 μm ve 4.5 μm çaplarındaki mikroparçacıkların örüntülenmesinde etkili olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 4.40: Mikrokanal içerisinde akış esnasında IDT-PFK arasındaki bölgeye gelen 10 μm polistiren mikroparçacıkların YAD etkisi altında optik mikroskop görüntüsü

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Tez kapsamında yürütülen çalışmalar sonucunda, 128° YX $LiNbO_3$ piezoelektrik alttaş üzerine entegre edilen PFK dizisi ve YAD üretimi amacıyla tasarlanan IDT yapısı kullanılarak, PDMS mikrokanal içerisinde farklı boyutlardaki mikroparçacıkların başarılı bir şekilde örüntülenmesi sağlanmıştır.

Çalışmanın başlangıç aşamasında, $LiNbO_3$ alttaş yüzeyine EBL yöntemiyle sabit parmak aralığına sahip bir IDT yapısı üretilmiştir. Ancak bu yapı, üretim sürecindeki karmaşıklık ve deneysel uygulamalarda karşılaşılan frekans sınırlamaları nedeniyle yeterli esneklik sunamamıştır. Bu bağlamda, daha geniş bir frekans aralığında çalışabilen ve üretim sürecini daha güvenilir kılacak alternatif bir yapı olarak, parmak aralıkları 9–14 μm arasında değişen değişken aralıklı bir IDT tasarımı geliştirilmiş ve fotolitografi yöntemiyle başarıyla üretilmiştir. Böylece, farklı frekanslarda YAD üretimi mümkün hale getirilmiştir. Sistemin bir diğer temel bileşeni olan PFK dizisi, söz konusu IDT çifti arasındaki bölgeye FIB litografi yöntemiyle uygulanmıştır. Bu dizilimde 16 kat daha fazla YAD iletimini engelleme başarası elde ettiği için halkasal geometri tercih edilmiştir [32]. PFK'nın oluşturduğu bant aralığı, yapının geometrik parametrelerine (oyuk çapı,oyuk yüsekliği,sütun yüksekliği) doğrudan bağlı olarak değiştiğinden, deneysel üretim süreci öncesinde çeşitli varyasyonlar simülasyon ortamında değerlendirilmiş ve YAD iletiminin engellendiği geometrik parametreler belirlenmiştir [32]. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, yaklaşık 84.925 MHz merkez frekansında, PFK'nın oluşturduğu bant aralığı sayesinde YAD iletiminin engellendiği ve yüzeyde durağan YAD alanı oluştuğu şekilde gözlemlenmiştir. Bu alan, yüzeye damlatılan metanol kullanılarak optik mikroskop altında görselleştirilmiş ve elde edilen YAD dalgaboyunun hem teorik hesaplamalar hem de simülasyon çıktıları ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgu, sistemin YAD üretim kapasitesinin doğruluğunu ve tasarım aşamasında yapılan modellemelerin güvenilirliğini göstermesi açısından önem taşımaktadır. Mikrokanal yapısının üretiminde, Si alttaş üzerine SU-8 negatif fotodirenç kaplanarak soft litografi yöntemiyle kalıp hazırlanmış ve bu kalıp üzerine hazırlanan PDMS karışımı dökülerek kürleşme işlemi uygulanmıştır. Böylece, tasarıma uygun dik

kenar geometrisine sahip mikrokanallar elde edilmiştir. Kürlenen PDMS mikrokanallar, oksijen plazma ile aktive edilerek, $LiNbO_3$ alttaş üzerine entegre edilen IDT-PFK dizisi ile hizalanarak kalıcı olarak birleştirilmiştir. Bu işlem, sistemin sızdırmazlığı ve uzun vadeli stabil çalışabilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Durağan YAD alanı oluşturulduktan sonra, mikrokanal içerisine farklı çaplardaki polistiren mikroparçacıklar enjekte edilerek örüntüleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. 4.5 μm çaplı parçacıklar, $0.6\,V_{pp}$ uyarım gerilimi altında, YAD etkisiyle oluşan basınç düğümlerinde $\lambda/2 \approx$ 26 μm aralıklarla örüntülenmiştir. Benzer şekilde, 2 μm çapındaki mikroparçacıkların da belirli aralıklarla hizalanabildiği, ancak bu örüntülemenin sağlanabilmesi için daha yüksek bir uyarım gerilimi olan $8\,V_{pp}$ uygulanmasının gerektiği saptanmıştır. Buna karşın, 10 μm çapındaki mikroparçacıkların $0.1 - 0.3\,V_{pp}$ aralığında uygulanan düşük gerilimler altında örüntülenemediği, bunun yerine kanal duvarlarına doğru birikme eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu birikmemin sebebi, mikrokanal geometrisiyle ilişkili olduğu düşünülmektedir. Mikrokanalın genişliği 100 μm olup, uygulanan yüzey akustik dalga frekansına karşılık gelen dalga boyunun yaklaşık yarısı aralıklarla dört adet düğüm çizgisi oluşmaktadır. 10 μm çapındaki parçacıkların bu düğüm çizgilerine çok yakın yerlerde konumlanması, düğüm aralığının parçacık boyutuna kıyasla yetersiz olması nedeniyle örüntülenmenin kararsız hâle gelmesine ve parçacıkların kanal duvarlarına sürüklenmesine neden olmuş olabileceği değerlendirilmiştir [58]. Tüm bu deneysel bulgular, önceden gerçekleştirilen FEM tabanlı simülasyonlar ve teorik yaklaşımlar ile uyum göstermektedir. Yüzeyde oluşturulan durağan YAD alanının, farklı boyutlardaki mikroparçacıkları etkili biçimde manipüle edebildiği net bir şekilde ortaya konmuştur. Böylece, PFK yapısının YAD ile olan etkileşiminin, mikroakışkan sistemlerdeki parçacık yönlendirme uygulamaları açısından önemli bir potansiyele sahip olduğu gösterilmiştir.Bunun yanı sıra, PFK yapılarının titreşim karakteristiklerinin, üst yüzeylerine yerleştirilen kütlelerin etkisiyle değişebileceği öngörülmekte olup, bu özelliğin ileride kütle duyarlılığına dayalı sensör sistemleri geliştirmek amacıyla değerlendirilebileceği düşünülmektedir.

Sonuç olarak, bu tezde halkasal geometriye sahip PFK yapısı kullanılarak farklı boyutlardaki polistiren mikroparçacıklar yüzey akustik dalgalarla mikrokanal içinde başarıyla örüntülenmiştir. Çalışma, akustoakışkan sistemlerde parçacık yönlendirmeye yönelik özgün ve öncü bir katkı sunmuştur.

KAYNAKLAR

[1]. Mandal, D. and Banerjee, S., 2022, Surface acoustic wave (SAW) sensors: Physics, materials, and applications, *Sensors* 22 (3), 820.

[2]. Song, S., Wang, Q., Zhou, J. and Riaud, A., 2022, Design of interdigitated transducers for acoustofluidic applications, *Nanotechnology and Precision Engineering* 5 (3), 035001.

[3]. Zhao, S., Wu, M., Yang, S., Wu, Y., Gu, Y., Chen, C., Ye, J., Xie, Z., Tian, Z., Bachman, H. *et al.*, 2020, A disposable acoustofluidic chip for nano/microparticle separation using unidirectional acoustic transducers, *Lab on a Chip* 20 (7), 1298–1308.

[4]. Fan, Y., Wang, X., Ren, J., Lin, F. and Wu, J., 2022, Recent advances in acoustofluidic separation technology in biology, *Microsystems & Nanoengineering* 8 (1), 94.

[5]. Nazemi Ashani, M., Bayareh, M. and Ghasemi, B., 2022, Acoustofluidic separation of microparticles: a numerical study, *Iran. J. Chem. Chem. Eng. Research Article Vol* 41 (9), 3064–3076.

[6]. Wong, K., 2002, *Properties of Lithium Niobate*, INSPEC/Institution of Electrical Engineers, ISBN :9780852967997.

[7]. Zhao, Z., Yang, S., Li, F., Zhang, L., Wang, J., Chang, K. P. and Chen, M., 2023, Acoustofluidics: A versatile tool for micro/nano separation at the cellular, subcellular, and biomolecular levels, *Advanced Materials Technologies* 8 (14), 2202201.

[8]. Wu, M., Ozcelik, A., Rufo, J., Wang, Z., Fang, R. and Jun Huang, T., 2019, Acoustofluidic separation of cells and particles, *Microsystems & nanoengineering* 5 (1), 32.

[9]. Soliman, A. M., Eldosoky, M. A. and Taha, T. E., 2017, Analysis improvement of standing surface acoustic wave microfluidic devices for bio-particles separation, *International Journal of Computer Applications in Technology* 55 (3), 244–256.

[10]. Hao, N., Pei, Z., Liu, P., Bachman, H., Naquin, T. D., Zhang, P., Zhang, J., Shen, L., Yang, S., Yang, K. *et al.*, 2020, Acoustofluidics-assisted fluorescence-SERS bimodal biosensors, *Small* 16 (48), 2005179.

[11]. Bai, W.-C., Cao, Y., Zhou, B.-H., Liu, J.-L., Liu, G.-X., Zhang, H., Zhang, H.-Z. and Hu, H., 2022, Theoretical investigation of magneto-electro-elastic piezoelectric phononic crystal, *Crystals* 12 (6), 876.

[12]. Wilson, R., Reboud, J., Bourquin, Y., Neale, S. L., Zhang, Y. and Cooper, J. M., 2011, Phononic crystal structures for acoustically driven microfluidic manipulations, *Lab on a Chip* 11 (2), 323–328.

[13]. Feng, D., Xu, D., Xiong, B. and Wang, Y., 2015, Acoustically driven microfluidic devices based on hexagonal phononic crystal structures, *2015 Transducers-2015 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)*, IEEE, 692–695.

[14]. Hsu, J.-C. and Lin, Y.-D., 2019, Microparticle concentration and separation inside a droplet using phononic-crystal scattered standing surface acoustic waves, *Sensors and Actuators A: Physical* 300, 111651.

[15]. Chen, Z., Shen, L., Zhao, X., Chen, H., Xiao, Y., Zhang, Y., Yang, X., Zhang, J., Wei, J. and Hao, N., 2022, Acoustofluidic micromixers: From rational design to lab-on-a-chip applications, *Applied Materials Today* 26, 101356.

[16]. Ding, X., Peng, Z., Lin, S.-C. S., Geri, M., Li, S., Li, P., Chen, Y., Dao, M., Suresh, S. and Huang, T. J., 2014, Cell separation using tilted-angle standing surface acoustic waves, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111 (36), 12992–12997.

[17]. Love, A. E. H., 1911, *Some Problems of Geodynamics*, University Press, ISBN :9781107536470.

[18]. Du, J., Jin, X., Wang, J. and Xian, K., 2007, Love wave propagation in functionally graded piezoelectric material layer, *Ultrasonics* 46 (1), 13–22.

[19]. Lamb, H., 1917, On waves in an elastic plate, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing papers of a mathematical and physical character* 93 (648), 114–128.

[20]. Worden, K., 2001, Rayleigh and lamb waves-basic principles, *Strain* 37 (4), 167–172.

[21]. Connacher, W., Zhang, N., Huang, A., Mei, J., Zhang, S., Gopesh, T. and Friend, J., 2018, Micro/nano acoustofluidics: materials, phenomena, design, devices, and applications, *Lab on a Chip* 18 (14), 1952–1996.

[22]. Mazalan, M. B., Noor, A. M., Wahab, Y., Yahud, S. and Zaman, W. S. W. K., 2021, Current development in interdigital transducer (IDT) surface acoustic wave devices for live cell in vitro studies: A review, *Micromachines* 13 (1), 30.

[23]. Qian, J., Ren, J., Liu, Y., Lam, R. H. and Lee, J. E.-Y., 2020, A two-chip acoustofluidic particle manipulation platform with a detachable and reusable surface acoustic wave device, *Analyst* 145 (23), 7752–7758.

[24]. Laude, V., 2015, *Phononic crystals: artificial crystals for sonic, acoustic, and elastic waves*, Walter de Gruyter GmbH & Co KG.

[25]. Maldovan, M. and Thomas, E. L., 2006, Simultaneous localization of photons and phonons in two-dimensional periodic structures, *Applied Physics Letters* 88 (25), 251907.

[26]. Maldovan, M., 2013, Sound and heat revolutions in phononics, *Nature* 503 (7475), 209–217.

[27]. Kushwaha, M. S., Halevi, P., Dobrzynski, L. and Djafari-Rouhani, B., 1993, Acoustic band structure of periodic elastic composites, *Physical Review Letters* 71 (13), 2022.

[28]. Sigalas, M. and Economou, E. N., 1993, Band structure of elastic waves in two dimensional systems, *Solid State Communications* 86 (3), 141–143.

[29]. Liu, Z., Zhang, X., Mao, Y., Zhu, Y. Y., Yang, Z., Chan, C. T. and Sheng, P., 2000, Locally resonant sonic materials, *Science* 289 (5485), 1734–1736.

[30]. Achaoui, Y., Khelif, A., Benchabane, S., Robert, L. and 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—Condensed Matter and Materials Physics* 83 (10), 104201.

[31]. Cui, H., Hensleigh, R., Yao, D., Maurya, D., Kumar, P., Kang, M. G., Priya, S. and Zheng, X., 2019, Three-dimensional printing of piezoelectric materials with designed anisotropy and directional response, *Nature Materials* 18 (3), 234–241.

[32]. Ash, B., Worsfold, S., Vukusic, P. and Nash, G., 2017, A highly attenuating and frequency tailorable annular hole phononic crystal for surface acoustic waves, *Nature Communications* 8 (1), 174.

[33]. Wu, T.-T., Wu, L.-C. and Huang, Z.-G., 2005, Frequency band-gap measurement of two-dimensional air/silicon phononic crystals using layered slanted finger interdigital transducers, *Journal of Applied Physics* 97 (9), 094916–1.

[34]. Mohammadi, S., Eftekhar, A. A., Khelif, A., Hunt, W. and Adibi, A., 2008, Evidence of large high-frequency complete phononic band gaps in silicon phononic crystal plates, *Applied Physics Letters* 92 (22), 221905.

[35]. Benchabane, S., Khelif, A., Rauch, J.-Y., Robert, L. and Laude, V., 2006, Evidence for complete surface wave band gap in a piezoelectric phononic crystal, *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* 73 (6), 065601.

[36]. Kuo, N.-K., Zuo, C. and Piazza, G., 2009, Microscale inverse acoustic band gap structure in aluminum nitride, *Applied Physics Letters* 95 (9), 093501–1.

[37]. Olsson, R. H., Ziaei-Moayyed, M., Kim, B., Reinke, C., Su, M. F., Hopkins, P., Soliman, Y. M., Goettler, D. F., Leseman, Z. C. and El-Kady, I., 2011, Micro and nano fabricated phononic crystals: Technology and applications, *2011 IEEE International Ultrasonics Symposium*, Orlando, Florida, USA: IEEE, pp. 983–988.

[38]. Jackson, R. A. and Valerio, M. E., 2005, A new interatomic potential for the ferroelectric and paraelectric phases of $LiNbO_3$, *Journal of Physics: Condensed Matter* 17 (6), 837.

[39]. Chen, K., Zhu, Y., Liu, Z. and Xue, D., 2021, State of the art in crystallization of $LiNbO_3$ and their applications, *Molecules* 26 (22), 7044.

[40]. Weis, R. S. and Gaylord, T. K., 1985, Lithium niobate: Summary of physical properties and crystal structure, *Applied Physics A Solids and Surfaces* 37 (4), 191–203.

[41]. Gonnissen, J., Batuk, D., Nataf, G. F., Jones, L., Abakumov, A. M., Van Aert, S., Schryvers, D. and Salje, E. K., 2016, Direct Observation of Ferroelectric Domain Walls in $LiNbO_3$: Wall-Meanders, Kinks, and Local Electric Charges, *Advanced Functional Materials* 26 (42), 7599–7604.

[42]. Lehtonen, S., Plessky, V. P., Béreux, N. and Salomaa, M. M., 2004, Phases of The SAW Reflection and Transmission Coefficients for Short Reflectors on 128° YX $LiNb_3$, *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 51 (12), 1671–1682.

[43]. Logan, D., 2022, *First Course in the Finite Element Method, Enhanced Edition, SI Version*, Cengage Learning, ISBN :9780357676646.

[44] Van Poll, M. L., Zhou, F., Ramstedt, M., Hu, L. and Huck, W. T., 2007, A self-assembly approach to chemical micropatterning of poly (dimethylsiloxane), *Angewandte Chemie International Edition* 46 (35), 6634–7.

[45]. Lee, S., Shin, H.-J., Yoon, S.-M., Yi, D. K., Choi, J.-Y. and Paik, U., 2008, Refractive index engineering of transparent ZrO_2–polydimethylsiloxane nanocomposites, *Journal of Materials Chemistry* 18 (15), 1751–1755.

[46]. Kuddannaya, S., Bao, J. and Zhang, Y., 2015, Enhanced In Vitro Biocompatibility of Chemically Modified Poly (dimethylsiloxane) Surfaces for Stable Adhesion and Long-term Investigation of Brain Cerebral Cortex Cells, *ACS Applied Materials & Interfaces* 7 (45), 25529–25538.

[47]. Miranda, I., Souza, A., Sousa, P., Ribeiro, J., Castanheira, E. M., Lima, R. and Minas, G., 2021, Properties and Applications of PDMS for Biomedical Engineering: A Review, *Journal of functional biomaterials* 13 (1), 2.

[48]. Johnston, I., Tracey, M., Davis, J. and Tan, C., 2005, Micro throttle pump employing displacement amplification in an elastomeric substrate, *Journal of Micromechanics and Microengineering* 15 (10), 1831.

[49]. Wu, X., Kim, S.-H., Ji, C.-H. and Allen, M. G., 2011, A solid hydraulically amplified piezoelectric microvalve, *Journal of Micromechanics and Microengineering* 21 (9), 095003.

[50]. Fujii, T., 2002, Pdms-based microfluidic devices for biomedical applications, *Microelectronic engineering* 61, 907–914.

[51]. Raj M, K. and Chakraborty, S., 2020, Pdms microfluidics: A mini review, *Journal of Applied Polymer Science* 137 (27), 48958.

[52]. Khan, M. S., Ali, M., Lee, S. H., Jang, K. Y., Lee, S. J. and Park, J., 2024, Acoustofluidic separation of prolate and spherical micro-objects, *Microsystems & Nanoengineering* 10 (1), 6.

[53]. Cardoso, C., Fernandes, C. S., Lima, R. and Ribeiro, J., 2018, Biomechanical analysis of PDMS channels using different hyperelastic numerical constitutive models, *Mechanics Research Communications* 90, 26–33.

[54]. Wang, B., Liu, H., Zhang, B., Han, Y., Shen, C., Lin, Q. and Chen, H., 2016, Development of antibacterial and high light transmittance bulk materials: Incorporation and sustained release of hydrophobic or hydrophilic antibiotics, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 141, 483–490.

[55]. Gokaltun, A., Yarmush, M. L., Asatekin, A. and Usta, O. B., 2017, Recent advances in nonbiofouling pdms surface modification strategies applicable to microfluidic technology, *Technology* 5 (01), 1–12.

[56]. Jin, Y., Pennec, Y., Bonello, B., Honarvar, H., Dobrzynski, L., Djafari-Rouhani, B. and Hussein, M. I., 2021, Physics of surface vibrational resonances: pillared phononic crystals, metamaterials, and metasurfaces, *Reports on Progress in Physics* 84 (8), 086502.

[57]. Rambach, R. W., Taiber, J., Scheck, C. M. L., Meyer, C., Reboud, J., Cooper, J. M. and Franke, T., 2016, Visualization of Surface Acoustic Waves in Thin Liquid Films, *Scientific Reports* 6 (1), 21980.

[58]. Fakhfouri, A., Devendran, C., Collins, D. J., Ai, Y. and Neild, A., 2016, Virtual membrane for filtration of particles using surface acoustic waves (saw), *Lab on a Chip* 16 (18), 3515–3523.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Nurseli Seda GENÇ
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	[X] T.C. [ ] Diğer:
E-Posta Adresi	

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Fen Fakültesi
Bölümü	Fizik
Mezuniyet Yılı	21.06.2022

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri
Anabilim Dalı	Fizik Anabilim Dalı
Programı	Katıhal Fiziği Programı

Makale ve Bildiriler

Kuruoğlu, F., Genç, N. S., Erol, A., ve Çiçek, A., 2023, *Band Profile and Surface Acoustic Wave Attenuation Analysis of Polygonal Cavity-type Piezoelectric Phononic Crystals*, Physics and Astronomy Reports, 1(1), ss. 27–31.

Genç, N. S., Çiçek, A., Erol, A., ve Kuruoğlu, F., 2024, *MICROPARTICLE PATTERNING via PIEZOELECTRIC PHONONIC CRYSTALS*, 18th International Nanoscience and Nanotechnology Conference, İstanbul, Türkiye, 26-28 Ağustos 2024, ss. 49.