

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**PIEZOELEKTRİK İLE TETİKLENEN VALFSİZ MİKRO POMPA
TASARIMI, ÜRETİMİ VE AKIŞKAN DEBİSİNİ
ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Sevda ŞİMŞEK

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Mühendisliği Doktora Programı

NİSAN 2023

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**PIEZOELEKTRİK İLE TETİKLENEN VALFSİZ MİKRO POMPA
TASARIMI, ÜRETİMİ VE AKIŞKAN DEBİSİNİ
ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Sevda ŞİMŞEK
(503162031)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Mühendisliği Doktora Programı

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Seyhan UYGUR ONBAŞIOĞLU
Eş Danışman: Prof. Dr. Ali KOŞAR**

NİSAN 2023

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**DESIGN, FABRICATION AND DEFINING FACTORS AFFECTING FLUID
FLOW RATE OF VALVELESS PIEZOELECTRIC-TRIGGERED
MICROPUMP**

PhD THESIS

**Sevda ŞİMŞEK
(503162031)**

Department of Mechanical Engineering

Mechanical Engineering Graduate Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Seyhan UYGUR ONBAŞIOĞLU

Thesis Co-Advisor: Prof. Dr. Ali KOŞAR

APRIL 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 503162031 numaralı Doktora Öğrencisi Sevda ŞİMŞEK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "PIEZOELEKTRİK İLE TETİKLENEN VALFSİZ MİKRO POMPA TASARIMI, ÜRETİMİ VE AKIŞKAN DEBİSİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN BELİRLENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Seyhan UYGUR ONBAŞIOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Prof. Dr. Ali KOŞAR**
Sabancı Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Hakan DEMİR**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Lütfullah KUDDUSİ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Özden AĞRA
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Erhan BÖKE
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ayşegül ABUŞOĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **28 Aralık 2022**
Savunma Tarihi : **10 Nisan 2023**





Babama ve aileme,



ÖNSÖZ

Bu doktora tez çalışmasında ve İTÜ Makina fakültesi eğitimim boyunca çok değerli görüş ve önerileri ile beni yönlendiren ve çalışmanın her aşamasında desteğini hiç bir zaman esirgemeyen çok değerli, saygıdeğer danışman hocam Sn. Prof. Dr. Seyhan UYGUR ONBAŞIOĞLU'na teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Doktora tez çalışmasının SABANCI Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde (SUNUM) gerçekleşmesini sağlayan ve bunun için tüm imkân ve olanaklarını sunarak bana destek olan, yol gösteren, saygıdeğer eş danışman hocam Sn. Prof. Dr. Ali KOŞAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmasının üretim ve deneyler aşamasında bana gerekli tüm destekleri sunarak, çalışmamın gerçekleşmesinde çok değerli görüşlerini, tecrübelerini ve yardımlarını benden esirgemeyen Sn. Yüksek Mühendis Vahid Ebrahimpour AHMADİ ve Sn. Dr. Süleyman ÇELİK'e çok teşekkür ederim.

Bu günlere gelebilmem için eğitimimde temel olarak iyi okullarda okumam için tüm fedakârlık ve özveri ile elinden geleni yapan ve aile olmanın bilincini bize benimseten merhum babam Orhan ŞİMŞEK'e, babamın eksikliğini maddi manevi hiç bir zaman hissettirmemek için gösterdiği üstün çaba, fedakarlık ve özverisi için çok kıymetli annem Bahriye ŞİMŞEK'e, tüm sıkıntılı zamanlarımı aşmamda yardımcı olan ve bu güne kadar yanımdan hiç ayrılmayan, en büyük sığınaklarım olan ve her şeylerini örnek alarak büyüdüğüm ablam Tuğba Sema ŞİMŞEK YILDIZ ve abim Mustafa ŞİMŞEK 'e en derin duygularıyla teşekkür eder, şükranlarımı sunarım.

Nisan 2023

Sevda ŞİMŞEK
(Makine Yüksek Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür İncelemesi.....	1
1.1.1 Mikro pompa tasarımı	1
1.1.2 Mikro pompa üretimi	4
1.1.2.1 Plazma aşındırma (Kuru aşındırma)	4
1.1.2.2 Islak (Wet) aşındırma	16
1.1.3 Piezoelektrik disk ile tetiklenen mikro pompa	24
1.2 Özgün Değer	30
1.3 Amaç	31
2. TASARIM ve ÜRETİM İLKELERİ.....	33
2.1 Mikro Pompanın Tasarımı	33
2.2 Mikro Pompanın Üretimi	36
2.2.1 Mikro pompa üretimi için kullanılan ekipman.....	36
2.2.1.1 Alt tabaka (substrat)	36
2.2.1.2 Maske	41
2.2.1.3 Temiz oda	47
2.2.2 Mikro pompa ve yardımcı ekipman üretimi.....	54
2.2.2.1 Silikon plaka (wafer) üretimi	54
2.2.2.2 PDMS (Polidimetilsiloksan) üretimi.....	69
2.3 Sistem Kurulumu ve Çalışma İlkeleri	72
2.3.1 Mikro pompa sistem kurulumu	72
2.3.2 Üretilen mikro pompa sisteminin çalışma prensibi.....	74
3. DENEYSEL KURULUM VE İLKELER	77
3.1 Deneysel Ekipman Kurulumu	77
3.2 Deney İlkeleri	78
4. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI	83
4.1 Sürüş Frekans Değerinin Akışkan Debisi Üzerine Etkisi	82
4.2 Uyarma Voltaj Değerinin Akışkan Debisi Üzerine Etkisi	83
4.3 Sürüş Frekans Dalga Türünün Akışkan Debisi Üzerine Etkisi.....	84
4.4 Çalışma Sıvısının Akışkan Debisi Üzerine Etkisi.....	86
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	91

KAYNAKLAR.....	93
ÖZGEÇMİŞ.....	101



KISALTMALAR

ALD	: Atomic Layer Deposition
ASE	: Advanced Silicon Etching
CAD	: Computer Aided Design
CFD	: Computational Fluid Dynamics
CVD	: Chemical Vapor Deposition
DRIE	: Deep Reactive Ion Etching
DSP	: Double-Side Polishing
HEPA	: High Efficiency Particulate Airfilter
ICP	: Inductively Coupled Plasma
LPCVD	: Low-Pressure Chemical Vapor Deposition
MEMS	: Micro-Electro Mechanical System
MFC	: Mass Flow Controllers
PDMS	: Polydimethylsiloxane
PMMA	: Polymethyl Methacrylate
PZT	: Piezoelectric lead Zirconate Titanate
RF	: Radio Frekans
RIE	: Reactive Ion Etching
UV	: Ultraviyole



SEMBOLLER

h_{cam}	: Cam lamel kalınlığı
$h_{membran}$: Membran kalınlığı
h_{PDMS}	: PDMS kalınlığı
h_{pompa}	: Pompa odasının derinliğı
$h_{silikon}$: Silikon plaka kalınlığı
L_1	: Piezoelektrik konum merkezi ile akışkan beslenmek/boşaltmak için kullanılan kanalın merkezi arası uzaklık
L_2	: Lüle/yayıcı kanal uzunlukları
$R_ç$: Akışkan çıkış için kullanılan kanal çapı
R_g	: Akışkan giriş için kullanılan kanal çapı
R_p	: Piezoelektrik diskin yerleştirileceğı alanın çapı
w	: Lüle/yayıcı alanlarının en dar kesitlerinin çapı
θ	: Lüle/yayıcı açısı
ω	: Açısal hız



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1 : Dikey yan duvarlarda sonuçlanan Cryo-DRIE işlemlerinin tipik işlem..... parametreleri.....	15
Çizelge 1.2 : İzotropik ıslak aşındırıcı çeşitleri.....	17
Çizelge 1.3 : Farklı anizotropik ıslak aşındırıcı özellikleri.....	20
Çizelge 2.1 : Silikon, alüminyum ve çeliğin temel özelliklerinin karşılaştırılması.....	37
Çizelge 2.2 : Tipik sert maske malzemeleri ve en sık kullanılan biriktirme (deposition)..... ve desenleme (patterning) yöntemleri ve uygulamaları.....	46
Çizelge 2.3 : Tipik temiz odalar ve temiz bölgeler için seçilen havadaki partikül temizlik..... sınıfları.....	48
Çizelge 2.4 : Tipik temiz odalar ve temiz bölgeler için seçilen havadaki partikül temizlik..... sınıfları.....	50
Çizelge 3.1 : Çalışma sıvılarının özelliklerinin listesi.....	78
Çizelge 4.1 : Piezoelektrik valfsiz mikro pompa ile yapılan deney parametreleri.....	82



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : a) Mikro pompanın üstten görüntüsü, (b) mikropompanın yan kesit görüntüsü,.. (c) lüle/yayıcının üç boyutlu şematik görüntüsü, (d) lüle/yayıcının iki boyutlu... şematik görüntüsü.....	2
Şekil 1.2 : Piezoelektrik mikro pompanın yapı diyagramı. (a) tüm mikro pompanın..... patlatılmış görünümü. (b) mikrokanalın ve pompa gövdesinin iki boyutlu..... yapısı. (c) mikrokanalın plan görünümü ve bir mikrokanalın SEM görüntüsü..... (d) pompa gövdesinin yapısal parametresi. (e) komple pompa yapısal..... fotoğrafi.....	3
Şekil 1.3 : Mikro pompa geometri ve ölçüleri.....	3
Şekil 1.4 : RIE-Bosch sürecinin şematik gösterimi.....	7
Şekil 1.5 : Bosch derin silikon aşındırma işleminin yan duvar pasivasyon mekanizması....	9
Şekil 1.6 : Tipik bir “Bosch DRIE” prosesinden kaynaklanan hendek profilleri ve yan..... duvar yapısı.....	10
Şekil 1.7 : STS Multiplex ICP dağlama sisteminin şematik diyagram.....	12
Şekil 1.8 : Uzun aşındırma çevrimleri ve çok kısa pasivasyon çevrimleri arasında “ultra.... hızlı geçiş” için plazma odasına gaz beslemesi tasarımı.....	13
Şekil 1.9 : Silikon yüzeyin kriyojenik aşındırma işleminin gösterimi.....	14
Şekil 1.10 : Silikon yüzeyin kriyojenik aşındırma işleminin gösterimi.....	16
Şekil 1.11 : Silikon atomların kübik kafesindeki farklı kristal düzlemler.....	18
Şekil 1.12 : (100) Silikon plakasında, anizotropik ıslak aşındırılmış profiller.....	18
Şekil 1.13 : 78°C’de %50 KOH’da farklı kristal yönlerindeki dağlama oranları:(a) <100>Si: hızlı, ancak (010) yönünde maksimum dağlama yok ve (b) <110>..... Si: (010) maksimum aşındırma hızına yakın	23
Şekil 1.14 : Piezoelektrik uygulaması örneği; yüksek voltaj ve güç kaynakları.....	25
Şekil 1.15 : Piezoelektrik uygulaması örneği; piezoelektrik kuvvet sensörü.....	26
Şekil 1.16 : Mikropompanın 3D yapı görüntüsü	28
Şekil 1.17 : Piezoelektrik mikropompa akışkanın geçiş anı ve piezoelektrik malzemin..... hareketi.....	28
Şekil 2.1 : Tasarlanan mikro pompa CAD görüntüsü	33
Şekil 2.2 : Tasarlanan mikro pompanın kesit - CAD görüntüsü.....	34
Şekil 2.3 : Mikro pompanın üst yapı şeması.....	35
Şekil 2.4 : Mikro pompanın alt yapı şeması.....	35
Şekil 2.5 : (a) Mikro pompanın, (b) Mikro pompa sisteminin genel yan kesit görüntüsü..	36
Şekil 2.6 : Silikon kristal düzlemlerinin gösterimi.....	38
Şekil 2.7 : Farklı açılardan bakıldığında silikon kristal: (a) yüz görünümü (100); (b) kenar. görünümü (110); (c) tepe görünümü (111).....	38
Şekil 2.8 : Silikon plaka için “oryantasyon belirleme deneyi”.....	39
Şekil 2.9 : Çeşitli çap ve kalınlıkta bulunan her iki yüzeyi de parlatılmış silikon plaka..... görüntüsü.....	41

Şekil 2.10 : Maske kusurları: özellik boyutundan daha küçük kusurlar nihai boyutları ve ... dolayısıyla akım yoğunluğunu, elektrik alanını ve diğer cihaz parametrelerini... etkiler.....	42
Şekil 2.11 : (a) Mikro pompaya akışkan giriş / çıkışını sağlayan kanalların üst görüntüsü,... (b) maske markalama görüntüsü.....	43
Şekil 2.12 : Mikro pompaya akışkan giriş / çıkışını sağlayan kanalların ve piezoelektrik... diskin konumlandırılacağı alanın üst görüntüsü.....	44
Şekil 2.13 : (a) Mikro pompaya odası, lüle/yayıcı üst görüntüsü, (b) pompa odası,... lüle/yayıcının büyütülmüş görüntüsü.....	44
Şekil 2.14 : Islak aşındırıcı çözültisi kullanılarak (100) silikonda V şeklinde bir oluğun... oluşturulmasının kesit görüntüsü.....	45
Şekil 2.15 : Yarı iletken üretiminde sıklıkla kullanılan dikey akışlı temiz oda..... (R.A=Dönüş Havası)	49
Şekil 2.16 : Sabancı Üniversitesi – SUNUM Temiz oda genel görüntüsü.....	49
Şekil 2.17 : Sabancı Üniversitesi – SUNUM Temiz oda şematik gösterimi.....	51
Şekil 2.18 : Sabancı Üniversitesi – SUNUM temiz oda içerisindeki kullanım amaçlarına... göre farklılık gösteren laboratuvarların temel görüntüsü.....	52
Şekil 2.19 : (a) Temiz oda servis alanına girmek için kullanılan kıyafet ve ekipmanlar,... (b) temiz oda kullanım amacına göre giyilmesi gereken ekipmanlar.....	53
Şekil 2.20 : Sabancı Üniversitesi – SUNUM temiz oda kıyafet ve ekipman giyinme odası.. şematik gösterimi.....	54
Şekil 2.21 : Mikro pompa üretim adımlarını içeren proses şeması.....	55
Şekil 2.22 : Silikon plakanın üst/alt yüzey ve bu yüzeylerde aşınma işlemi..... gerçekleştirilecek alanların gösterimi.....	56
Şekil 2.23 : İlk adımda aşınma işleminin gerçekleştirileceği alanların gösterimi.....	56
Şekil 2.24 : (a) E-ışın buharlaştırma yöntemi ile yüzey kaplama cihazı genel görüntüsü,... (b) yüzey kaplamanın yapıldığı iç alan gösterimi.....	57
Şekil 2.25 : (a) E-ışın buharlaştırma yöntemi için kullanılacak silikon plakanın sabitleme.. aparatına bağlanmış şeklinin, (b) e-ışın (e-beam) buharlaştırma yöntemi ile Al. ile kaplanan silikon plaka gösterimi.....	58
Şekil 2.26 : Fotolitografi çalışma tezgâhı ve detay görüntüleri; (a) ön ve arka ocak, (b)..... döner levha (spinner), (c) atık boşaltım alanı, (d) kontrol paneli gösterim.....	59
Şekil 2.27 : Fotolitografi tekniği ile AZ 5214 E kaplanmış silikon plaka yüzey görünümü... ..	59
Şekil 2.28 : (a) Maske Hizalayıcı UV-Litografi cihazı genel görüntüsü, (b) kontrol paneli,... (c) silikon plakanın yerleştirildiği alan görüntüsü.....	60
Şekil 2.29 : MIF726 geliştirici uygulanmış silikon plakada oluşan desen görüntüsü.....	61
Şekil 2.30 : Alüminyum aşındırıcı uygulanmış silikon plakada oluşan desen görüntüsü... 62	
Şekil 2.31 : Kuru aşındırma yönteminin (DRIE) gerçekleştirildiği cihaz görüntüsü..... 63	
Şekil 2.32 : Kuru aşındırma yöntemi (DRIE) ile 160 µm aşınan giriş/çıkış kanallarının (a).. üst ve (b) yakın detay görüntüsü..... 64	
Şekil 2.33 : MIF 726 geliştirici uygulanmış silikon plakada oluşan desen görüntüsü..... 65	
Şekil 2.34 : Kuru aşındırma yöntemi (DRIE) ile 340 µm aşınan giriş/çıkış kanalları ve... PZT tetikleyici..... 66	
Şekil 2.35 : Aşındırma işlemi bitmiş, üzeri fotorezist (AZ 4562) ile kaplı silikon plakanın.. alt yüzey görüntüsü..... 68	
Şekil 2.36 : Fotorezisti temizlenmiş ve tasarım ebatlarına getirilmiş silikon plakanın alt.... yüzey görüntüsü..... 69	
Şekil 2.37 : PDMS üretimi için kullanılan (a) silikon elastomer baz ve (b) sertleştirici..... malzeme..... 69	

Şekil 2.38 : PDMS üretimi için kullanılan vakumlu fırın ön görüntüsü.....	70
Şekil 2.39 : Vakum altında köpük üreten PDMS karışım görüntüsü.....	71
Şekil 2.40 : Tez kapsamında üretilen homojen PDMS görüntüsü.....	71
Şekil 2.41 : Piezoelektrik dönüştürücü (PZT) aktüatör görüntüsü.....	74
Şekil 2.42 : PZT ile çalıştırılan valfsiz mikro pompanın şematik görüntüsü.....	75
Şekil 2.43 : Valfsiz bir mikro pompanın çalışma prensibi; (a) mikro pompa sisteminin..... enine kesit görünümü, (b) mikro pompanın üstten görünümü.....	76
Şekil 3.1 : Deney düzeneğinin şeması.....	77
Şekil 3.2 : (a) Mikro pompa sisteminin üstten görünüşü, (b) 0.1-2.5 µl / 0.5-10 µl / 10-100 µl için Mikropipetler (ISOLAB, Laborgerate GmbH).....	79
Şekil 4.1 : Sabit 60 V_{p-p} uyarma voltaj değerinde değişen sürüş frekans değerinin..... akışkan debisi üzerine etkisi.....	83
Şekil 4.2 : Sabit 150 Hz sürüş frekans değerinde, uyarma voltaj değerinin [V_{p-p}] bir..... fonksiyonu olarak akış hızı.....	84
Şekil 4.3 : Farklı sürüş frekansları dalga türünün akışkan debisi profili.....	85
Şekil 4.4 : Farklı çalışma sıvısının akışkan debisi üzerine etkisi.....	87



PIEZOELEKTRİK İLE TETİKLENEN VALFSİZ MİKRO POMPA TASARIMI, ÜRETİMİ VE AKIŞKAN DEBİSİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Tez kapsamında, mikro akışkanlar için yapılan çalışmaları destekleyici ve yol gösterici olması adına, kontrol edilebilir sıvı akış hızları sağlayan en önemli mikro akışkan cihazları arasında gösterilen, mikro düzey pompa üzerinde çalışılmıştır. Öncelikle mikro düzey pompalar için genel bir literatür araştırması yapılmıştır. Literatür incelemelerinde mikro ölçülere sahip alanlarda yapılan çalışmaların çoğunlukla sayısal simülasyonlar oldukları görülmektedir. Deney düzeneklerinin kurulumlarının oldukça yüksek maliyetlere sebep olmasının yanı sıra deney düzeneği hazırlamak, mikro ölçekte zorlayıcıdır. Mikro ölçekteki yapıların incelenmesi için teknolojik olarak üst düzey deney düzeneklerini içeren laboratuvar alanları gerekmektedir. Bu tezde mikro pompada akışkanı tetikleyecek çalışma mekanizması olarak piezoelektrik disk ele alınmıştır. Piezoelektrik kullanım alanlarından olan elektrik enerjisi-mekanik enerji dönüşümlerinde kullanılan mikropompa tasarımı, tasarlanan mikro pompanın üretimi ve üretilen mikro pompa ile akışkan debisi temel çıktı olarak düşünülerek deneyler yapılmış ve bu debiyi etkileyen faktörler incelenmiştir.

Bu bilgiler ışığında tez içeriği üç temel başlıkta açıklanabilir; i) tasarım, ii) üretim, iii) deneysel çalışmalar.

- i) Tasarım için ilk ele alınan konu valf içerip, içermeyecek olmasıdır. Hareketli valflere sahip pompalar, valfler boyunca yüksek basınç düşüşü ve hareketli parçaların aşınması ve yorulması gibi sorunlar içerebilir. Bu ömrün ve güvenilirliğin azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle hareketli parçası olmayan pompalara ihtiyaç duyulmasından dolayı tez kapsamında valf kullanmadan lüle ve yayıcı prensibine dayalı olan mikro düzey bir akışkan pompası tasarlanmıştır. Böylelikle temelde bir pompa odası ve bu pompa odasına akışkan besleyip / boşaltması için lüle ve yayıcı tasarımı yapılmıştır. Diğer bir önemli konu ise akışkanın nasıl tetikleneceğidir. Bu durum için de piezoelektrik disk kullanılmıştır. Piezo malzemenin elektrik akımı ile tetiklenmesi ile aşağı yukarı hareketi sağlanmıştır. Bu hareket pompa odasında basınç oluşturarak akışkanın hareketi sağlanmıştır. Tez kapsamında 80 µm derinliğe ve 15 mm çap değerine sahip pompa odası, ayrıca açısı 9.4 °, uzunluğu 2.82 mm olan lüle ve yayıcı tasarlanmıştır.
- ii) Mikro düzey üretim yöntemleri hem pahalı hem de özel çalışma alanları gerektirmektedir. Ayrıca, tolerans değerleri çok hassas değerler içermektedir. Büyüklükler mikro düzeyde olduğu için üretimi de oldukça zor süreçlere sahiptir. Üretim alanı için SABANCI üniversitesinde, “temiz oda” adı verilen özel laboratuvarlar kullanılmıştır. Üretim yöntemleri aşındırma çeşidine göre 2 temel sınıfa ayrılmaktadır: Islak aşındırma ve plazma aşındırma. Kuru aşındırma terimi de genellikle plazma aşındırma ile eş anlamlı olarak kullanılmaktadır. Tez kapsamında kullanılan kuru aşındırma yöntemleri adım adım ele alınmıştır. Tezin amaçlarından biri de kuru aşındırma ile üretim adımlarını önceden planlayarak hem üretim süresini hem de üretim maliyetini minimum tutma yöntemini elde etmek olmuştur. Burada bahsedilen amaç, silikon plakanın üst yüzeyine

yerleştirilecek olan piezoelektrik tetikleyici disk yuvası ve akışkanın pompa odasına giriş/çıkışını sağlayacak kanalların aşındırma işlemi sırasında avantaj olarak sağlanmıştır. Bu avantaj aşındırma yöntemi için kullanılan yöntem ve aşındırma esnasında kullanılan maske çeşitleridir. Bu iki temel avantaj sayesinde toplam üretim süresinde ciddi bir zaman kazanılmıştır. Ayrıca bu adımlar ile üretim için harcanan toplam maliyet de azaltılmıştır. Maliyet azaltımında en önemli etkenlerden biri kuru aşındırma yöntem (DRIE) cihazının kullanım süresinin azaltılmasıdır.

- iii) Kuru aşındırma yöntemi ile en kısa sürede üretilen mikro pompa silikon plaka yapı, cam lamel, PZT tetikleyici elemanı ve PDMS sızdırmazlık elemanı ile birleştirilerek mikro düzey bir pompa elde edilmiş ve bu mikro pompa ile debi değerini etkileyen faktörler için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Temelde dört parametre detaylı olarak incelenmiştir; sürüş frekansı, uyarma voltajı, frekans dalga tipi ve çalışma sıvısı.

Sürüş frekans değerinin akış debisi üzerine etkisi incelendiğinde, akış debisinin mikro pompanın rezonans frekans değerine (150 Hz) kadar arttığı ve bu frekans değerinden sonraki artan frekans değerleri ile akış debisinde keskin bir şekilde azalma görülmüştür.

Uyarma voltaj değerinin akış debisi üzerine etkisi incelendiğinde, V_{p-p} değeri 10 [V]'den 60 [V]'ye yükseltildiğinde, bu değişim ile birlikte akış debi değerinde de düzenli bir artış gözlemlenmiş ve akış debi değeri 16 $\mu\text{l}/\text{dk}$ 'dan 52 $\mu\text{l}/\text{dk}$ 'ya yükselmiştir.

Farklı dalga türlerinin akış debisi üzerine etkisi incelendiğinde, dalga türlerinden en büyük akışkan debi değeri “kare dalga” türü ile sağlanırken bunu sırası ile “sinüs dalga” ve “üçgen dalga” türleri takip etmiştir.

Farklı viskozite değerlerine sahip olan çalışma sıvılarının akışkan debisi üzerine etkisi incelendiğinde, aralarında en düşük viskozite değerine sahip olan metanolün, damıtılmış su ve etanol ile karşılaştırıldığında daha yüksek akış debisi sağladığı elde edilmiştir.

Tez kapsamında yürütülen çalışma, valf kullanmadan mikro kanallar kullanılarak sıvıların taşınmasının pompalama ilkeleri hakkında öncü niteliktedir. Parametrik etkileri ortaya koyması ve tasarım kılavuzları sağlaması sayesinde bu çalışma, ilaç dağıtımını gibi birçok uygulamada kullanılacak valfsiz piezoelektrik mikro pompaların tasarımı ve geliştirilmesi için bir referans potansiyeli taşımaktadır. Mikro düzey yapıların üretilmesi, üretilen bu mikro düzey cihazlardan geçen akışları ve bu cihazlarında MEMS (Mikro Elektro Mekanik Sistemler) uygulamalarındaki yerini daha da geliştirmek ve gelecekteki araştırmalar için tasarım, üretim yöntemleri ve yapılan deneysel çalışmalar alanında önerilerde bulunulmuştur.

DESIGN, FABRICATION AND DEFINING FACTORS AFFECTING FLUID FLOW RATE OF VALVELESS PIEZOELECTRIC-TRIGGERED MICROPUMP

SUMMARY

At past time, the big companies aim to supply the primary needs of the consumers. But now, there are like this aims of company however this company that have innovations attaches great importance to this work which provide ease for life of consumer and their activities in this direction increases day by day. One of the main factors that will provide convenience to the consumer's life is that the existing structures become more compact by reducing their size, thus reducing the space they occupy and also providing ease of use. With this change, the orientation towards micro-level structures is increasing. In addition, when the micro level is mentioned, the health sector comes first among the main sectors than the other technology. In recent years, microfluidic systems have received increasing attention as they can be applied to a wide variety of applications such as drug delivery, disease diagnosis, isolation of microparticles/cells and micro mixing.

In the these thesis, the micro-level pump, which is one of the most important microfluidic devices that provides controllable fluid flow rates, has been studied in order to support and guide the studies for microfluidics. First of all, a general literature search was conducted for microlevel pumps. In the literature review, it is seen that the studies carried out in areas with micro dimensions are mostly numerical simulations. In addition to the fact that the setup of the experimental parts causes very high costs, preparing the experimental setup is quite challenging for micro-scale studies. Laboratory areas with technologically advanced experimental setups are required for the examination of micro-scale structures. In this thesis, the piezoelectric disc is considered as the operating mechanism that will trigger the fluid in the micro pump. The micropump design used in electrical energy-mechanical energy conversions, which is one of the piezoelectric usage areas, the production of the designed micropump and the fluid flow rate with the produced micropump were considered as the basic output, and experiments were carried out and the factors affecting this flow rate were examined. With this information, the content of the thesis can be explained under three main headings; i) design, ii) fabrication, iii) experimental studies to define any factor affecting fluid flow rate.

- i) The first consideration for the design is whether it will contain a valve or not. Pumps with moving valves can have problems such as high pressure drop across the valves and wear and fatigue of moving parts. This results in reduced life and reliability. For this reason, due to the need for pumps without moving parts, they designed a micro-level fluid pump based on the nozzle and diffuser principle without using valves at these thesis. Thus, basically a pump room and a nozzle and diffuser design have been made to feed/discharge fluid into this pump room. Another important issue is how to trigger the fluid. In this case, piezoelectric disc is used. By triggering the piezo material with electric current, its up and down movement is provided. This movement created pressure in the pump chamber and the movement of the fluid was ensured. At these thesis, a pump chamber with a depth of 80 μm and 15 mm, as well as a nozzle and diffuser with an angle of 9.4 ° and a length of 2.82 mm were designed.

- ii) Micro-level pump production also has very difficult processes, because micro-level production methods are expensive, require special working areas and tolerance values are very sensitive values. SABANCI University, special laboratories called “clean rooms” were used for the production area. MEMS (Microelectromechanical Systems) production techniques were used during the production of micro pumps. For the production of micropumps, silicon wafer with 500 μm thickness, 100 mm diameter, (100) orientation and both surfaces polished was used. A slot is created on the upper surface of the silicon plate where the piezoelectric trigger material will be located. This created slot has a depth of 340 μm . The lower surface of the silicon plate was used for the pump chamber, nozzle and diffuser. These structures have the same thickness, 80 μm . The inlet/outlet channels of the fluid were created using the entire micropump plate thickness, 500 μm , from the upper surface to the lower surface of the silicon wafer. Production methods are divided into 2 basic classes according to the type of etching: Wet etching and plasma etching. The term dry etching is also often used synonymously with plasma etching. Dry etching methods used in the thesis are discussed step by step. One of the aims of the thesis was to obtain a method of keeping both production time and production cost to a minimum by planning the production steps with dry etching in advance. With the piezoelectric trigger material slot on the upper surface of the silicon wafer and the methods and mask types used during the inlet/output channels etching process, a significant time saving advantage has been achieved in the total production time. In addition, with these steps, the total cost spent for production has been reduced. One of the most important factors in cost reduction is the reduction of the lifetime of the dry etching method (DRIE) device.
- After the etching process applied to both surfaces of the silicon wafer, the PDMS material used for the sealing element was produced. Here, PDMS with different thicknesses was produced on both surfaces of the silicon wafer. The thickness of the PDMS sealing element produced especially for the bottom surface of the silicon wafer is very thin compared to the total thickness of the silicon wafer. PDMS sealing element is used on this surface for two reasons: The first is to ensure that the bottom surface of the silicon wafer is combined with the glass lamella. Here, the material surface energy was increased by using the oxygen plasma device and the adhesion process was realized. The other reason is that in case of any break in the glass lamella applied to the lower surface of the silicon wafer, the PDMS sealing element prevents the glass lamella from breaking into pieces and ensures the continuity of the experiments.
- iii) Micro pump produced in the shortest time by dry etching method is combined with PZT trigger element to obtain a micro level pump and experimental studies have been carried out for the factors affecting the flow rate of this micro pump. Basically, four parameters have been studied in detail; driving frequency, excitation voltage, frequency wave type and working fluid.
- When the effect of the driving frequency value on the flow rate was examined, it was observed that the flow rate increased up to the resonance frequency value of the micro pump (150 Hz) and the flow rate decreased sharply with the increasing frequency values after this frequency value.

When the effect of the excitation voltage value on the flow rate is examined, when the V_{p-p} value is increased from 10 [V] to 60 [V], a regular increase was observed in the flow rate value with this change, and the flow rate increased from 16 $\mu\text{l}/\text{min}$. to 52 $\mu\text{l}/\text{min}$.

When the effect of different wave types on the flow rate is examined, the largest fluid flow value among the wave types is obtained with the "square wave" type, followed by the "sine wave" and "triangular wave" wave types, respectively.

When the effect of working fluids with different viscosity values on the fluid flow rate was examined, it was found that methanol, which has the lowest viscosity value among them, provided higher flow rate compared to DI-water and ethanol.

The work carried out within these thesis is pioneering on the pumping principles of transporting liquids using micro channels without using valves. By demonstrating parametric effects and providing design guidelines, this study has a reference potential for the design and development of valveless piezoelectric micropumps to be used in many applications such as drug delivery. Below suggestions have been made in the field of design, production methods and experimental studies for the production of micro-level structures, the flow through these micro-level devices and the development of these devices in MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) applications and for future research.

- The effect of changing the angle used in the nozzle and diffuser design on the fluid flow rate should be considered in the design of the micro pump, which is designed with a nozzle/spreader without using a valve.
- Dry etching method (DRIE) was used for etching during production. For future studies, wet etching method can be considered as etching method. The important point in the wet etching method is the choice of film material to cover the surface of the silicon wafer for areas that we do not want to masked, while ensuring that the total thickness of the silicon wafer (500 μm) is eroded. For this, the choice of film material in metallic form should be made.
- A silicon plate membrane is designed to prevent contact with the fluid and piezoelectric trigger material in the produced micro pump. In future studies, the effect of the membrane material on the fluid flow rate should be considered by designing a PDMS membrane instead of a silicon membrane.
- Oxygen plasma method was used by using PDMS in the form of a thin membrane to close the pump chamber and nozzle/spreader opening on the lower surface of the silicon plate with a glass lamella. In future studies, the effect of joining silicon wafer and glass lamella to each other by anodic bonding method on fluid flow rate should be examined.
- Piezoelectric trigger material was used to provide membrane movement within these thesis. In future studies, it is recommended to perform experiments by changing the trigger method (for example, acoustic interactions). Thus, the trigger material suitable for the maximum fluid flow will be determined.
- By examining the membrane movement with the help of devices that can measure the micro-level displacements during the experiments, the movement of the upstream according to time (up/down) and the location of this movement (membrane center, nozzle outlet, diffuser entrance, etc.) can be determined.

- Experiments on the micro pump used in the thesis were carried out with zero back pressure. To address the change in fluid flow rate when back pressure is applied, the flow rate variation should be studied by applying various pressure values to the outlet channel.



1. GİRİŞ

Tez kapsamında mikro akışkanlar için yapılan çalışmaları destekleyici ve yol gösterici olması adına mikro düzey pompa üzerinde çalışılmıştır. Öncelikle mikro düzey pompa (çapı 15mm ve derinliği 80µm) tasarımı için literatür araştırmaları yapılmış ve tez kapsamında kullanılmak üzere bir tasarım elde edilmiştir.

Yapılan tasarıma uygun mikro pompa üretimi için literatür çalışması yapılmış ve en uygun üretim yöntemi seçilerek üretimi sağlanmıştır. Elde edilen mikro pompa için çalıştırma mekanizması olarak piezoelektrik disk kullanılmıştır. Bu aşamada sırasıyla mikro pompa için tasarım, üretim ve çalıştırma mekanizmasına dair literatür araştırması yapılmıştır. Bu aşamada, literatür araştırması sonrası tezin özgün değerleri ve hedefi detaylı şekilde ele alınmıştır.

1.1 Literatür İncelemesi

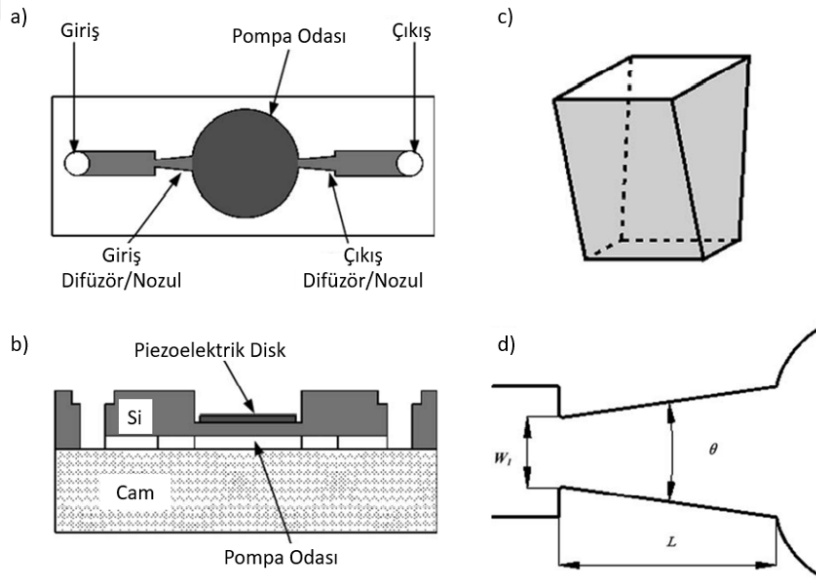
Son yıllarda, mikroakışkan sistemler ilaç ve sıvı dağıtımı [1], [2] hastalık teşhisi [3], mikro partiküllerin/hücrelerin izolasyonu [4], [5] ve mikro karıştırma [6] gibi çok çeşitli uygulamalara uygulanabildikleri için artan bir ilgi gördü. Mikropompalar, kontrol edilebilir sıvı akış hızları sağlayan en önemli mikro akışkan cihazları arasındadır. Tez kapsamında, mikro pompanın üretimi için silikon plaka (wafer) kullanılacaktır. Daha sonra silikon plaka (wafer) üzerine işlenen mikro pompa çalıştırma mekanizması olarak piezoelektrik disk ile tetiklenecektir.

1.1.1 Mikro pompa tasarımı

Yapılan literatür çalışmasında çok sayıda pompa tasarım prensibi olduğu görülmüştür. Bu pompa tasarımları valf içeren ve valf içermeyen olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar. Geleneksel bir diyaframlı pompa salınımlı bir diyaframa bağlı iki pasif valften oluşur. Hareketli valflere sahip pompalar, valfler boyunca yüksek basınç düşüşü ve hareketli parçaların aşınması ve yorulması gibi sorunlar içerebilir. Bu ömrün ve güvenilirliğin azalmasına neden olmaktadır. Genellikle bu pompalar birkaç Hertz gibi düşük

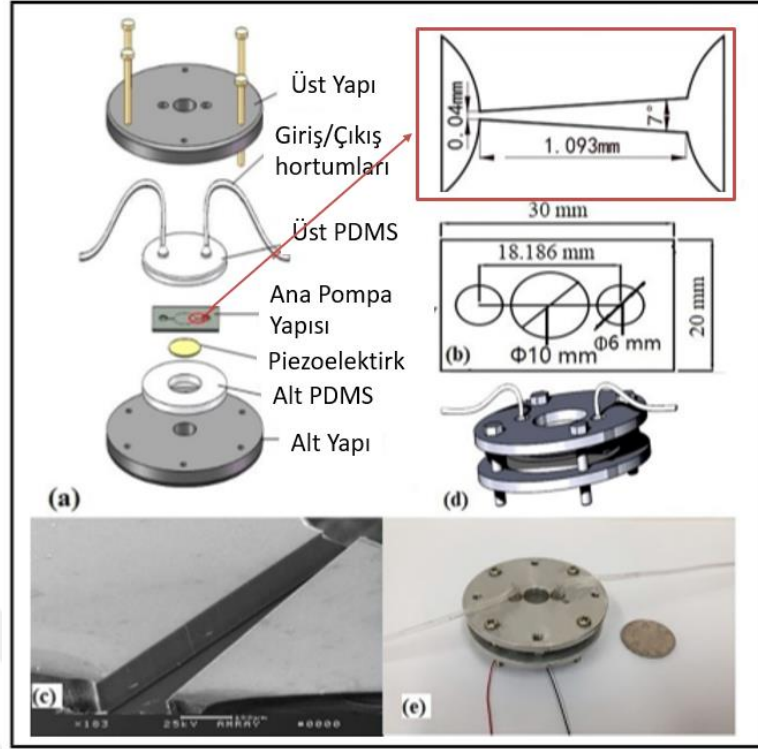
düzeydeki pompa frekanslarda çalıştırılmaktadır. Bu nedenle hareketli parçası olmayan pompalara ihtiyaç duyulmaktadır. Son yıllarda geliştirilen bu pompaların çoğu, silikon fotolitografi yöntemi kullanılarak üretilmiştir [7].

Cui Q. ve arkadaşları 2006 yılında kontrollü bir şekilde ilaç verme sistemi için piezoelektrik ile tetiklenen bir mikro pompa üzerinde çalışmışlardır. Şekil 1.1’ de gösterildiği gibi bu çalışmada valf kullanmadan lüle ve yayıcı prensibine dayalı olan mikro düzey bir akışkan pompası tasarlamışlardır. Pompa odası çapı 6 mm ve kalınlığı 0.1 mm olarak belirlenmiştir. Lüle/yayıcı uzunluğu (L) 1.1 mm, açısı (θ) 9.4° ve en dar uzunluğu (w) ise 0.1 mm olarak tasarlanmıştır. Tasarımını yaptıkları bu mikro pompanın en verimli yapısını elde etmek için diyafram, piezoelektrik disk ve piezo elektrik tahrik giriş voltajı ve frekansı vb. parametreleri incelemişlerdir [8].



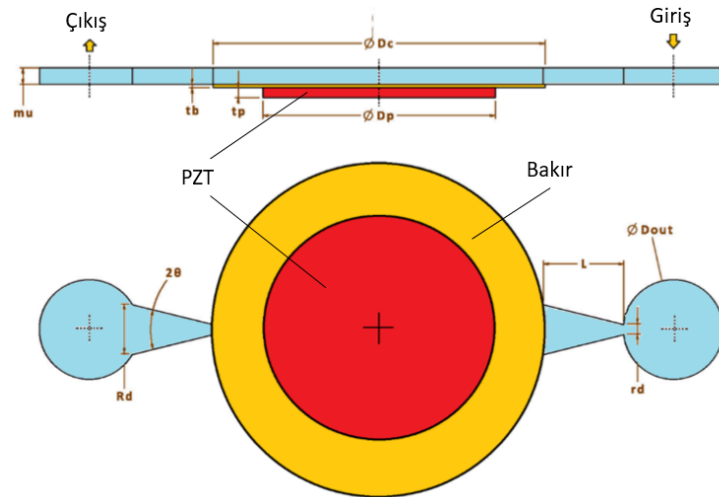
Şekil 1.1 : (a) Mikro pompanın üstten görünüşü, (b) mikropompanın yan kesit görünüşü, (c) lüle/yayıcının üç boyutlu şematik görünüşü, (d) lüle/yayıcının iki boyutlu şematik görünüşü [8].

Guan ve arkadaşları (2020), piezoelektrik malzemeyi akışkan tetikleyici olarak kullanarak mikro pompa tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Şekil 1.2’de gösterildiği üzere iki adet PDMS arasına silikon yapıya üretilmiş mikro pompa koyulmuştur. Piezo malzemenin elektrik akımı ile tetiklenmesi ile akışkan hareketi sağlanmıştır. Üretilen yapıda pompa odası çapı olarak 10mm, akışkan rezervuarı olarak belirlenen yapılar için 6mm çap belirlenmiştir. Diğer önemli bir yapı olarak lüle ve yayıcı için belirlenen boy 1.093 mm ve açı 7° ‘dir. Lüle ve yayıcı için en küçük alan ölçüsü 0.04mm’dir [9].



Şekil 1.2 : Piezoelektrik mikro pompanın yapı diyagramı. (a) tüm mikro pompanın patlatılmış görünümü. (b) mikrokanalın ve pompa gövdesinin iki boyutlu yapısı. (c) mikrokanalın plan görünümü ve bir mikrokanalın SEM görüntüsü. (d) pompa gövdesinin yapısal parametresi. (e) komple pompa yapısal fotoğrafı [9].

Diğer bir çalışma Alp Kaçar ve arkadaşları [2020] tarafından çalışılmıştır [10]. Bu çalışmada da pizeoelektrik hareketi ile akışkan hareketi sağlanmaktadır. Şekil 1.3 'de belirtilen mikro pompa tasarımı sağlamışlardır.



Şekil 1.3 : Mikro pompa geometri ve ölçüleri [10].

D_c ile gösterilen pompa odası çapı 27 mm ve kalınlığı (t_b) 0.2 mm olarak belirlenmiştir. Pompa odasına akışkan giriş ve çıkışını sağlayan lüle ve yayıcılar aynı

ebatlarda kullanılmış ve büyük çap(R_d) ve en küçük çapı (r_d) sırası ile 0.25 mm ve 50 μ m, uzunluğu (L) 0.5 mm ve açısı (θ) 11° olarak belirlenmiştir. Akışkanı tetiklemek amaçlı kullanılan piezoelektrik çapı (D_p) 0.25 mm ve kalınlığı (t_p) 0.4 mm olarak kullanılmıştır. Tasarlanan mikro pompaya sağlanan akışkan için oluşturulan rezervuar çapı (D_{out}) 3 mm olarak belirlenmiştir [10].

1.1.2 Mikro pompa üretimi

Mikro pompa üretim yöntemleri aşındırma çeşidine göre 2 temel sınıfa ayrılmaktadır [7]: Islak aşındırma ve plazma aşındırma. Islak aşındırma ekipmanı, ısıtılmış bir kuvars banyosundan oluşurken plazma aşındırma ekipmanı, bir RF (Radyo Frekans) jeneratörü ve bir gaz sistemi olan bir vakum odasından oluşmaktadır. Kuru aşındırma terimi de genellikle plazma aşındırma ile eş anlamlı olarak kullanılmaktadır.

1.1.2.1 Plazma aşındırma (Kuru aşındırma)

Valfsiz mikro pompaların imalatında çeşitli yüzeyler ve teknikler kullanılırken, standart aşındırma yöntemlerinden en yaygın plazma aşındırma yöntemlerinden biri DRIE (Deep Reactive Ion Etching) yöntemidir. Derin reaktif iyon aşındırma yapılacağı yüzeylere göre farklılık göstermektedir. Editörlüğünü Jeremy Ramsden'in yaptığı, "Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies" kitabında DRIE ile aşındırma işleminin gerçekleştirileceği malzemeleri dört gruba ayırmıştır. Bunlar; Silikon, Pyrex cam, Silikon Karbür ve Polimer devre levhalarıdır. DRIE süreci seçilen silikon plakaya göre farklılıklar göstermektedir. Bu süreçte silikon plaka için DRIE yöntemi ile aşındırma yöntemi için literatür araştırması yapılmıştır [11].

Silikon plaka için DRIE ile kuru aşındırma işlemi

Silikon devre levhalarını aşındırmak için en çok kullanılan yöntemlerden DRIE aşındırma işlemi temelde 3 ana tekniğe sahiptir. Bunlardan yaygın olarak bilinen Bosch yöntemi, darbeli yöntem veya zaman etki alanlı çoklu süreç (Switched Process veya Time Domain Multiplexed Process) olarak da bilinir. İkinci yöntem, Cryogenic-DRIE ve son olarak Cryo-Processes.

Bu yöntemlerin ana özellikleri aşındırıcı olarak plazma kullanmalarıdır. Plazma kullanarak yapılan kuru aşındırma işlemi, silikon devre levhaları için tam olarak tanımlanmış özellikleri elde etmek için kullanılan en iyi yöntemlerdendir. Ayrıca

mikrokanallar gibi hassas yapılar için, yüksek en-boy oranlı yapının üretimi için genellikle derin reaktif iyon aşındırma (DRIE) yöntemleri kullanılmaktadır [12].

DRIE sürecinde flor bazlı plazma kimyasalı kullanılır. Çünkü silikon için flor bazlı dağlama işlemleri yüksek oranda dağlama oranı ve yüksek oranda maske seçeneği sağlar ve özellikle fotorezist (ışık dirençli yani devre üretimlerinde yüzeye serilerek kullanılan, mor ötesi ışığa duyarlı madde) maskeleymeyi mümkün kılar. Bunun avantajı fotorezist maskeleymenin silikon ve fotomaske arasında iyi bir seçiciliğe sahip olmasıdır. Bu durum da flor proseslerini daha çekici hale getirir [11,13].

Flor bazlı proseslerde dikkat edilmesi gereken temel konu atomların oryantasyonudur. Atomların oryantasyonu, malzemelerde fiziksel ve mekanik özelliklerini etkilediği için önem teşkil etmektedir. Bu duruma dayanarak malzemeler iki gruba ayrılır; izotropik ve anizotropik. Bu ikisi arasındaki temel fark ise izotropik malzemelerin özellikleri her yöne aynı yani ısı ve mekanik yüklemelere karşı her doğrultuda ve yönde aynı tepkiyi veren, buna karşılık anizotropik malzemelerde ise özelliklerin yöne bağlı olma durumudur. Bu bilgi eşliğinde silikon devre levhalarında flor bazlı olan DRIE ile aşındırma incelendiğinde.

Flor radikallerinin yüksek kimyasal reaktivitesi ve spontan dağlama doğası ve silikon florürlerin yüksek uçuculuğu nedeniyle, dağlama özünde izotropiktir. Flor radikalleri, silikon ile reaksiyonlarını başlatmak veya arttırmak veya reaksiyon ürünlerini silikon yüzeyinden çıkarmak için iyon aktivasyonuna ihtiyaç duymadığından, anizotropi sadece yan duvar pasivasyon (pasifleştirme) şemalarının sürece dahil edilmesi ile elde edilebilir [14].

Hem Bosch Process hem de Cryogenic DRIE ile 90 ° (tam dikey) duvarlar üretebilir, ancak genellikle duvarlar hafifçe konikleşir, örnek olarak, 88 ° (re-entrant olarak yani girintili olarak) veya 92 ° (geriye doğru girintili olarak).

Mevcut tüm DRIE teknolojileri, iki şekilde ayırt edilebilir. Bunlar; yan duvar pasivasyonunun (pasifleştirme) elde edilme şekli ve aşındırma işleminin genel performansı ile ayırt edilebilir.

Bosch süreci (Bosch process)

Malzemeleri mümkün olduğunca küçük ve derin olarak şekillendirme arayışı, mikro ve nanofabrikasyonda devam eden bir konudur. Bunun için Bosch prosesi, yüksek en-

boy oranına sahip anizotropik silikon mikro yapılar elde etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [15].

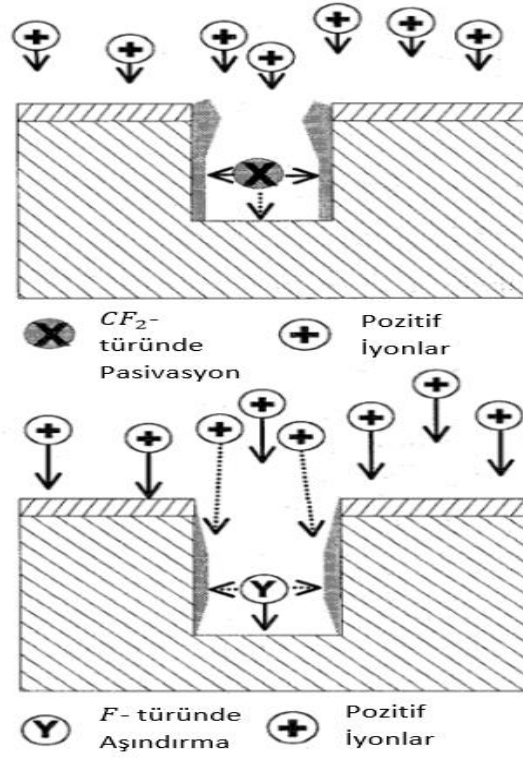
Bosch süreci wafer adı verilen silikon devre levhaları üzerine flor bazlı plazma kimyasal uygulayarak yapı üzerinde hendek yani çukurlar oluşturma işlemidir. Plazma, silikon plakaya (wafer) dikey yönde saldıran bazı iyonlar içerir. Silikon için ise genellikle sülfür heksaflorür [SF₆] kullanılır. Bu yöntem tek seferde artarda tekrarlanabilir. Bu döngü ortalama birkaç saniye sürer. Döngü süresi ayarlanabilir: kısa çevrimler daha düzgün duvarlar verir ve uzun çevrimler daha yüksek bir aşındırma oranı sağlar.

Şekil 1.4 de bu sürecin kısa özeti anlatılmıştır. Şekilde belirtildiği gibi silikon alt tabaka, bu silikon alt tabaka üzerine istediğimiz şekili içeren maske filmi ve son olarak her bir sarkan veya asılı halde bulunan bağı nötralize ederek veya taşıyıcıları yüzeyden uzağa itmek için bir elektrik alan etkisi oluşturarak bu yüzey kusurunu mümkün olduğunca ortadan kaldırmak için bir pasifleştirme filmine ihtiyaç vardır. Pasifleştirme filmi, yarı iletken sıvı ara yüzlerinde yük ayırma ve transfer süreçlerini iyileştirmek için etkili bir strateji olarak kullanılır.

İlk olarak (a) da gösterildiği gibi bir maske katmanı bir Si-alt tabakası (substrat) üzerine bırakılır ve maskenin deseni Si-alt tabakasına işlenir. İkinci adımda (b) maskenin olmadığı alanda açılan Si alanı daha sonra anizotropik (yani yöne bağlı olan atomik düzenlemelere sahip) olarak RIE (Reactive Ion Etching) prosesi ile dağlanır. Üçüncü aşama olarak (c) sığ yani derin olmayan hendekte/çukurda bir pasifleştirme tabakası birikir. Daha sonra (d), sığ yani derin olmayan hendek / çukurun altındaki pasivasyon tabakası yönlü plazma dağlamasıyla (directional plasma etching) çıkarılırken, yan duvardaki pasivasyon tabakası hala bırakılmıştır. Bu süreçten sonra (e), hendek/çukur Bosch prosesi kullanılarak daha da kazanmış. Son olarak (f), hem RIE işleminden sonra hem de Bosch işlemi sırasında biriken pasivasyon katmanı, aşındırma sonrası kalıntı giderici (örneğin, EKC 256) ile durulanır ve yukarıdan aşağıya doğru nispeten düzgün yan duvarlara sahip hendek/çukur elde edilir.

edilir. Plazma polimerize edilmiş Teflon® benzeri polimer zincirlerinin wafer yani silikon devre levhaları üzerinde yoğunlaştırılması, sadece küçük bir çapraz bağlama ile uzun lineer $(CF_2)_n$ zincirlerinden oluşan bir ağdan oluşan biriktirilmiş pürüzsüz bir pasifleştirici film verir, pasifleştirici film Teflon® benzeri polimer zincirleri kaynaklı $(CF_2)_n$ kalıntıları bırakmadan düşük enerjili iyon bombardımanı ile asit zeminden kolayca çıkarılabilir. İyon bombardımanı (ion beam) pasifleştirici filmin uzaklaştırılması gerektiğinde uygun bir method olarak değerlendirilebilir. Bu pasifleştirici film ile pasivasyonu (passivation) yapmamızın yüzeyde yük rekombinasyonunu azaltır, su oksidasyon reaksiyon kinetiğini artırır ve yarı iletkeni kimyasal korozyondan korumuş yani malzeme yapısını da korunmuş olacaktır. Plazmada hem yan duvardaki pasivasyonu hem de asitle zeminde aşındırma sağlamak için plazmada hem flor zemin radikal yani kök beslemesi için kükürt hekzaflorür (SF_6) gazı hem de polimer oluşturan radikal yani kök beslemesi için oktaflorosiklobutan (C_4F_8) gazı karışımı kullanılabilir. Ek olarak, hem yan duvardaki pasivasyonu hem de asitle zeminde aşındırma işleminde florokarbonlara sahip olmak silikon oksitler veya silikon malzemesinin kendisindeki oksijen çökeltileri gibi, zeminden istenmeyen sert pasivasyonu (pasifleştirme) temizleyecektir. Bununla birlikte, dağlama türü olarak flor radikallerinin ve plazmada birlikte polimerize edici türler olarak monomer radikalleri oluşturan Teflonların varlığı, aynı zamanda her iki türün (dağlama türü olarak flor radikallerin ve plazmada birlikte polimerize edici türler olarak monomer radikallerin) rekombinasyonuna ve karşılıklı yok olmasına yol açar. Bu, “karma işlemin” daha derin aşındırma işlemleri için kontrolünü kolaylaştırmaz ve esas olarak asitleme oranına göre işlem performansını yani dağlama performansını düşürür. Rekombinasyon problemi, Teflon tabanlı yan duvar pasivasyon (passivation) tekniğinin bir çeşidi olan patentli “Bosch süreç” teknolojisi [17] ile çözülmektedir. Bu süreci Laermer F. ve arkadaşları tarafından yayınlanan makalede aşağıdaki gibi açıklamıştır [18].

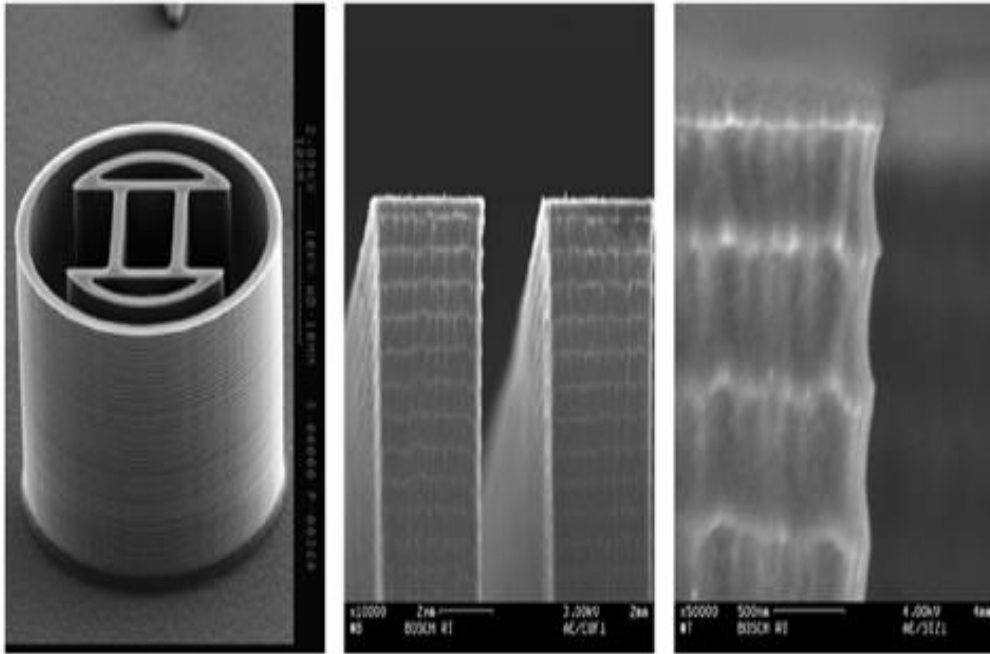
Şekil 1.5 işlem mekanizmasını gösterir. Bosch yaklaşımı, gaz fazında aktif türlerin yeniden birleştirilmesini önleyen teflon film yan duvar pasivasyon tekniğinin bir varyasyonuna dayanmaktadır: Şekil 1.5'de gösterildiği gibi biriktirme ve aşındırma adımları dönüşümlü olarak gerçekleştirilir.



Şekil 1.5 : Bosch derin silikon aşındırma işleminin yan duvar pasivasyon mekanizması. Pasivasyon adımında biriken koruyucu film, pürüzsüz bir yan duvar elde etmek için aşındırma adımı sırasında hendeklerin derinliklerine kadar uzanır [18].

Aşındırma aşamaları sırasında, önceki biriktirme adım(lar)ında biriken yan duvar polimer malzemesinin bir kısmı, yan duvarlara çarpan dikey olmayan iyon etkisi ile yan duvardan çıkarılır ve hendeklerin daha derinlerinde yeniden biriktirilir. Yan duvar polimer filminin ileriye doğru sürülmesi, dağlama adımının yerel bir anizotropisine yol açar, aksi takdirde neredeyse tamamen izotropik olurdu. Sonuç olarak, bu sürecin bir göstergesi olarak yalnızca küçük bir yan duvar pürüzlülüğü kalır. Bu pürüzlülük Lindroos V. Ve arkadaşlarının çıkardığı kitapta şöyle ele alınmıştır [11]: Bosch derin silikon aşındırma işlemi sırasında pasivasyon ve dağlama döngüleri sırasında sırasıyla yüksek yoğunluklu bir plazmaya maruz bırakılır. Bu yüksek yoğunluklu plazma, mikrodalga surfatron veya endüktif RF (Radyo Frekansı yani yüksek frekanslı dalga) uyarımı ile üretilir. Her pasivasyon döngüsü sırasında, ince bir Teflon benzeri film, plazma-polimerize edilmiş Teflonların, uyarılmış C_4F_8 türlerinden kazınmış yapıların duvarları üzerine yoğunlaştırılması ile biriktirilir. Silikon aşındırma ile zeminden bazı oksitlerin uzaklaştırılması, Teflon çökeltme aşaması sırasında veya sonrasında da olabilir. Sonraki aşındırma çevrimi sırasında, bu pasifleştirme filmin bir kısmı, dikey

olmayan iyon etkisi ile kaplanmış yan duvardan çıkarılır ve hendek/çukurun derinliklerine doğru çekilir. Aynı zamanda, hendek tabanı florokarbon polimerden temizlenir ve plazmada SF_6 'dan salınan flor radikalleri/kökleri ile dağlanır. Adımlar arasındaki geçiş süreleri, tolere edilen yan duvar pürüzlülüğüne bağlı olarak normalde birkaç saniye ile 1 dakika arasında değişir. Düşük enerjili iyonların etkisi, pasifleştirici polimer filmi çıkarmak için yeterli olduğundan, maske seçiciliği çok yüksek değerlere ulaşır. Daha sert pasifleştirici polimerler kullanıldıysa, daha agresif iyon etkisi gerekecektir ve sonuç olarak maskeleme malzemesine karşı seçicilik azaltılacaktır. Yan duvar filminin taşınması, yani Teflon malzemesinin çıkarılması ve yeniden yerleştirilmesi, yan duvarın yakınında, tamamen izotropik olacak şekilde aşındırma adımlarının bazı yerel anizotropisini verir, ancak yan duvarından uzaktaki ana dağlama reaksiyonunu olumsuz etkilemez. Sürekli olarak gerçekleşmemesine rağmen yan duvar pürüzlülüğü azalır. Plazma polimerizasyonu uygun olmadığı için dar çukurlarda film oluşumu tercihen hendek açıklığında gerçekleşir ve daha az birikmiş pasifleştirici film ile daha derin yan duvar bölgelerini bırakır. Yan duvarlar boyunca hendek tabanına doğru polimer malzeme akışı da hendek derinliği üzerinde daha düzgün bir yan duvar pasivasyonu (pasifleştirmesini) sağlar [11].



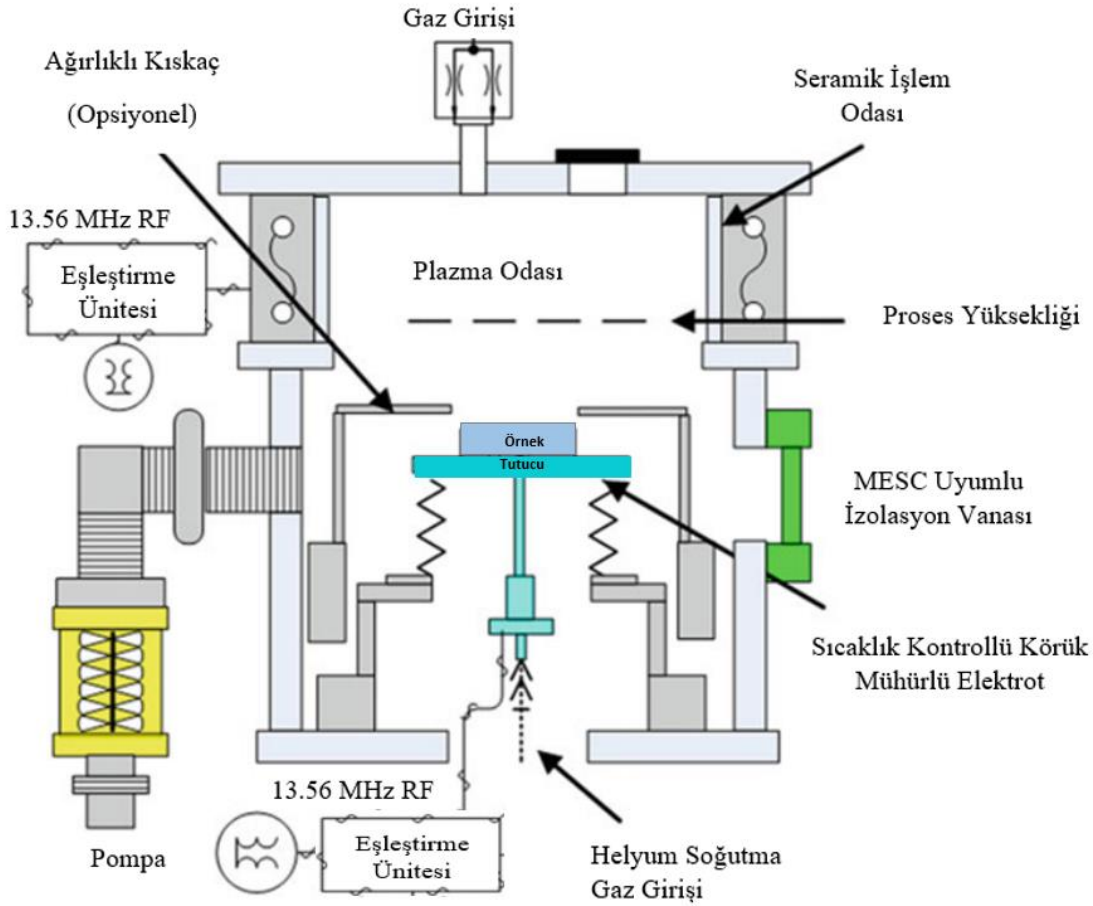
Şekil 1.6 : Tipik bir “Bosch DRIE” prosesinden kaynaklanan hendek profilleri ve yan duvar yapısı [11].

Şekil 1.6, standart “Bosch DRIE” prosesinin tipik yapıları, profil formlarını ve karakteristik yan duvarlarını göstermektedir. Görselde görüleceği üzere yan duvarlar deniz kabuğu dış yüzeyine benzer tarak şeklini almıştır.

Bosch DRIE prosesinin sürekli olmayan doğası, anizotropik (yani yöne bağlı olan atomik düzenlemelere sahip) dağlama ile ilgili bir takım problemlerin üstesinden gelir: ilk olarak, reaktif türlerin (bir arada bulunmayacak reaktif türlerin) gaz fazı reaksiyonları ile rekombinasyon kayıpları (ikili gruplar halinde yok olmalarına neden olarak) zaman diliminde ayırarak hariç tutulacaktır. Bu durum, türlerin yüksek konsantrasyon seviyelerinde üretildiği ve flor radikalleri ile rekombinasyonun, üretilen $(CF_2)_n$ -türlerinin plazma polimerizasyonu ile Teflon benzeri polimer zincirlerinin oluşumunu güçlü bir şekilde bozacağı durumlarda, yararlanılan kaynak alanın kendisindeki yüksek yoğunluklu plazma üretim bölgesinin hacmi için en önemlisidir.

Yüksek yoğunluklu plazma elde etmek için yüksek RF güçleri kullanılır. DRIE reaktörleri, RIE ile karşılaştırıldığında genellikle bir yerine iki RF güç jeneratörü ile donatılmıştır. Yüksek yoğunluklu plazma, endüktif olarak eşleştirilmiş plazma (ICP-Inductively Coupled Plasma) kaynağı kullanılarak üretilir. Editörlüğünü Li D. ‘nin yaptığı “Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics” kitabında ICP kaynağının çalışma prensipleri detaylı olarak ele alınmıştır [19]. Şekil 1.7’ de STS (Surface Technology Systems) Multiplex ICP dağlama sisteminin şematik diyagramı gösterilmektedir. Kaynak plazma, 1–3 kW 13.56 MHz RF jeneratörü tarafından sağlanan endüktif olarak bağlanmış bir bobin tarafından üretilir. Başka bir 13.56 MHz jeneratör, kaynak plazmaya göre silikon plakanın (wafer) bias potansiyelinin bağımsız kontrolüne izin veren plaka elektroduna güç sağlamak için kullanılır. Silikon plakanın (wafer) sıcaklığı, silikon plakanın arkasına sağlanan sıcaklık kontrollü, basınçlı helyum aracılığıyla tipik olarak 80°C'nin altında tutulur. Silikon devre elemanları, plaka elektroduna mekanik veya elektrostatik olarak sıkıştırılmış olabilir. Tipik taban basınçları 10 torr aralığındadır. Sistem, iki moddan birinde çalışabilen bir otomatik basınç kontrol valfi ile donatılmıştır. Sabit otomatik basınç kontrolü (APC) modunda, APC konumu sabit kalır ve hazne basıncı gaz akışlarının ve RF güçlerinin bir fonksiyonudur. Otomatik APC modunda, APC valfi hazne basıncını sabit bir değerde tutacak şekilde ayarlanır. Bu parça, anahtarlanmış yüksek en-boy oranlı Si aşındırma veya ASE (Advanced Silicon Etching) süreci için döngüden döngüye mükemmel tekrarlanabilirlik sağlamak üzere geliştirilmiştir. ASE işlemi, mikron altı ile birkaç

milimetre arasında değişen özellik boyutlarına sahip anizotropik Si aşındırma için Bosch teknolojisine dayalı sıralı olarak değişen aşındırma ve pasivasyon adımlarını kullanır. SF_6 ve C_4F_8 sırasıyla aşındırma ve pasivasyon amacıyla kullanılan birincil gazlardır. O_2 genellikle aşındırma adımında, turbo kanatlardaki sülfür kaplamanın azaltılmasıyla turbo pompa ömrünün uzatılması ve yan duvar pasivasyonunun artırılmasıyla yüksek sapmada eğilme profilinin azaltılması için eklenir.

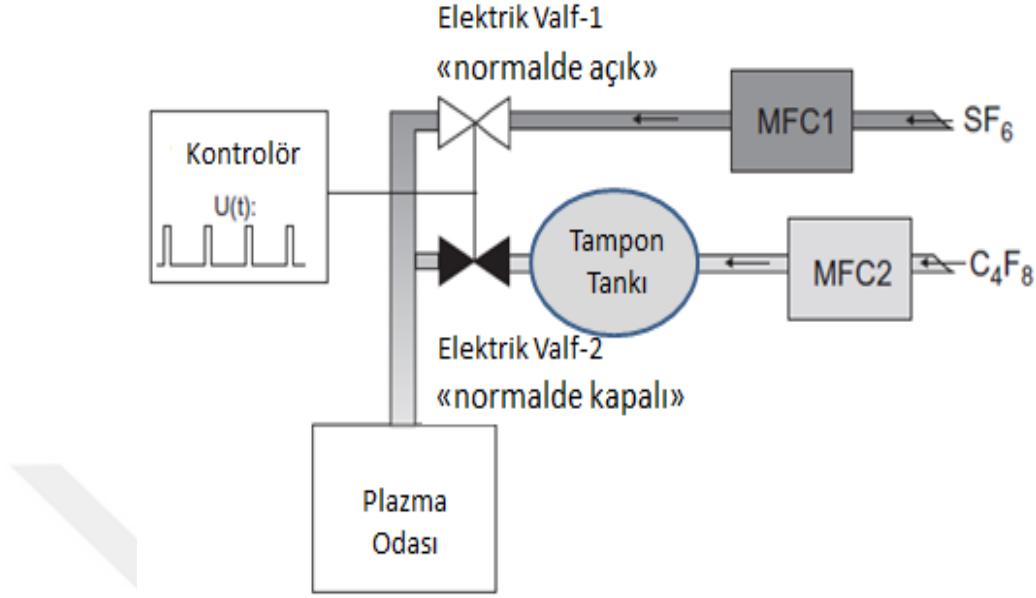


Şekil 1.7 : STS Multiplex ICP dağlama sisteminin şematik diyagramı [19].

Şekil 1.8’de gösterilen plazma odasına sağlanan gaz girişleri ve önemi Lindroos V. ve arkadaşlarının çalışmasında aşağıdaki gibi açıklanmıştır [11].

Plazma odasına aşındırma gazı temini, örneğin 100 -200 ms süreli çok kısa pasivasyon (pasifleştirme) gazı üflemleri, 1 Hz'lik bir tekrarlanma oranında kesilir. Bu, aşınmanın esasen her zaman devam ettiği bir işleme karşılık gelir ve silikon devre levhaları $(CF_2)_n$ -polimer zincirlerinin tedarikinin periyodik bir modülasyonudur. Genel olarak, MFC (Mass Flow Controllers) 'ler bu kadar hızlı geçiş yapamaz ve sabit akışta

çalışırlar. Üç yollu hızlı manyetik valfler, plazma kaynağına aşındırma gazı veya tampon tankından pasivasyon gazı açılmaları sağlarlar.



Şekil 1.8 : Uzun aşındırma çevrimleri ve çok kısa pasivasyon çevrimleri arasında “ultra hızlı geçiş” için plazma odasına gaz beslemesi tasarımı [11].

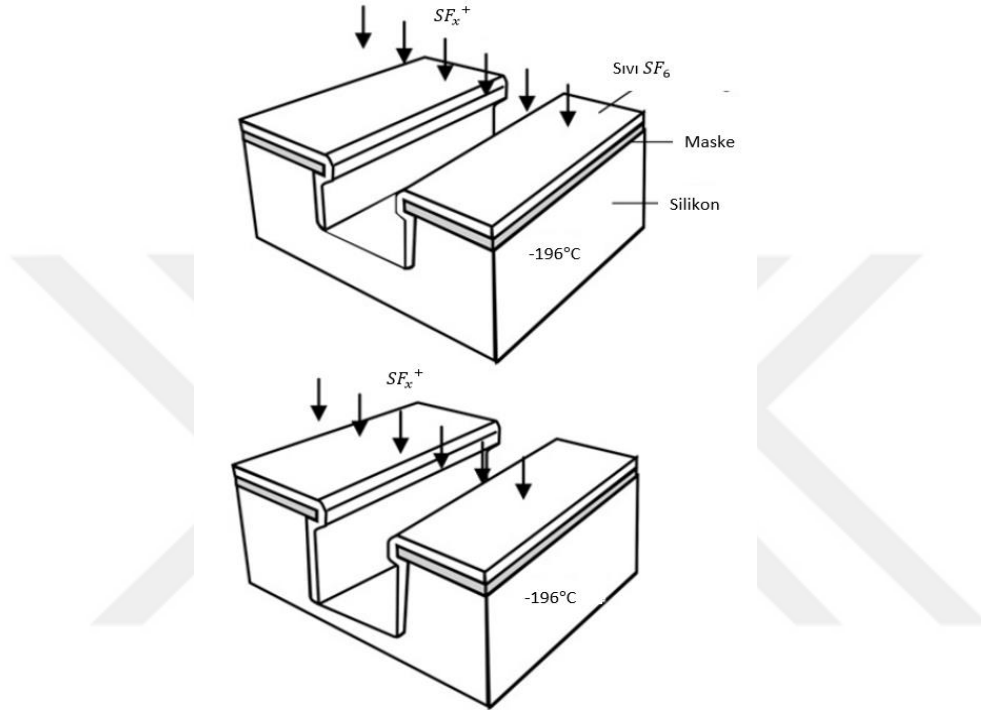
Şekil 1.8, işlem bölmesine (process chamber) “ultra hızlı gaz geçiş koşullarını” mümkün kılan bir gaz besleme tesisatının tasarımını göstermektedir [20]. Hızlı etkili bir elektromanyetik valf, aşındırma gazını plazma odasına sağlarken, pasivasyon gazı kaynak girişinin yakınında bulunan bir depolama tankına beslenir. Valfin çalıştırılması, dağlama gazını kısa bir süre için engeller ve dağlama süresi boyunca biriken pasivasyon gazı plazma odasına akar. Bu yaklaşım, uygun şekilde kısa anahtarlama süreleri ayarlayarak taraklanmanın ortadan kaldırılmasını sağlar.

Kriyojenik DRIE süreci (Cryogenic DRIE process)

Kriyojenik RIE, RIE sırasında silikon devre levhalarının (wafer) soğutulmasıyla, yan duvarlardaki kimyasal reaksiyonların oranının önemli ölçüde azaltılabileceği ve anizotropinin gelişmesine neden olabileceği 1988’e kadar uzanmaktadır [21].

Franssila S., tarafından 2004 yılında çıkartılan “ Introduction to Microfabrication” kitabında kriyojenik DRIE süreci şöyle ele alınmıştır. Kriyojenik derin aşındırma sürecinde, sürekli bir debiye sahip olan SF_6/O_2 akışı kullanılmaktadır ve yüzey aşınması dikey yönde ilerlemektedir. Bunun sebebi yanal dağlama düşük sıcaklık ($-120\text{ }^\circ\text{C}$) tarafından bastırılır ve $SiO_xC_yF_z$ kalıntı filmi ayrıca yan duvarları korumaktadır [22].

Nguyen N. T., kitabında bu durumu Şekil 1.9 ile açıklamıştır. İlk aşama olarak alt tabaka sıvı nitrojen ile soğutulmuştur. Kriyojenik sıcaklıklar, SF_6 veya O_2 gibi reaktan gazın çukur yapı yüzeyinde yoğunlaşmasına izin vermektedir. Bu süreçte yoğunlaşma filmi yan duvarları aşınmaya karşı korurken, iyon bombardımanı ile alt kısımdan da uzaklaştırılmaktadır. Çukur yapı tabanı korunmadığı için alt tabaka daha fazla aşınmıştır [12].



Şekil 1.9 : Silikon yüzeyin kriyojenik aşındırma işleminin gösterimi [12].

SF_6/O_2 plazmasındaki yüksek aşındırma oranı, yüksek konsantrasyonda flor radikallerinden kaynaklanır. Oksijen, pasifleştirici tabakanın kalitesini kontrol eder ve aynı zamanda oksijen yan duvar koniklerini optimize ederken en önemli parametredir [23]. O_2 içeriği çok düşükse, izotropik bir profil ortaya çıkar. Çok yüksek oksijen akışı, aşırı pasifleşmeye ve siyah silikon olarak da bilinen silikon kalıntılarının oluşumuna yol açar [11].

Mellhaoui ve arkadaşlarının çalışmasında Kriyo ve Bosch işlemi kıyaslanmıştır. Kriyo-işlemden, kazınmış yapıların yan duvarları pürüzsüzdür, ancak silikonun aşındırma oranı tipik olarak Bosch işleminden daha düşük olduğu görülmüştür. Çünkü pasivasyon tabakası sadece 10 nm kalınlığındadır ve düşük enerjili iyon bombardımanı bu pasivasyon tabakasını yatay yüzeylerden uzaklaştırılması için yeterlidir [24]. Diğer bir dezavantajı ise kriyojenik sıcaklıktır. Tüm fotorezistlerin

buna dayanamamasıdır ve fotorezistlerin soğutma sırasında camın kırılması gibi parçalanmalarıdır. Kalın fotorezistler özellikle çatlamaya eğilimlidir. Bu nedenle, silikon dioksit gibi sert maskeler sıklıkla kullanılmalıdır. Diğer bir unsur ise bu sıcakta yüzey kontaminasyonunun artmasıdır. Bu durum siyah yapıda bir silikon devre levahısına (wafer) yol açmaktadır [19], [25], [26].

Kriyo-süreçler (Cryo-processes)

Kesin proses parametrelerinin büyük ölçüde ekipmana ve uygulamaya bağlı olduğu tipik bir plazma dağlama yöntemidir.

Üç farklı proses Çizelge 1.1'de sunulmaktadır. Bu proseslerin ilki M. J. Walker ve arkadaşlarının 2001 yılında çalıştığı [26] “Silikon yüzeylerde yüksek en ve boy oranlı özelliklerin şekillendirilmesi için Bosch ve Cryogenic proseslerinin karşılaştırılması” çalışması. İkincisi M.J de Boer ve arkadaşlarının 2000 yılında çalıştığı [27] “Silikonda gömülü mikro kanalların mikro işlenmesi” çalışması ve son olarak üçüncü proses S. Aachboun ve arkadaşlarının 1999 yılında çalıştığı [28] “Silikonun derin anizotropik dağlanması” çalışmasıdır.

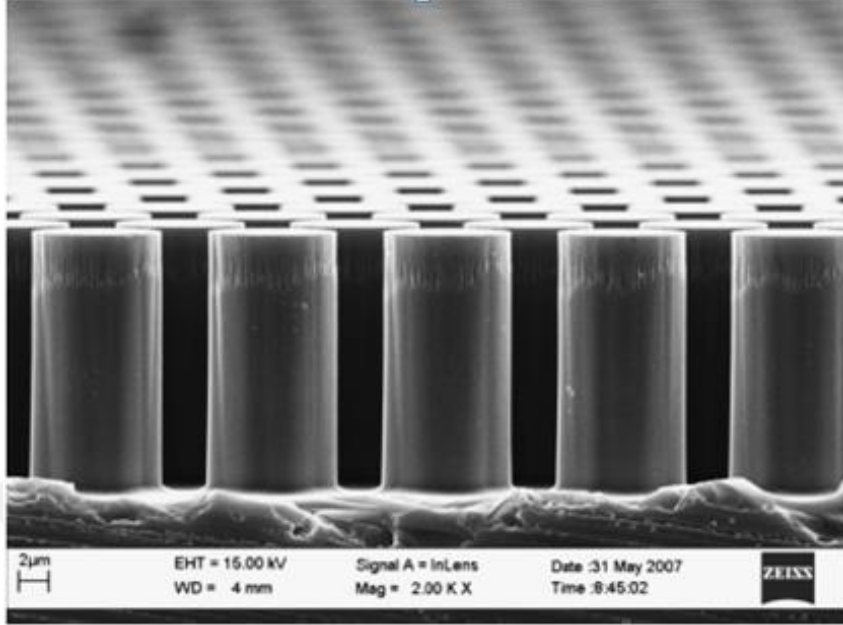
Çizelge 1.1 : Dikey yan duvarlarda sonuçlanan Cryo-DRIE işlemlerinin tipik işlem parametreleri [29].

Parametreler	Proses-1 [26]	Proses-2 [27]	Proses-3 [28]
ICP Gücü (W)	1000	600	1200
CCP Gücü (W)	2	2	-80
O_2 - Akış Hızı (sccm)	6	2	8
SF_6 - Akış Hızı (sccm)	40	200	80
Basınç (mTorr)	10	14	13
Sıcaklık ($^{\circ}C$)	-110	-110	-90

Proseslerin hepsi anizotropik profiller oluşturmak için kullanılmıştır. Tüm bu işlemlerin $-100^{\circ}C$ civarında işlem sıcaklıkları kullandığı ve hepsinin de benzer işlem basınçlarına sahip olduğu görülebilir, ancak gaz akışları ve Radio Frekans (RF) güçleri önemli ölçüde farklılık gösterir.

Endüktif eşleşmiş plazma (Inductively Coupled Plasma-ICP) gücü ve SF_6 akışı dağlama (etching) oranının ana belirleyicisidir. Oksijen akış hızı, yan duvar açısını ve alttan kesmeyi etkileyen pasivasyon (pasifleştirme) tabakasının kalitesini kontrol etmek için kullanılır. Kazınmış özelliklerin yan duvar açılarının her üç süreçte de

90° 'ye yakın olduğu bildirilmektedir. Bir aşındırma profilinin bir örneği Şekil 1.10'da gösterilmektedir.



Şekil 1.10 : Silikon yüzeyin kriyojenik aşındırma işleminin gösterimi [12].

1.1.2.2 Islak (Wet) aşındırma

Islak dağlama, kimyasal bir çözeltide katı maddelerin dağlama işlemi olarak adlandırılır. Bu işlemler sırasında, substrat denilen alt katman çözeltiliye daldırılır veya çözeltili substrat üzerine püskürtülür. Bu süreçte üzerinde maskenin olmadığı alanlar kimyasal olarak aşınır [30]. Bu tekniğin en önemli avantajlarını Abdulloğlu M. R., yüksek lisans tezinde şöyle açıklamıştır. Prosesinin hızlı ve kontrollü bir biçimde gerçekleştirilmesi, homojen (uniform) özellikte mikro yapıların elde edilebilmesi ve ucuz olması avantajları arasında yer almaktadır. Aşındırma hızı ve elde edilecek profil yapısı malzemeye, kullanılan kimyasal çözeltiliye, banyonun sıcaklığına, karıştırma olup olmadığına ve aşınmaya direnç oluşturacak herhangi bir teknik kullanıp kullanılmadığına bağlıdır [31].

Islak aşındırma genel olarak izotropik ve anizotropik ıslak aşındırma olmak üzere iki kısma ayrılır.

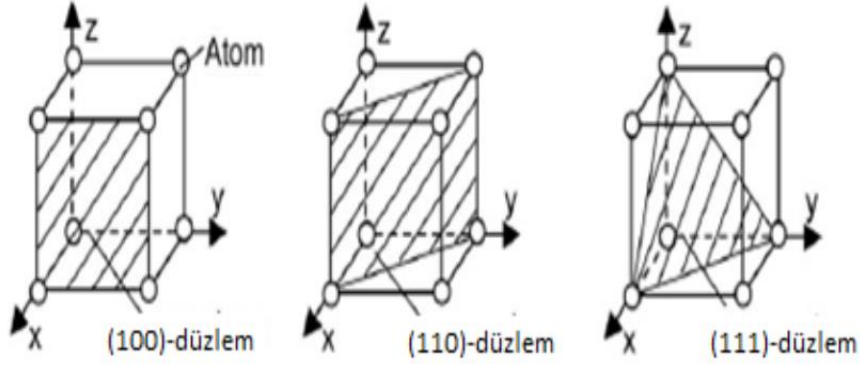
İzotropik ıslak aşındırma 2012 yılında ikinci baskısı yayınlanan “Micromixers Fundamentals, Design and Fabrication” kitabında şöyle ele alınmaktadır. İzotropik aşındırma, eksik aşındırma (underetching) nedeniyle hassas yanal yapıların imalatında dezavantajlara sahiptir. Asitleme çözeltisi iyi karıştırılırsa, izotropik dağlama cephesi

neredeyse küresel bir forma sahiptir. İzotropik aşındırma ile bir mikro kanal üretilirse, kanal genişliği de kanal derinliğine bağlıdır ve maske tasarımında dikkate alınması gerekir. Islak dağlamanın başlıca avantajları arasında yüksek seçicilik, nispeten düzlemsel dağlama yüzeyi, yüksek tekrarlanabilirlik ve kontrol edilebilir aşındırma oranı yer alır. İzotropik ıslak aşındırma genellikle ince tabakaları çıkarmak veya bir filmi inceltmek için kullanılır. Kazınmış ön yüzeyde olası kabarcık oluşumu nedeniyle, iyi karıştırılmış aşındırma solüsyonu proses kalitesi için çok önemlidir. Silisyumun izotropik ıslak dağlanması, hidroflorik HF ve nitrik asitler HNO_3 gibi bir asit karışımı kullanılarak elde edilebilir. Dağlama işlemi iki adımdan oluşur: silisyumun nitrik asitlerle oksidasyonu ve oluşan silikon oksidin hidroflorik ile çözünmesi. İzotropik dağlamanın dezavantajı kontrol edilebilirliğidir; çok küçük yapılar bu teknikle üretilemez. Çizelge 1.2, izotropik ıslak dağlama için bazı yaygın uygulama tarifleri listelenmiştir [12].

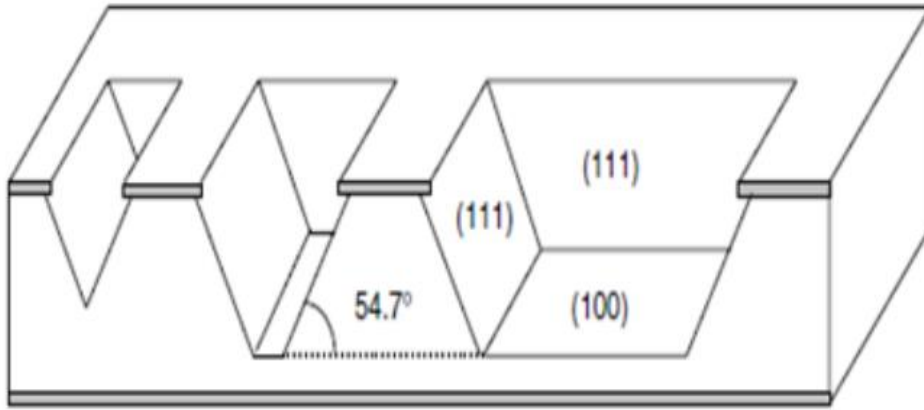
Çizelge 1.2 : İzotropik ıslak aşındırıcı çeşitleri [12].

Malzeme	Aşındırıcı	Seçici
Si	HF, HNO_3, CH_3COOH	SiO_2
Si	KOH	SiO_2
SiO_2	NH_4, HF	Si
SiO_2	HF, NHO_3, H_2O	Si
SiO_2	H_3PO_4, NHO_3, H_2O	Si
Si_3N_4	H_3PO_4	SiO_2
Al	H_3PO_4, NHO_3, H_2O	SiO_2

Anizotropik ıslak aşındırma, şekil, boyut, yön ve köşe konumları dahil olmak üzere silikon plakanın (wafer) yönüne ve desenleme özelliklerine güçlü bir şekilde bağlıdır. Silisyum anizotropik aşınması genellikle KOH ile sağlanır [12]. Tek kristalli silisyumdaki KOH aşındırma oranı kristal oryantasyonuna kuvvetli bir şekilde bağlıdır. Silikon kristalinin Şekil 1.11 ve Şekil 1.12’de gösterildiği gibi düzlemlere ayırdığımızda, (111) düzlemi, (100) düzleminden iki dereceden daha yavaş dağlana oranına sahiptir. Bu nedenle KOH içinde aşındırılmış tek kristalli yapıların uzaysal kristal oryantasyonu (111) düzlemi ile tanımlanır.



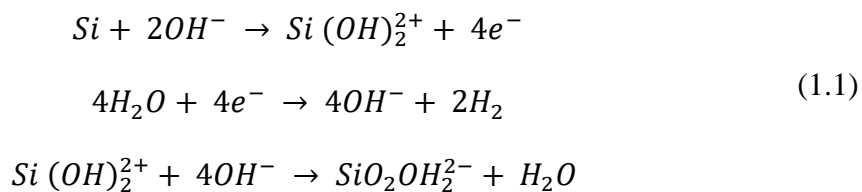
Şekil 1.11 : Silikon atomlarının kübik kafesindeki farklı kristal düzlemler [22].



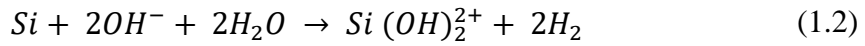
Şekil 1.12 : (100) Silikon plakasında, anizotropik ıslak aşındırılmış profiller. Eğilimli yan duvarlar yavaş dağlama (111) düzlemleridir; yatay düzlemler (100)'tür. Yavaş aşındırma (111) düzlemleri buluşursa, aşındırma sona erer [22].

Ghodssi R., ve Lin P. tarafından çıkarılan kitapta aşındırıcı türlerini ve genel özelliklerini aşağıdaki gibi açıklamıştı [14]. Anizotropik aşındırıcılar ile silikonun aşındırma oranları öncelikle maruz kalan kristal yüzlerine, aşındırıcı tipine, aşındırıcı sıcaklığına ve aşındırıcı konsantrasyonuna bağlıdır. Daha az ölçüde, aşındırma hızı, çalkalama veya karıştırma miktarına, maruz kalan alan miktarına, aşındırıcının tükenmesine, alt tabaka katkılanmasına ve aşındırıcı katkı maddelerine bağlıdır. KOH, TMAH standart anizotropik aşındırıcı olarak kullanılmaktadır.

Kovacs ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada anizotropik ıslak dağlama reaksiyon adımları ve aşındırıcı çeşitleri incelenmiştir [32]. Anizotropik ıslak dağlama işleminde, hidroksitler silikon ile aşağıdaki adımlarda reaksiyona girer:



Genel reaksiyon denklemi



Reaksiyon adımları incelenirse Denklem (1.1) aşamalarında, her silikon atomundan iletim bandına dört elektron aktarılmaktadır. Elektronların varlığı aşındırma işlemi için önemlidir. Elektronların kullanılabilirliğini veya mevcudiyetini değiştirmek (Manipulating the availability of electrons), kontrol edilebilir bir aşındırma durdurma işlemini mümkün kılar.

Kovacs ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [32] Hidroksit grupları sağlayabilen silikon aşındırıcılar olarak yapılan sınıflandırılma aşağıdaki gibidir:

- Alkali hidroksit aşındırıcılar KOH, NaOH, CsOH, RbOH veya LiOH;
- Amonyum hidroksit aşındırıcılar: amonyum hidroksit NH_4OH , tetrametil amonyum hidroksit (TMAH) $(CH_3)_4NOH$;
- Etilen diamin pirokatekol: (ED., Tehlikeli olabilir ve aynı zamanda kansere neden olabildiğinden uygun güvenlik önlemleri ile kullanılmalıdır.) bir etilendiamin $NH_2(CH_2)_2NH_2$, pirofatekol $C_6H_4(OH)_2$ ve su karışımı;
- Diğer aşındırıcılar: e-hidrazin / su ve amin galat aşındırıcılar.

{111}-düzlemlerindeki silikon atomları, bu düzlemden elektronların salınmasını zorlaştıran daha güçlü bağlanma kuvvetlerine sahiptir. Bu durum, {111} düzlemlerinin düşük aşındırma oranlarına yol açar. Anizotropi veya yönelim bağımlılığı, farklı kristal düzlemlerindeki farklı dağlama hızlarından kaynaklanır.

Çizelge 1.3'de [32]–[41] yaygın anizotropik aşındırıcılar çözeltilerinin en önemli parametrelerini karşılaştırılmaktadır.

Çizelge 1.3'ün oluşturulmasında çeşitli araştırmalar ele alınmıştır. Bu araştırmalar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- KOH ile ıslak dağlama için K.R.Williams ve arkadaşlarının (1996) “Mikro processler için dağlama oranları” [33], K.E. Bean ve arkadaşlarının (1990) “Alkali çözeltilerde kristal silikonun anizotropik dağlanması II: Katkı maddelerinin etkisi” [34] ve G. Kaminsky (1985) “Silikon mekanik yapıların mikro işlenmesi” [35] çalışmaları,
- NH_4OH ile ıslak dağlama için W. Kern (1978) “Silikon, germanyum, galyum arsenid ve galyum fosfitin kimyasal dağlaması” [36] ve U. Schnakenberg ve arkadaşlarının (1990) “ NH_4OH Silikon mikro işleme için temel asitler

(etchants): katkı maddelerinin etkisi ve pasivasyon katmanlarının stabilitesi” [37] çalışmaları,

- Tetrametil amonyum hidroksit (TMAH) $(CH_3)_4NOH$ ile ıslak dağlama için O. Tabata ve arkadaşlarının (1992) “TMAH çözeltisi içerisinde silikonun anizotropik dağlanması” [38] ve U. Schnakenberg ve arkadaşlarının (1991) “Silikon mikro işleme için TMAHW asitler (etchants)” [39] çalışmaları,
- EDP ile ıslak dağlama için K.E. Bean ve arkadaşlarının (1990) “Alkali çözeltilerde kristal silikonun anizotropik dağlanması II: Katkı maddelerinin etkisi” [34] çalışması ve
- Hydrazine ile ıslak dağlama için K.E. Petersenin (1982) “Mekanik bir malzeme olarak silikon” [40] ve M. Mehregany ve arkadaşlarının (1988) “Hidrazinde silikonun anizotropik dağlanması” [41] çalışmaları ele alınmıştır.

Çizelge 1.3 : Farklı anizotropik ıslak aşındırıcı özellikleri [12].

Özellikler	KOH	NH_4OH	TMAH	EDP	Hidrazin
Referanslar	[32,34]	[35,36]	[37,38]	[33]	[39,40]
Konsantrasyon (ağırlık %)	40 - 50	1 - 18	10 - 40	*a	*b
Sıcaklık (°C)	80	75 - 90	90	70 - 97	100
{111} aşınma oranı (nm/dakika)	2.5 – 5	-	20 – 60	5.7 - 17	2
{100} aşınma oranı (nm/dakika)	1 - 2	0.1 – 0.5	0.5 – 1.5	0.2 – 0.6	2
{110} aşınma oranı (nm/dakika)	1.5 - 3	-	0.1	-	-
Si_3N_4 aşınma oranı (nm/dakika)	0.23	-	1 – 10	0.1	-
SiO_2 aşınma oranı (nm/dakika)	1 - 10	-	0.05 – 0.25	0.2	0.17
Al atağı/saldırısı	Evet	Hayır	Hayır	Evet	-

*a: 1L etilen diammin $NH_2 - CH_2 - CH_2 - NH_2$, 160 gr pirokatekol $C_6H_4(OH)_2$, 6 gr pirazin $C_4H_4N_2$, 133 ml H_2O

*b: 100 ml N_2H_4 , 100 ml H_2O (patlayıcı, çok tehlikeli!)

KOH, {100} düzlemi ile {111} düzlemi arasında en iyi seçiciliği sunar. Ancak, KOH silikon devre levha (wafer) üzerindeki alüminyum yapılara işler. TMAH, {111} düzleminde daha hızlı dağlanır, ancak alüminyuma işlemez.

Çizelge 1.3'e göre, tüm aşındırıcılar silikon nitrüre (Si_3H_4) ve silikon dioksit (SiO_2) seçicidir. Böylece, bu iki malzeme anizotropik aşındırma işlemlerinde maske olarak kullanılabilirler. Kontrollü aşındırma, anizotropik ıslak aşındırma ile hassas imalat için önemli bir tekniktir.

Aşındırma hızını yavaşlatmak veya ortadan kaldırmak için farklı yöntemler şunlardır:

- Asitlerin seçiciliğini kullanarak, silikon yüzeyleri nitrür veya oksit gibi koruyucu bir tabaka ile kaplamak;
- Dağlama oranlarının oryantasyon bağımlılığını kullanmak;
- Kontrollü delik oluşturmak.

Yaygın yöntemde genellikle bir maske olarak bir silikon-dioksit ve silikon nitrür tabakası ile seçici aşındırma için kullanılır. Birden çok silikon / nitrür katmanının birleştirilmesiyle farklı derinlikteki yapılar gerçekleştirilebilir. {111}-düzleminin dağlama oranı, {110} - ve {100}-düzlemlerinden daha yavaş iki büyüklük sırası olduğundan, dağlama ön kısmı {111}-düzleminde durur. Bu eşsiz özellik, iyi tanımlanmış şekle sahip mikrokanallar üretmek için kullanılabilir. Sonuç olarak silikon yüzeylerde mikro kanallar oluşturmak için en iyi yöntem Çizelge 1.3'de belirtildiği gibi, KOH (Potassium hydroxide) aşındırıcılar kullanmaktır. KOH nispeten güvenlidir, kullanımı kolaydır, toksik değildir ve mükemmel dağlama profilleri sağlar. Tüm aşındırıcılar ele alındığında Potasyum hidroksit (KOH) ve tetrametil amonyum hidroksitin (TMAH), silikon için yaygın olarak kullanılan anizotropik ıslak aşındırıcılar olduğu görülmüştür [22]. Bu sebeple bu iki aşındırıcı için sonraki bölümde detay içeren literatür araştırması yapılmıştır.

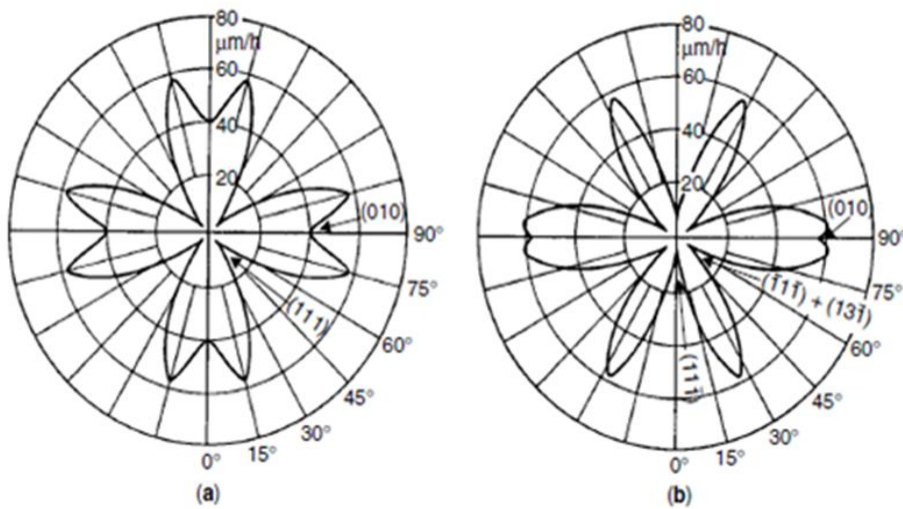
KOH (Potassium hydroxide) ile ıslak aşındırma

Lysko 2003 yılında yaptığı silikon yüzeylerdeki anizotropik ıslak aşındırma çalışmasında KOH ile aşındırmayı şu şekilde özetlemiştir [42]. Klasik KOH+su çözeltisi, her kristalografik yönde en yüksek aşındırma oranını, en yüksek anizotropi indeksini ve en iyi yüzey kalitesini verir. Kimyasal reaksiyonu hafifletmek ve dağlama çözeltisinin sıcaklık stabilitesini iyileştirmek için yüzde birkaç IPA ilavesi uygulanabilir. Düşük KOH/IPA çözünürlüğü nedeniyle ağırlığın yalnızca yüzde birkaçı kadar uygulanmalıdır. IPA'nın kaynama noktası 82°C civarındadır. Çözünürlük seviyesinin üzerindeki aşırı içeriği buharlaşır ve dağlama sisteminde dolaşır: solüsyondan geri akış kondansatöründen solüsyon kabına geri döner. IPA ilavesinin aşındırma oranını değiştirmediği ancak aşındırma oranını önemli ölçüde

azalttığı gözlemlendi. Bu gözlem, anizotropik dağlamanın en az iki mekanizmadan oluştuğunu ve bu mekanizmaların dağlama çözeltisinin kimyasal bileşimi tarafından ayrı ayrı kontrol edilebileceğini göstermektedir. Düşük KOH konsantrasyonunun aşındırma çözeltisine IPA eklenmesi (100) kristal düzlem kalitesini bozar. Serbest elektrolit hacminden (veya hacmine) silikon-çözelti arayüzüne (veya arayüzünden) daha kötü substratlar ve ürün sirkülasyonunun, maskeleme tabakasının içbükey köşelerine yakın bölgelerde bulunan dağınık piramit yapıları ile zayıf yüzey düzgünlüğüne neden olduğu varsayılmıştır. Piramit oluşum süreci, daha yüksek KOH konsantrasyonları ile telafi edilebilir.

Fransila S. tarafından 2004 yılında basılmış kitapta KOH ile aşındırmanın silikon yüzey düzlemlerindeki etkisi ele alınmıştır [22]. Yapılan çalışmada, tüm alkali asitler, aşındırma (100) düzlemlerinin hızlı ve (111) düzlemlerin yavaşça aynı temel özelliklerini paylaşmasına rağmen, kristal düzlemler arasındaki gerçek seçiciliğe dikkat etmek gerektiği vurgulanmıştır. KOH, 200: 1 mertebesinde (100) ve (111) arasında seçiciliğe sahipken, TMAH sadece 30: 1 gösterdiğini ve bu seçicilikler aşındırıcı konsantrasyonuna ve sıcaklığa bağlı olduğu açıklanmıştır. Ancak diğer kristal düzlemler göz önüne alındığında, daha da fazla fark ortaya çıkar: (110) gibi düzlemler ve (311) gibi yüksek index (high index) düzlemler incelendiğinde, farklılıklar çoğalacağı belirtilmiştir.

Şekil 1.13, KOH içerisinde $\langle 100 \rangle$ ve $\langle 110 \rangle$ düzlemlerinde silikon için aşındırma oranlarını göstermektedir.



Şekil 1.13 : 78 °C’de %50 KOH’da farklı kristal yönlerindeki dağlama oranları: (a) $\langle 100 \rangle$ Si: hızlı, ancak (010) yönünde maksimum dağlama yok ve (111) yönünde maksimum dağlama var. (b) $\langle 110 \rangle$ Si: (010) maksimum aşındırma hızına yakın ve (111) yönünde maksimum dağlama var [22].

Dağlanmış şekillerin tahmini için minimum ve maksimum dağlama oranı düzlemlerinin belirlenmesi esastır. KOH içine izopropanol (IPA) ilavesi, kristal düzlemlerin bağıl dağlama oranlarını değiştirecektir ve kesin koşullara bağlı olarak, (100) veya (110) düzlemlerden biri maksimum dağlama oranı düzlemleri olacaktır. Aşındırma süreleri oldukça uzun olduğu için, aşındırıcının buharlaşması ve ayrışması da önlenmelidir.

TMAH (Tetrametil amonyum hidroksit) ile ıslak aşındırma

Islak aşındırma için kullanılan diğer bir aşındırıcı Tetrametil amonyum hidroksitdir (TMAH). TMAH, pozitif dirençli geliştiricinin bir bileşeni olarak yaygın olarak uygulanmaktadır.

Thong J. T. L. ve arkadaşları TMAH konsantrasyonunun, proses sıcaklığının ve substrat tipinin silikon aşındırma hızı üzerindeki etkileri üzerine sistematik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Konsantrasyon için; TMAH konsantrasyonu arttıkça silikon aşındırma hızının arttığını ve ağırlıkça %4'te maksimuma ulaşıldığı bulunmuş ayrıca sıcaklık etkisi incelendiğinde sıcaklık artışının aşındırma oranını arttırdığı gözlemlenmiştir. Son olarak substrat tipinin etkisi olarak da, n-tipi silikonun aşındırma oranının, p-tipi silikondan biraz daha yüksek olduğu bulunmuştur [43]. Lysko yaptığı çalışmada TMAH aşındırma yönteminin genel özelliklerinden ve IPA ile karıştırılarak kullanıldığında gözlemlenen sonuçlarından bahsetmiştir [42]. Genel özellikleri şöyle sıralamıştır; 130°C'ye kadar kimyasal olarak stabildir, uçucu değildir, toksik değildir ve metal elementlere daha az zarar verir. Bu özellikler teknoloji tasarımcıları için çok faydalıdır. KOH ile karşılaştırıldığında, aşındırma oranı ve anizotropi indeksi daha düşüktür, ancak yine de MEMS teknolojisi için tatmin edicidir. Su ile karıştırılarak oluşturduğu çözeltinin sonuçlarını incelediğinde genel olarak, TMAH+su çözeltilerinde, karışım konsantrasyonu ile her yönde silikon kristal aşındırma hızının azaldığını görmüştür. Deneysel özelliklerin neredeyse doğrusal olduğunu vurgulamıştır ve örneklendirmiştir. Örneğin, [1 0 0] kristal yönünde ve 80°C'ye yakın sıcaklıkta, aşındırma hızı %5 TMAH'da 0,9 µm/dak'dan %30 TMAH'ta 0,5 µm/dak'ya değiştiğini görmüştür. TMAH konsantrasyonu için, yüksek TMAH konsantrasyonları (13 pH'ın üzerinde) olan aşındırma solüsyonlarının uygulanması (1 0 0) kristal düzlemlerinde artan tepelik oluşumu olasılığı nedeniyle önermemektedir. TMAH+su çözeltisine IPA ilave ettiğinde kimyasal aktiviteyi düzenlediğini ve kristal yüzey pürüzsüzlüğünü iyileştirdiğini görmüştür. TMAH ve IPA konsantrasyonu, sabit

oranda olmasa da güçlü bir şekilde, farklı kristal yönlerinde kristal aşındırma oranlarını etkilediği sonucunu çıkarmıştır [42].

1.1.3 Piezoelektrik disk ile tetiklenen mikro pompa

Mikro pompalar, çalışma prensibine ve çalıştırma mekanizmasına göre farklı kategorilere ayrılabilir. Elektrostatik, piezoelektrik, elektromanyetik, elektroozmotik ve şekil hafızalı alaşım cihazlar önemli mikro pompa türleri arasındadır [44].

Yukarıda da belirtildiği gibi, tez kapsamında, mikro pompayı tetikleyici olarak piezoelektrik malzeme kullanılacaktır. Bu sebeple öncelikle piezoelektrik malzemenin çalışma prensibi araştırılmıştır. Piezoelektrik malzemeler; üzerlerine uygulanan basıncı, malzeme (genellikle kurşun-zirkonyum-titanyum seramik) içerisinde pozitif ve negatif kutuplar oluşturarak, elektrik alan ya da elektrik potansiyel oluştururlar [45]. Daha sonra, oluşan bu elektrik alanı maddeyi genişletmekte ya da sıkıştırmaktadır. Bu şekilde mekanik enerji ile elektrik enerjisi üretmektedir. Tez kapsamında süreç tersine de incelenmiştir. Şöyle ki; piezoelektrik malzemeye elektrik akımı uygulandığı zaman malzemede genişleme oluşur. Buna da ‘dolaylı piezoelektrik etki’ veya ‘ters piezoelektrik etki’ denir. ‘Ters piezoelektrik etki’ sürücülerde motor olarak kullanılır. Kısaca mekanik etki uygulandığında elektriksel tepki vermesine ‘doğrudan piezoelektrik etki’, elektrik gerilimi uygulandığında mekanik bir tepki oluşmasına ‘ters piezoelektrik etki’ denir [45].

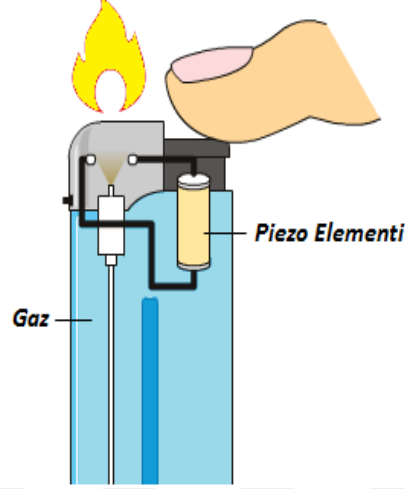
Piezoelektriğin uygulama alanları i) mekanik enerji-elektrik enerjisi dönüşümü uygulamaları ii) elektrik enerjisi-mekanik enerji dönüşümü uygulamaları ve iii) elektrik-mekanik-elektrik enerji dönüşüm uygulamaları olarak sınıflandırılabilir. Bu uygulamalar aşağıda anlatılmıştır:

i) Mekanik Enerji-Elektrik Enerjisi Dönüşüm Uygulamaları

Mekanik enerjinin elektrik enerjisine çevrilmesini sağlayan uygulamalardır. Bunlar sigortalar, titreşim algılayıcıları, gaz ateşleyiciler, hızölçerler olarak sıralanabilir.

- Yüksek voltaj ve güç kaynakları; Şekil 1.14’de gösterildiği üzere, çakmakların üzerinde yer alan ve çakmağı yakmamız için parmağımızla bastırdığımız alana kuvvet uygulayınca içindeki piezoelektrik kristali için ani ve yüksek kuvvet etkisi yaratmaktadır. Bu sayede elektrik akımı oluşur. Eşzamanlı olarak çalışan ve yanıcı maddeyi serbest bırakan valf açılır. Sıvı halde bulunan yanıcı madde,

kapağın açılması ile buharlaşır ve kıvılcımla karşılaşır. Bu karşılaşma gazın valf kapağının üzerinde yanan alev oluşmasına neden olur. Birçoğu bu şekilde gazın alev almasını sağlayan sistemler piezoelektrik temelli indüksiyon yapılarına sahiptirler.

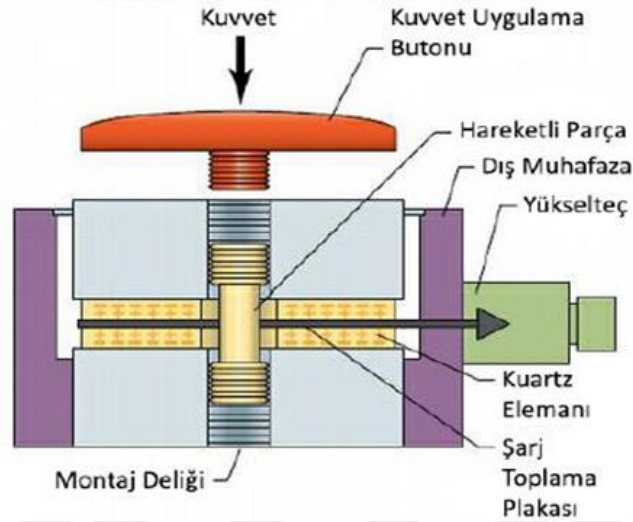


Şekil 1.14 : Piezoelektrik uygulaması örneği; yüksek voltaj ve güç kaynakları [46].

- Sensörler; piezoelektrik sensörleri cihaz olarak göz önünde bulundurulduğunda kondansatör ile benzer bir akım kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle günümüzde mikrofon, elektrogitarlarda ve kulaklıklarda sıklıkla kullanıldığı ve günlük hayatımızda etkisi olduğunu söyleyebiliriz. Telefon uygulamalarında dalga filtrelemede ve radyo vericilerin frekans kontrollerinde kullanılmaktadırlar. Aynı zamanda da arabalarda hava akış sensörleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Piezoelektrik sensörlerin diğer bir kullanım alanı da yüksek yoğunluktaki seslerin çevrilerek, medikal alanlarda ve endüstriyel testlerde kullanılmasıdır.

Sensörler derinlemesine incelendiğinde MEMS (Micro-Electro Mechanical System) teknolojisinde de çok detaylı ele alındığı görülmektedir. MEMS teknolojisi, büyük mekanik ve elektromekanik mekanizmaları nano boyuta indirgememizi ve düşük maliyette üretmemizi, düşük enerji ile yüksek verim elde etmemizi sağlayan mikro teknolojinin bir alt dalıdır. Uygulama alanlarından bir tanesi de hava yastığı sensörüdür. Hava yastıklarının sensör kısmında piezoelektrik kuvvet sensörü kullanılmaktadır [47]. Bu sensör yapıları Şekil 1.15’de gösterildiği gibidir. Hava yastıkları arabanın yavaşlama hızına bağlı olarak çalışmaya başlarlar. Yavaşlama hızı, ivmeölçerler ile tayin edilir. Hava yastıklarında kullanılan sensörler piezoelektrik kuvvet sensörleridir. Bu sensörler, ani hareket değişimlerini kapasitansta gerçekleşen

değişim ile algılarlar ve sinyal oluşturarak hava yastığının çalışmasını sağlarlar. MEMS öncesinde kullanılan cıva anahtarları olarak bilinen sistemlerde kullanılan hava yastıklarının çalışması sırasında sorunlar yaşanmaktadır. Bu sebepten dolayı günümüzde kullanılan hava yastıklarının tamamında MEMS temelli sensörler kullanılmaktadır.



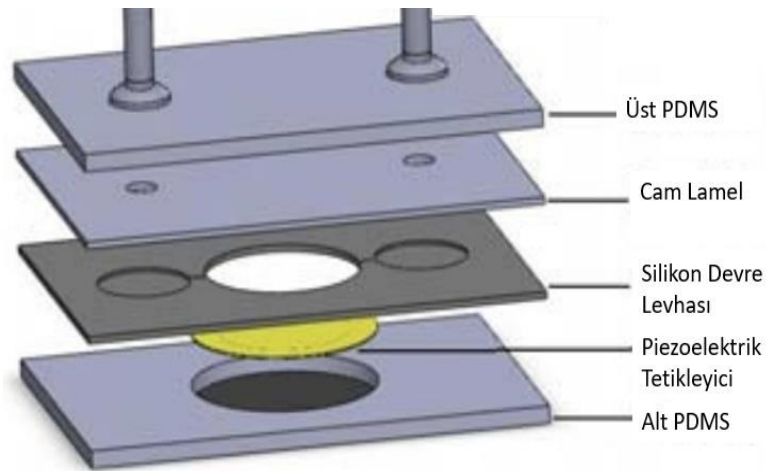
Şekil 1.15 : Piezoelektrik uygulaması örneği; piezoelektrik kuvvet sensörü [47].

ii) Elektrik Enerjisi-Mekanik Enerji Dönüşüm Uygulamaları,

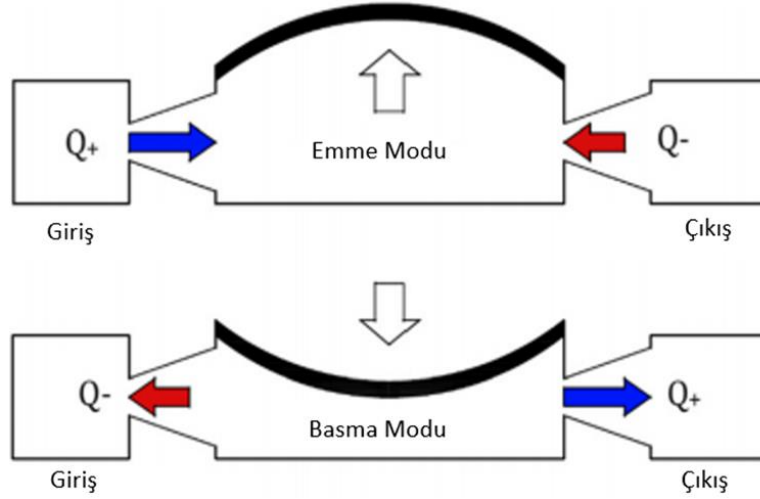
Uygulanan elektrik enerjisinin mekanik enerjiye çevrilmesini sağlayan uygulamalardır. Bunlar piezomotorlar, mikropompalar, valfler, kulaklıklar, ses dalgası (sonik) dönüştürücüleri, insan kulağının duymayacağı frekansda yani ses üstü (ultrasonik) temizleyiciler olarak sıralanabilir.

- Piezo motorlar: Bir piezoelektrik seramik parça üzerine uygulanan alternatif gerilim sonucunda elde edilen titreşimi, hareketli parçaya sürtünme kuvvetiyle aktararak çalışan motorlara “piezoelektrik motorlar” veya “ultrasonik motorlar” denir. Buradaki ultrasonik sözcüğü, bu motorların 20 kHz üzerindeki frekanslarda çalışmasından kaynaklanmaktadır.
- Piezoelektrik mikropompalar: Şekil 1.16’da Piezoelektrik mikropompanın üç boyutlu yapısal görüntüsü görülmektedir [48]. Buradan anlaşılacağı üzere mikro pompanın tasarlandığı alan ana pompa yapısı olarak adlandırılmıştır. Ve bu yapının üst yüzeyinde cam lamel alt yüzeyine de sızdırmazlık elemanı PDMS (Polydimethylsiloxane) kullanılmıştır. Alt PDMS’in orta kısmında bulunan yuva, şekilde sarı ile gösterilen piezoelektrik diskin yerleştirilmesi için

tasarlanmıştır. Cam lamel üzerine yerleştirilen üst PDMS yapısında da mikro pompaya akışkan giriş/çıkışını sağlayacak kanallar tasarlanmıştır. Şekil 1.17’de görüldüğü üzere akışkanın giriş ve çıkışının sağlandığı birer uç bulunmaktadır [49]. Bu kanalların giriş kısmından gönderilen akışın, Şekil 1.17’ de gösterildiği gibi çıkış kanalına doğru yönelmesi gerekmektedir. Bu süreçte piezoelektrik malzemeye akım uygulanmaktadır. Bu elektrik enerjisi piezoelektrik malzeme tarafından mekanik enerjiye çevrilmektedir. Mekanik enerji piezoelektrik malzemeyi Şekil 1.17’de görüldüğü üzere aşağı yukarı hareket ettirmektedir. Bu hareket pompa içerisinde hareket eden akışkanın pompanın çıkış kanalına doğru hareket etmesini sağlamaktadır. Bu hareketi Gidde R., R. ve arkadaşları 2019 yılında yaptıkları çalışmada detaylı olarak anlatmışlardır [49]. Diyafram yer değiştirmesine bağlı olarak (yukarı/aşağı), bir çevrimde emme ve basma modları olmak üzere iki mod vardır. Emme modunda, diyafram yukarı yönde sapar ve bu da hazne içinde negatif bir basınç oluşturur. Bu çalışma modu sırasında sıvı, giriş ve çıkış yoluyla hazneye akar. Ancak; ileri yöndeki kinetik enerji kaybı (yayıcı hareketi), ters yöndeki kinetik enerji kaybından (lüle hareketi) daha azdır. Sonuç olarak, emme modunda, girişten giren akışkan, çıkıştan giren akışkandan daha fazladır. Bu nedenle, akışkan girişten hazneye verilir. Basma modu sırasında, diyafram aşağı yönde sapar ve bu da hazne içindeki sıvının basıncını artırır. Sonuç olarak, haznedeki sıvı giriş ve çıkıştan çıkar. Ancak; ileri ve geri yönde kinetik enerji kaybının farklı olması sonucu, basma modunda, çıkıştan çıkan akışkan girişten çıkan akışkandan daha fazladır.



Şekil 1.16 : Mikropompanın 3D yapı görüntüsü [48].



Şekil 1.17 : Piezoelektrik mikropompa akışkanın geçiş anı ve piezoelektrik malzemin hareketi [49].

Piezoelektrik pompalar, yüksek yer değiştirme, minyatürleştirme kolaylığı, manyetik etkisi olmayan, düşük gürültü ve hızlı tepki özelliklerine sahip iyi bilinen mekanik pompalardır [50]. Piezoelektrik mikro pompalar ayrıca iki ana kategoriye ayrılır: valfli ve valfsiz. Valfli pompalar; diyaframlı (pompalama membranı), bağlantı kanallı ve iki çek valfli bir pompa odasından oluşur. Bu pompaların çalışma prensibi, emme ve basma fazlarında çıkış ve girişin sırasıyla kapalı veya açık olduğu pistonlu makro ölçekli pompalara benzer [2]. Öte yandan, valfsiz mikro pompalar, valfler bir çift lüle/yayıcı elemanı ile değiştirildiğinden daha basit bir yapıya sahiptir. Şimdiye kadar valfsiz pompalarla ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Lazer ve ark. [51], farklı tipte mikro pompaları tanıtan bir inceleme makalesi hazırlamışlardır. Singh ve ark. [52] analitik, sayısal ve deneysel olarak bir PZT (Piezoelectric lead Zirconate Titanate) ile çalıştırılan düzlemsel valfsiz PDMS mikro pompasını araştırmışlardır. Başka bir çalışmada, Olsson ve ark. [53], her biri iki akış doğrultucu lüle/yayıcı bileşenine sahip olan iki pompa bölmesine sahip, düzlemsel yapıya sahip valfsiz bir mikro pompa tasarlamışlardır. Ullmann [54], mikro pompaların paralel ve seri bağlantıları gibi çeşitli çalışma koşullarını tanıtarak tek ve çift odacıklı PZT valfsiz mikro pompaların performansını artırmaya çalışmıştır. Zhou ve Amirouche [55], PDMS'den yapılmış valfsiz tek odacıklı düzlemsel valfsiz bir mikro pompayı elektromanyetik olarak çalıştırmıştır. Diyafram titreşimi ve piezoelektrik sürücü ile ilgili mekanizma, Aboubakri ve arkadaşlarının çalışmasında açıklanmıştır [2]. Aynı araştırmacılar, ayrıca kontrol valfli PZT mikro pompaları üzerinde kapsamlı bir parametrik çalışma gerçekleştirmişlerdir. Tsui vd. [56] diyafram hareketini simüle ederek valfsiz mikro

pompaları sayısal olarak incelemişlerdir. Bazı çalışmalarda PZT valfsiz mikro pompaları incelemek için CFD(Computational Fluid Dynamics) teknikleri kullanılmıştır [57]–[59].

iii) Elektrik-Mekanik-Elektrik Enerjisi Dönüşüm Uygulamaları

Uygulanan elektrik enerjisinin mekanik enerjiye ve tekrar elektrik enerjisine çevrilmesini sağlayan uygulamalardır. Bunlar transformatörler, osilatörler, yüzey akustik dalgaölçerler, sonarlardır (deniz araştırmalarında radarlar).

Tüm bu bilgiler ele alınarak literatür incelendiğinde PZT ile tetiklenen mikro düzey pompa kullanılarak yapılan çalışmaların bir kısmı aşağıda incelenmiştir.

Örneğin; Andersson ve ark. [60] derin reaktif iyon aşındırma (DRIE) kullanarak valfsiz bir mikro pompa üretip su, mineral yağve paramanyetik taneler gibi farklı çalışma sıvılarıyla analiz ettiler. Mikropompalarının biyokimyasal uygulamalarda kullanılan sıvılar için uygun olduğunu gösterdiler. Diğer araştırmacılar da valfsiz mikro pompaların imalatında DRIE yöntemini kullanmışlardır [53], [61]–[63]. Literatürde PMMA(Polymethyl Methacrylate) tabanlı ve tamamen PDMS (polidimetilsiloksan), PZT valfsiz mikro pompalar da bildirilmiştir [64], [65]. Sainiemia ve Franssilab [25], DRIE sürecinde sekiz farklı maske malzemesi, beş fotorezist ve üç sert maske malzemesi ele almıştır. Araştırmacılar, bu malzemelerden fotorezist olanlarının, AZ 1505 ve SU8 dışındakilerinin çatlamaya karşı dirençli olduklarını, dirençlerin ana çatlama mekanizmalarının ısıl genleşme ve mekanik deformasyon olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmadaki sert maskelerinhiçbirinde çatlama olmamasına rağmen, Alüminyum maske için aşındırma oranının SiO_2 ve Al_2O_3 olanlardan daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Guan ve arkadaşları [9], üç pompa odası çapıyla (12 mm, 15 mm, 20 mm) sürücü dalga tipi, sürücü voltajı ve sürüş frekansının etkisini incelemiştir. akış hızındaki debiler aynıydı ve bu mikro pompa odasının içinde optimal çap 12 mm idi. Bu çalışmada, 12 mm dış çapa sahip mikro pompa için maksimum debi $100 V_{p-p}$ 'de $150 \mu l/dk$, $70 V_{p-p}$ 'de $58 \mu l/dk$ ve sinüs dalgalı $40 V_{p-p}$ 'de $20 \mu l/dk$ idi. Burada belirtilen V_{p-p} birimi “peak to peak” olarak adlandırılan yani en fazla pozitif tepeden en fazla negatif tepeye olan toplam voltaj değerini belirtmektedir. Cui ve arkadaşları [8], 200 Hz, 400 Hz ve 500 Hz frekanslarında 60 V ila 140 V dahil olmak üzere farklı V_{p-p} değerlerinin etkisini incelemiştir. Uygulanan tüm frekanslar için akış hızı eğrilerinin aynı eğime sahip

oldukları, debinin voltajla sürekli arttığı (60V'dan 140V'a) anlaşılmıştır. Başka bir çalışmada, Yanfang Guan ve ark. [66] frekans dalga tipinin etkisini incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre, piezoelektrik sürücünün maksimum yer değiştirmesi bir kare sinyal ile gerçekleştirilmiştir. Kinematik viskozite, mikro pompalardaki debiler için de önemli bir parametredir. Sayar ve Farouk [57], çalışma sıvısı olarak metanol ve etanol kullanarak kinematik viskozitenin etkisini incelemiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre, kinematik viskozitesi daha küçük olan metanol için elde edilen debi etanole göre daha büyüktür.

1.2 Özgün Değer

Literatür incelemelerinde mikro ölçülere sahip alanlarda yapılan çalışmaların çoğunlukla sayısal simülasyonlar oldukları görülmektedir. Deney düzeneklerinin kurulumlarının oldukça yüksek maliyetlere sebep olmasının yanı sıra deney düzeneği hazırlamak, mikro ölçekte zorlayıcıdır. Mikro ölçekteki yapıların incelenmesi için , teknolojik olarak üst düzey deney düzeneklerini içeren laboratuvar alanları gerekmektedir. Bu tezde adım adım mikropompa üretilme aşamaları incelenerek üretimi sağlanmıştır; üretim aşamaları detaylı şekilde anlatılmıştır. Mikropompa üretimi sırasında temin edilen piezoelektrik malzeme oldukça hassastır ve kırılabilir bir yapıya sahiptir. Bu sebep ile temin edilecek piezoelektrik malzeme de herhangi bir kesme veya kırma gibi boyutunu değiştirecek herhangi bir işlem yapılması malzemenin kendisine zarar vereceğinden uygun boyuta karar verip, bu karar eşiğinde temin edilmiştir. Üretilen mikro pompa yapısına eklenerek, akışkan geçirilerek şartlandırılmış harici bir elektrik kaynağı ile tahrik edilen bir piezoelektrik malzeme üzerinde meydana gelen deformasyon üzerindeki akış incelenmiştir. Üretimi ve yardımcı ekipmanlar (PDMS, PZT ve cam lamel) ile montajı biten mikro pompa ile kontrollü deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde kullanılan frekans değerleri, piezoelektrik malzemenin besleneceği V_{p-p} değeri, frekans değeri için kullanılacak dalga türü ve son olarak akışkan olarak çeşitli sıvılar ele alınmış ve bu faktörlerin akışkan debisi üzerine etkisi incelenmiştir. Çıkan sonuçlar analiz edilerek, endüstriyel, laboratuvar ve tıbbi uygulamalar için pompa tasarımına yönelik uygun hipotezler ve tasarım kriterleri geliştirilmiştir.

1.3 Amaç

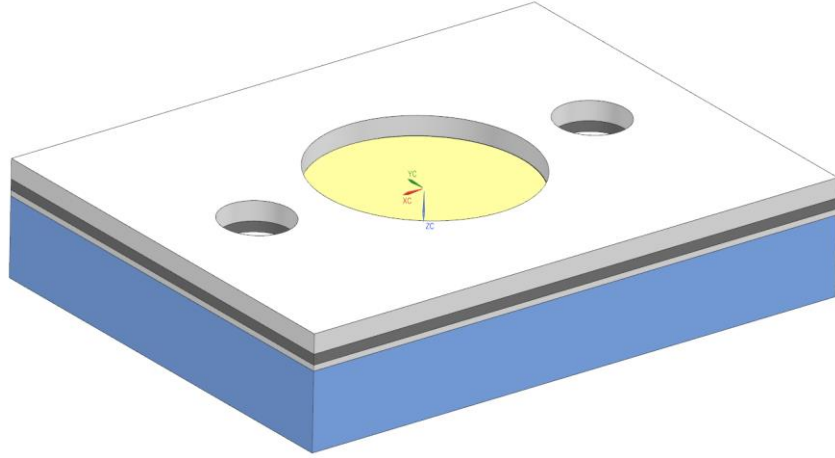
Bu tezde piezoelektrik kullanım alanlarından olan elektrik enerjisi-mekanik enerji dönüşümlerinde kullanılan mikropompa tasarlanmıştır. Tasarlanan mikro pompa için yapılan literatür araştırmalarında akışkanı tetikleyen unsurun piezoelektrik disk olmasına dikkat edilmiştir. Tasarımda valf kullanılmamış ve akışkanın pompa odasına giriş ve çıkışı lüle/yayıcı ile sağlanmıştır. Bu aşamada tasarım için önemli olan noktalar (lüle/yayıcı açısı, uzunluğu, pompa odası ve kanalların derinliği vb.) yapılan makale araştırmalarında özellikle dikkat edilmiştir. Yapılan tasarım ele alınarak, mikro pompanın işleneceği malzeme belirlenmiş ve bu malzeme özellikleri için en ideal aşındırma yöntemi için detaylı araştırma yapılmıştır. Mikropompaların üretimi çok hassas tolerans değerlerine sahiptir ve geometrik büyüklükler mikro düzeyde olduğu için üretimi de oldukça zor süreçlere sahiptir. En uygun yöntem seçildikten sonra üretim için kullanılacak malzemeler ve laboratuvar ortamı temin edilmiştir. Mikro düzey üretimlerin gerçekleştirildiği “temiz oda” adı verilen özel ortamların detaylı araştırılması yapılmış ve bu araştırmalar ışığında mikro pompa üretimi sağlanmıştır. Üretilen mikro pompanın deneyde kullanılacak aşamaya gelmesi için kullanılacak diğer yapı malzemeleri (PDMS, PZT, cam lamel) temin edilmiş ve en uygun montaj sağlanmıştır. Montajı biten mikro pompa düzeneği için deney düzeneği kurulmuştur. Öncelikle bu deney düzeneğinde kullanılacak ekipmanların temini sağlanmıştır. Kurulan deney ortamında kontrollü deneylere başlanmıştır. Deneylerde akışkan debileri temel çıktı olarak kullanılmış ve bu debiyi etkileyen faktörler incelenmiştir. Bu faktörlerde, kullanılacak frekans değerleri, piezoelektrik malzemenin besleneceği V_{p-p} değeri, frekans değeri için kullanılacak dalga türü ve son olarak akışkan olarak çeşitli sıvılar ele alınmıştır. Bu faktörlerin akışkan debisi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çıkan sonuçlar analiz edilerek, mikropompa tasarımları geliştirilecek endüstriyel, laboratuvar ve tıbbi uygulamalar için pompa tasarımına yönelik uygun hipotezler ve tasarım kriterleri geliştirilmiştir. Böylece bazı basit durumlar ve kısıtlı malzeme anizotropi simetri klasları için mevcut olan analitik çözümler yerine katı, elektrik ve akışkanlar için yapılan tümleşik çözümlemenin gücü gösterilmiştir.



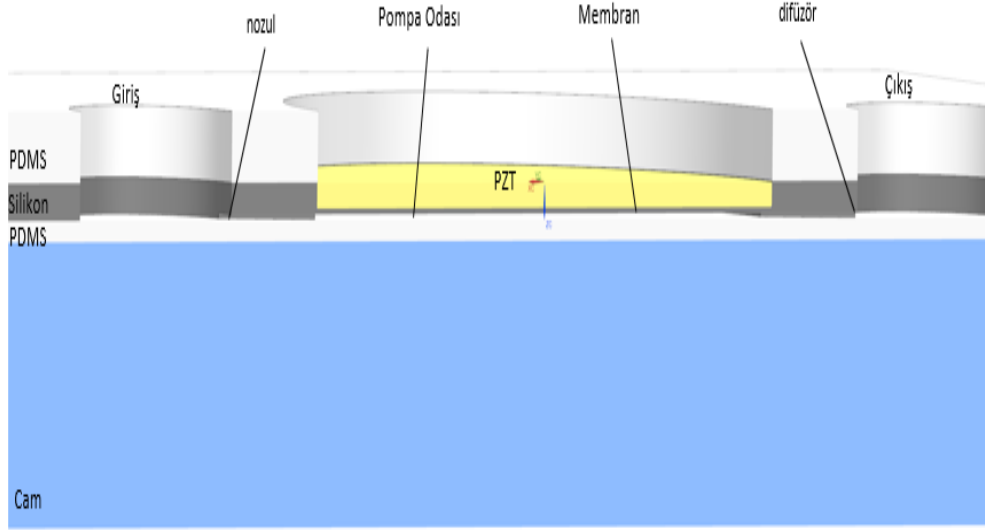
2. TASARIM ve ÜRETİM İLKELERİ

2.1 Mikro Pompanın Tasarımı

Geniş kapsamlı olarak yapılan literatür çalışmasından sonra tez kapsamı için bir pompa odasına sahip, valf içermeyen bir mikro düzey pompa tasarlanmıştır. Valf olmadığı için akışkan hareketini sağlayacak lüle/yayıcı tasarlanmıştır. Lüle akışkanın rezervuardan pompa odasına, yayıcı ise akışkanın pompa odasından rezervuara hareketini sağlanmaktadır. Şekil 2.1’de tez kapsamında kullanılacak mikro pompanın CAD görüntüsü gösterilmiştir. Bu şekilde ortada bulunan sarı yapı PZT tetikleyiciyi temsil etmektedir. PZT için oluşturulan yuvanın sağ ve solunda oluşturulan ve daha küçük çapa sahip olan kanallar mikro pompaya akışkan giriş ve çıkışının sağlanması için tasarlanmıştır.



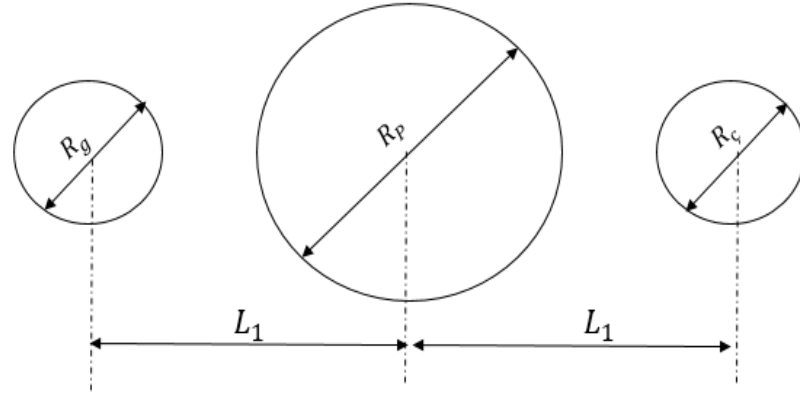
Şekil 2.1 : Tasarlanan mikro pompa CAD görüntüsü.



Şekil 2.2 : Tasarlanan mikro pompanın kesit - CAD görüntüsü.

Şekil 2.2’de CAD görüntüsünün bir kesiti alınmıştır. Bu şekilde detaylar daha net gözükmetedir. Temel anlamda mikro pompa dört temel parçadan oluşmaktadır. İlki daha önce bahsettiğimiz gibi piezo elektrik malzemesi, PZT tetikleyici malzemedir. Diğerleri sızdırmazlık sağlaması için silikon malzemenin alt ve üst yüzeyine uygulanan PDMS malzemesidir. Üçüncü malzeme, akışkanın akacağı yüzeye sabitlenen cam levha ve son olarak pompa odası, lüle/yayıcı kanallarının işlendiği ‘wafer’ adı verilen silikon plakadır.

Şekil 2.3’de, tez kapsamında üretilecek mikro pompanın üst yapı görüntüsü üzerinde boyutsal detayları gösterilmiştir. Piezoelektrik konum merkezi ile akışkan beslenmek için kullanılan kanalın merkezi arası uzaklık (L_1) 12.82 mm olarak belirlenmiştir. Piezoelektrik diskin yerleştirileceği alanın çapı (R_p) 15 mm ve akışkan giriş (R_g) ve çıkışı (R_c) için kullanılan kanalların çapı 5 mm olarak belirlenmiştir.

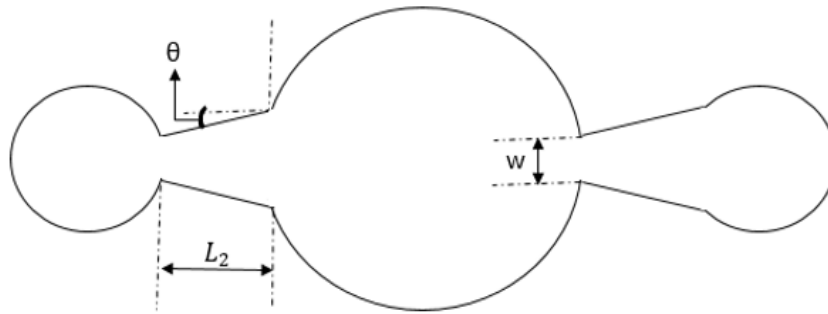


Şekil 2.3 : Mikro pompanın üst yapı şeması.

Şekil 2.4’de, tez kapsamında üretilecek mikro pompanın alt yapı görüntüsü üzerinde boyutsal detayları gösterilmiştir. Pompa odası olarak üretilen alanın çapı, piezoelektrik diskin yerleştirileceği alanın çapı (R_p) ile aynıdır ve 6 mm olarak belirlenmiştir.

Mikro pompa odasına akışkan giriş ve çıkışları için kullanılan lüle ve yayıcı aynı ebatlarda üretilmiştir. Bu alanların en dar kesitlerinin çapı (w), lüle yapı için giriş kanalından gelen akışkanın toplandığı rezervuardan akışkanın lüleye giriş ağzı, yayıcı yapı içinse pompa odasından akışkanın yayıcıya giriş ağzı kısımlarıdır ve bu değer 0.25 mm’dir. Ayrıca lüle/yayıcı kanal uzunlukları (L_2) 2.82 mm olarak belirlenmiştir.

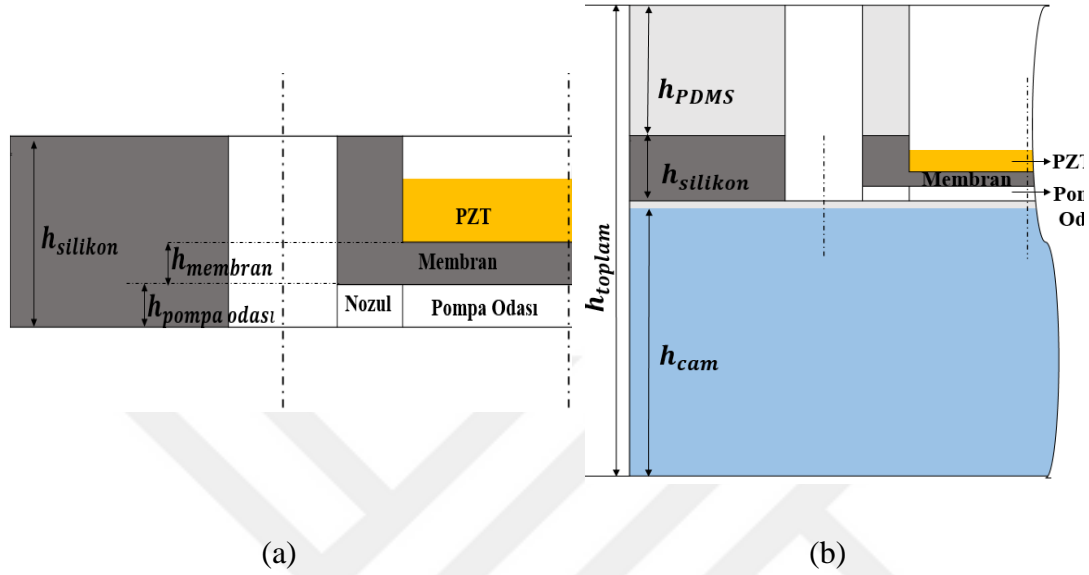
Lüle/yayıcı açısı (θ) 9.4 ° derecedir.



Şekil 2.4 : Mikro pompanın alt yapı şeması.

Şekil 2.5’de mikro pompanın detay kalınlıkları gösterilmiştir. Mikro pompanın tasarlanacağı silikon kalınlığı ($h_{silikon}$) 500 μ m, pompa odasının (h_{pompa}) ve pompa odasına akışkan giriş ve çıkışını sağlayan lüle ve yayıcı kalınlıkları aynıdır ve 80 μ m olarak tasarlanmıştır. Pompa içerisindeki akışkanın hareketini tetikleyecek piezo malzemenin alt yüzeyinin temas edeceği ve akışkan ile temasını keseceği membran

için oluşturulan yapı kalınlığı ($h_{membran}$) 80 μm olarak belirlenmiştir. Ayrıca silikon plakanın üst yüzeyine uygulanan PDMS kalınlığı (h_{PDMS}) 1000 μm ve silikon plakanın alt yüzeyine uygulanan cam levha kalınlığı (h_{cam}) 2000 μm olarak kullanılmıştır.



Şekil 2.5 : (a) Mikro pompanın, (b) Mikro pompa sisteminin genel yan kesit görüntüsü.

Yukarıda belirtilen ebatlar ile tasarlanan mikro pompa silikon plaka üzerine işlenmek üzere hazırdır. Sonraki aşama öncelikle üretim için literatür taramasıdır ve sonra bu tasarım eşliğinde mikro pompa üretimi yapılmıştır.

2.2 Mikro Pompanın Üretimi

2.2.1 Mikro pompa üretimi için kullanılan ekipman

Mikro pompanın üretimi için gerekli olan malzemelerin özellikleri bu bölümde detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Mikro pompanın tasarımı için öncelikle planlanan tasarımın işlenmesi gereken bir alt tabakaya ihtiyaç duyulmaktadır.

2.2.1.1 Alt tabaka (substrat)

Çoğu standart mikroelektronik ve mikroeletromekanik sistem (MEMS), alt tabaka olarak kristal silikon (c-Si) ile üretilir. Silikon-alt tabakalar (Si-substratlar), cam veya plastik substratlardan daha maliyetlidir. Ayrıca sert ve opaklardır [67], [68]. Paulasto-Kröckel ve arkadaşları 2020 yılında yaptığı çalışmada MEMS uygulamaları için

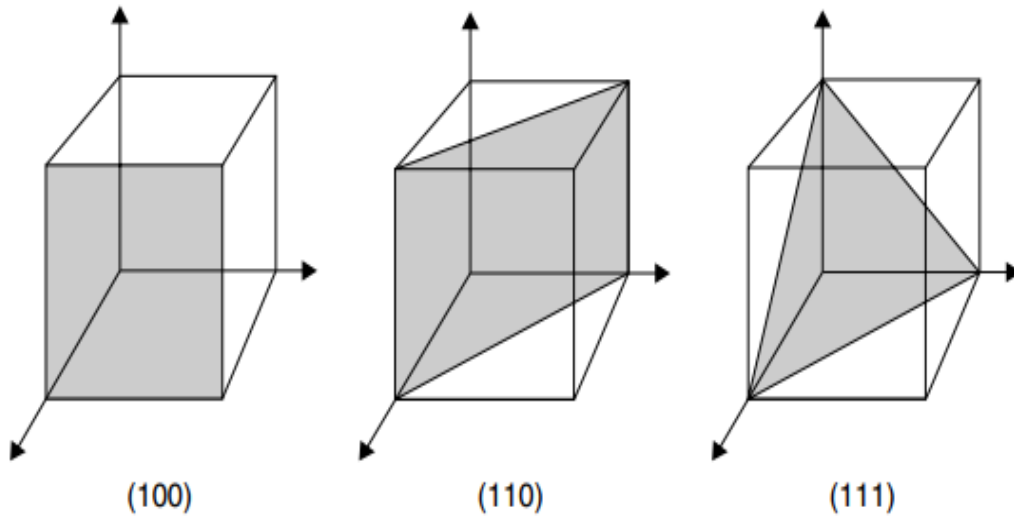
silikon alt tabakanın (Si-substrat) özelliklerini şöyle sıralamışlardır. Silikon, MEMS için neredeyse ideal bir malzemedir, yeterince inerttir, elastiktir (MEMS cihazlarının normalde karşılaştığı düşük sıcaklıklarda plastik deformasyon olmaz), cihaz çalışmasında yorulma göstermez veya çok az gösterir, anizotropik özellikler hem cihaz imalatında hem de cihazda kullanılabilir operasyon [69].

Silikon malzemenin önemli özelliklerinden biri kristal yapılarıdır. Bunun sebebi kristal yapılarına göre farklı çalışma şartları sağlamalarıdır. Temel olarak iki kristal yapısı kullanılmaktadır: i-) Tek-kristalli, ii-) poli-kristalli silikon malzeme. Bu iki yapı arasındaki farkı Yong Y.K. vd. [70] şöyle açıklamışlardır: Tek kristalli malzeme, daha yüksek çözünürlük, daha iyi doğruluk ve yüksek tekrarlanabilirlik gibi özelliklerini sağlarken poli-kristal Si malzeme, tek kristalli Si'nin aksine bu özellikler daha düşük seviyede kendini göstermektedir. Tek kristal Si ekonomiktir ve yaygın olarak üretim aşamalarında kullanılır. Mekanik olarak stabildirler ve alüminyuma kıyasla hafif, düşük kütle yoğunluğu ile ideal yapı malzemesidir. Çeliğin neredeyse iki katı olan iyi bir elastisite modülüne sahiptirler. Si, düşük termal genişleme katsayısına sahiptir. Çelik ve alüminyumdan yaklaşık 8-10 kat daha küçüktür. Si'nin elektrik direnci 10^{-3} ila $10^{4.5}$ Ω -cm mertebesindedir; bu nedenle Si, ihtiyaca göre iletken veya yalıtkan yapılabilir. Si'nin tüm bu özellikleri, aşırı çevresel uygulamalar için uygunluğunu artıran cihazlarda mekanik, termal, elektriksel entegrasyon için uygun hale getirir [70], [71].

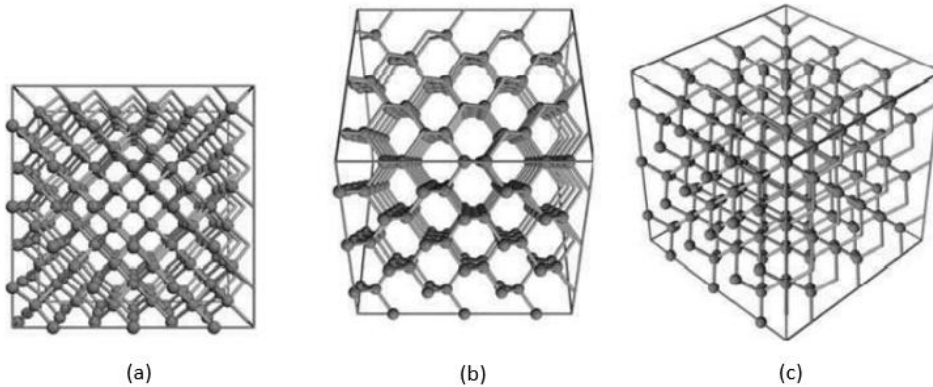
Çizelge 2.1 : Silikon, alüminyum ve çeliğin temel özelliklerinin karşılaştırılması.

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Elastisite Modülü (MPa)	Termal Genleşme Katsayısı (μ m/mK)	Elektrik Direnci (Ω -m)
Silikon	2.33	150×10^3	2.6	2.3×10^3
Alüminyum	2.70	70×10^3	23.1	26.5×10^{-8}
Çelik	8.03	200×10^3	12.5	69×10^{-8}

Tez kapsamında üretilen mikro pompa için kullanılacak tek kristalli Si malzeme için incelenmesi gereken diğer bir etken ise kristal yönü yani oryantasyonu idi.. Bir silikon plakanın (wafer) yüzeyi, üç farklı yönelimden biri olabilir. Bu üç yaygın silikon plaka yüzey yönelimi şunları içerir: dik (perpendicular), yatay (horizontal) ve dikey (vertical). Bu kristal yüzeyler Miller indeksi tarafından açıklanmaktadır [22]. Miller indeksleri, bir kristal içindeki düzlemleri ve yönü gösteren üç basamaklı gösterimlerdir. Bu gösterimler, x, y ve z'nin Kartezyen koordinat sistemine dayanmaktadır. Kartezyen koordinat sistemi, x, y ve z olmak üzere üç vektör (eksen) kullanılarak gösterilmiştir [72].

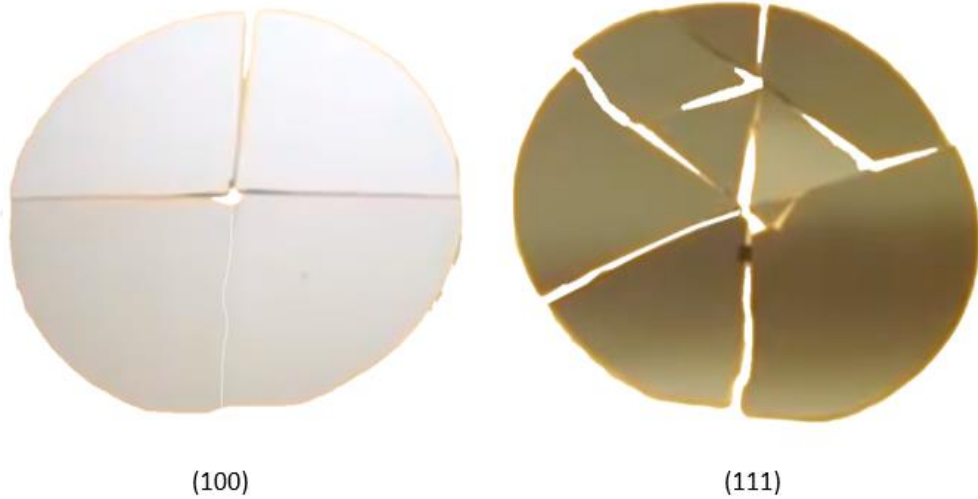


Şekil 2.6 : Silikon kristal düzlemlerinin gösterimi [22].



Şekil 2.7 : Farklı açılardan bakıldığında silikon kristal: (a) yüz görünümü (100); (b) kenar görünümü (110); (c) tepe görünümü (111) [22].

MEMS üretimlerinde silikon-alt tabakalar (Si-substratlar) için (100) ve (111) en yaygın olarak kullanılan yüzeylerdir [73]. Bu iki yüzey arasından yapılacak seçim için kullanılacak yöntem aslında silikon plakayı (wafer) ne için kullanacağımıza bağlı olarak değişmektedir. Aşındırma işlemi bittikten sonra silikon plaka üzerine işlenen pompa miktarı kadar parçalara ayrılabilir böylelikle hem zamandan hemde üretim masraflarından tasarruf sağlanabilir. Bu sebepler eşliğinde silikon plaka için elmas ile kesilme kolaylığı sağlayan oryantasyon seçilmiştir. (100) oryantasyonunu (111) oryantasyonuna göre kesmek daha kolaydır. Bu durum yapılacak basit bir “oryantasyon belirleme deneyi” ile belirlenebilir. Şekil 2.8’de gösterildiği gibi oryantasyonları (100) ve (111) olan iki silikon devre levhalarının merkezlerine birer çentik atıldığı zamana (100) oryantasyonuna atacağınız çentik attığınız yön boyunca kırılacaktır fakat (111) oryantasyonunda atılan çentik silikon plakanın yönleri farklılık gösteren bir çok farklı boyutta parçaya ayrılmasına sebep olacaktır [74].



Şekil 2.8 : Silikon plaka için “oryantasyon belirleme deneyi” [74].

Silikon plaka kullanımında dikkat edilmesi gereken yüzeyin pürüzsüzlüğüdür. Bu parlak (cilalanmış) ve pürüzsüz yüzey alkali koloidal silika karışımı kullanılarak yapılır. İşlem esas olarak kimyasaldır ve cilalamadan sonraki yüzey mekanik hasar içermez [75]. İki tür parlatılmış silikon plaka bulunmaktadır: Tek yüzeyi parlatılmış (Single-Side Polishing – SSP) ve her iki yüzeyide parlatılmış (Double-Side Polishing – DSP) silikon plaka [76]. Hangi tür silikon plakanın kullanılacağı aşındırılacak yüzey ve kullanılacak alan için yüzey pürüzlülüğünün önemine göre belirlenmektedir. Çift taraflı cilalı silikon plakanın en önemli özelliği gelişmiş performansdır. Ayna kaplaması, mikro pürüzlülüğü ve yüzeydeki hasarı ortadan kaldırarak verimliliği artırır

ve kontaminasyon riskini azaltır. Yarı iletkenler için uygun maliyetli bir seçenektir. Çift taraflı cilalı silikon plakların birincil avantajı, üstün performanslarıdır. Sonuç olarak, yüzey kirliliği önemli ölçüde azalır. Bu süreç aynı zamanda düşük performansa ve verimsizliğe neden olan partikül yakalama riskini azaltmada da etkilidir. Pürüzsüz, ayna benzeri yüzeyi, yüksek hassasiyetli uygulamalar için en iyi yüzey kalitesini sağlar. Bu çift taraflı silikon plakalar daha dayanıklıdır ve endüstriyel sınıf yarı iletken üretiminde kullanılabilir. Çift taraflı cilalı silikon plaka, normal silikon plakalardan daha yüksek performansa sahiptir. Ayna kaplaması, yarı iletken üretiminde düşük performans ve verimsizliğin başlıca nedeni olan yüzey kirliliği miktarını azaltır. Ayna kaplaması yüzey kirliliğini azaltmanın ve verimi artırmanın etkili bir yoludur ve yüksek düzeyde şeffaflık sunar. Aynı zamanda yüzeyin düzlüğünü de artırır. Ortaya çıkan yarı iletkenler mükemmel düzlüğe ve daha yüksek bir verimliliğe sahiptir. Çift taraflı cilalı silikon plaka, ayna benzeri bir yüzeye sahiptir. Ayna benzeri kaplaması, birden fazla uygulama için idealdir. Süreç aynı zamanda zararları da azaltır. Çift taraflı parlatma işlemi, geniş bir uygulama yelpazesine izin verdiği için yarı iletken uygulamalar için oldukça avantajlıdır [77].

Şekil 2.9'da her iki yüzeyide parlatılmış (Double-Side Polishing – DSP) farklı çaplara sahip plakalar görülmektedir.

Tezde 100 mm çapında, (100) oryantasyona sahip, her iki yüzeyi de parlatılmış silikon plaka kullanılmıştır.



Şekil 2.9 : Çeşitli çap ve kalınlıkta bulunan her iki yüzeyi de parlatılmış silikon plaka görüntüsü.

2.2.1.2 Maske

Silikon malzemelerde yüzey üzerine istenilen desenin verilmesi için kullanılan iki adet maske bulunmaktadır. Bunlardan ilki Fotodirenç Maskesi (Photoresist Mask) ve ikincisi Sert Maskedir (Hard Mask).

Fotodirenç maskesi (Photoresist Mask)

Desen oluşturmanın en hızlı ve en basit yolu, fotorezisti dağlama maskesi olarak kullanmaktır. Fotorezist, ışık dirençli yani devre üretimlerinde yüzeye serilerek kullanılan, mor ötesi ışığa duyarlı madde anlamına gelmektedir. Veikko Lindroos ve arkadaşlarının 2010 yılında çıkardıkları kitapta fotodirenç maskesi detalı bir şekilde ele alınmıştır [11]. Mikrometre aralığındaki tipik fotorezist kalınlıkları dağlama derinliğini birkaç on mikrometre (boy en oranı 5:1 olan tipik RIE seçiciliği varsayarak) veya yüzlerce mikrometre (boy en oranı 100: 1 olan tipik DRIE seçiciliğini varsayarak) ile sınırlar. Daha kalın fotorezistlerin kullanılması mümkündür, ancak minimum çizgi genişliği artar. Minimum çizgi genişliği olarak belirtilen değer de asgari içerik

genişliği anlamına gelmektedir. Hem yüksek hem de kriyojenik sıcaklıklar fotorezistler için zararlıdır. Fakat (D)RIE reaktörlerinde helyum arka soğutma uygulaması ile fotorezist hasar (karbonizasyon) ile ilgili sorunlar büyük ölçüde ortadan kaldırılmıştır. Yanmış fotorezistin çıkarılması zahmetli olabilir. Kriyojenik sıcaklıklarda fotorezistler çatlamadan muzdariptir [26]. Fotorezist maskelerin (Photoresist Mask) avantajları olduğu kadar sınırlamaları, kusurları da mevcuttur [78]. Geometri / topoloji açısından kusurlarını Şekil 2.10'da gösterilen Şekilde aşağıdaki sınıflandırılmıştır.

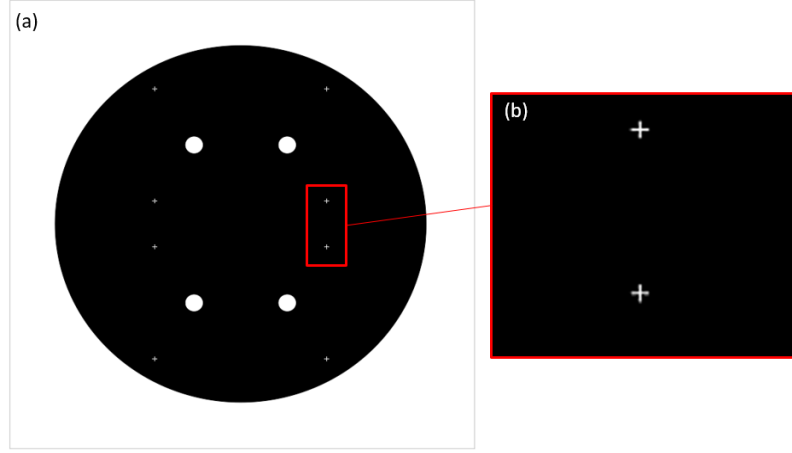
- ıkıntı (bir özelliğe bağlı ekstra krom)
- Girinti (intrusion) (bir özellikte kısmi krom kaybı)
- Köprü (iki özelliği bağlayan krom)
- Boyunluk (bir çizgide süreksizlik)
- İğne deliği (kromdaki delik)
- Pim noktası (açık alan üzerinde ekstra krom)

Verim ve güvenilirlik açısından tüm kusurlar eşit değildir. Kusur çok geniş bir terim olarak anlaşılmalıdır: silikon plakaya baskı yapan veya kritik boyutu % 10'dan fazla değiştiren her Őey kusur olarak kabul edilir.



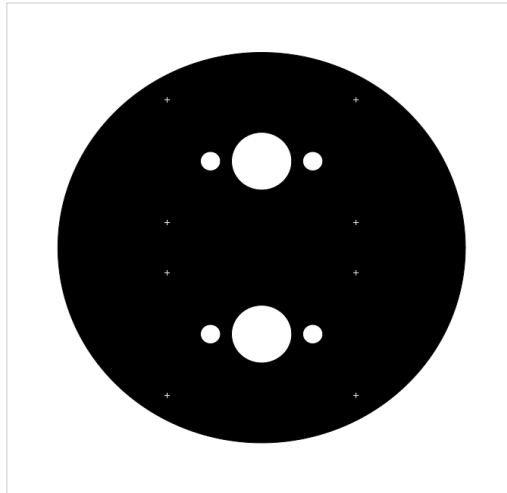
Şekil 2.10 : Maske kusurları: özellik boyutundan daha küçük kusurlar nihai boyutları ve dolayısıyla akım yoğunluğunu, elektrik alanını ve diğer cihaz parametrelerini etkiler [78].

Tez kapsamında kullanılmak üzere üç adet fotorezist maske (Photoresist Mask) tasarımı gerekleştirilmış ve SolidWorks programı ile iki boyutlu çizimi yapılmıştır. (Şekil 2.11-13)

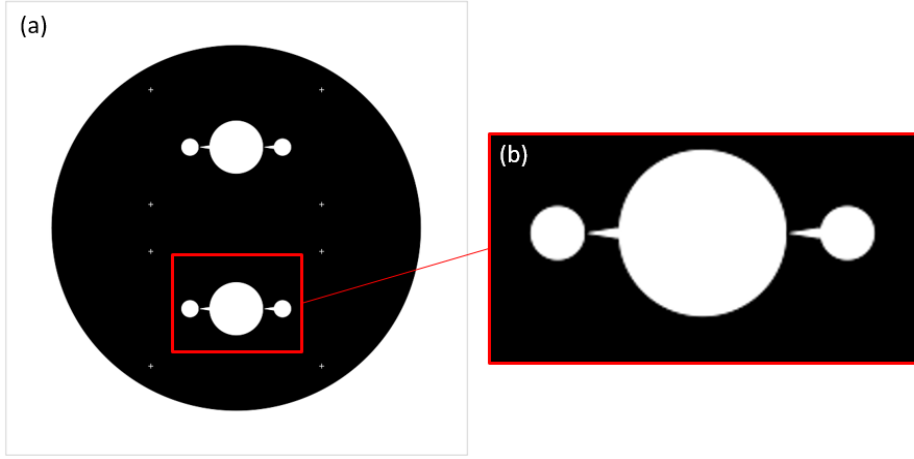


Şekil 2.11 : (a) Mikro pompaya akışkan giriş / çıkışını sağlayan kanalların üst görüntüsü, (b) maske markalama görüntüsü.

Şekil 2.11 (a) 'da mikro pompaya akışkan giriş ve çıkışını sağlayacak olan kanal çaplarından oluşan dört adet daire görülmektedir. Dört tane olmasının sebebi her bir silikon plakaya iki adet mikro pompa tasarımı deseni çıkartılacak olmasıdır. Şekil 2.11 (b)'de detay resmi olarak gösterilen artı işaretleri her maske için kullanılmış markalamaları göstermektedir. Bu markalar bir silikon plaka üzerine birden çok maskeleme işlemi yapıldığı zaman her maskenin eş merkezli olmasını sağlamaktadır. İlk maskeleme işlemi bitip, aynı silikon plaka üzerine ikinci maskeleme işlemi yapılacağı zaman bu markalar üst üste getirilerek maskeleme işlemi yapılmaktadır. Böylelikle, her iki maskeleme işlemi eş merkezli olarak silikon plaka üzerine işlenmiş olmaktadır.



Şekil 2.12 : Mikro pompaya akışkan giriş / çıkışını sağlayan kanalların ve piezoelektrik diskin konumlandırılacağı alanın üst görüntüsü.

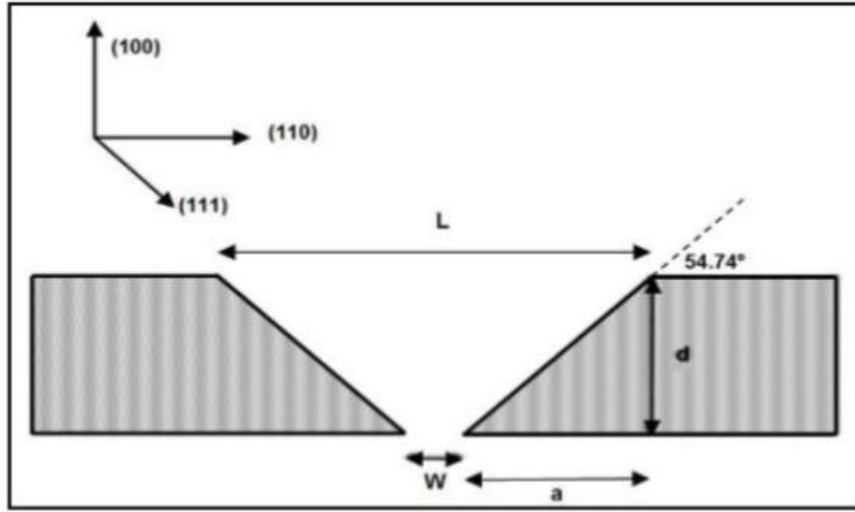


Şekil 2.13 : (a) Mikro pompaya odası, lüle/yayıcı üst görüntüsü, (b) pompa odası, lüle/yayıcının büyültülmüş görüntüsü.

Fotorezist maskelerin tasarlanması sırasında dikkate edilecek temel unsur aşındırma işleminin hangi yöntem ile yapılacağıdır. Eğer aşındırma işlemi kuru aşındırma yöntemi kullanılarak yapılacaksa aşınmaya başlayan noktada oluşturulan desen ile aşınan derinlik sonundaki desen birbiri ile aynıdır. Şekil 1.5 'de gösterildiği gibi yan duvarlarda bir açı oluşmadan aşınmanın biteceği noktaya kadar dik devam edecektir. Eğer aşındırma işlemi ıslak aşındırma yöntemi kullanılarak yapılacaksa aşınmaya başlayan noktada oluşturulan desen ile aşınan derinlik sonundaki desen birbiri ile aynı olmayacaktır. Şekil 1.12'de gösterildiği gibi yan duvarlar, (111) oryantasyonuna sahip duvarlar, (100) oryantasyonuna sahip taban ile 54.7° bir açı yapacak şekilde kesişmektedir. Burada çıkarılması gereken sonuç; kuru aşındırma yaparken kullanılacak maske ile tasarlanan yapının ebatları birebir aynı olurken, ıslak aşındırmada bu durumun aynı olmamasıdır. Bu sebeple ıslak aşındırmada maske tasarımı yaparken, tasarlanan mikro pompa ebatlarından daha büyük bir maske tasarım ebatları seçilmelidir ki; aşınma sonucu elde dillecek nihai ebatlar başta tasarlanan mikro pompa ebatları ile aynı olmuş olsun.

Kuru aşındırma da için Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'de belirtilen ebatlar ile birebir ölçüde maske tasarımı gerçekleştirilmiştir. Aşındırma yöntemi için ıslak aşındırma kullanılması durumunda maske tasarımında dikkat edilmesi gereken detaylara Norliana Yufof vd. [80] yer vermişlerdir. Çalışma sonucu ıslak aşındırıcılar kullanılarak (100) yönelimli silikonun aşındırılması, Şekil 2.14 'de gösterildiği gibi (100) yüzeyinden 54.74° lik bir açıyla (111) düzlemlerinde V-şekilli oluk sorunları yaratacağı gösterilmiştir. Şekil 2.14 'de, aşınmaya başlama noktasındaki aşınacak yüzey genişliği (L), aşındırma derinliği (d), aşınmanın bitiş noktasındaki aşınmış

yüzeyin genişliği (W), aşınmanın başladığı ve bittiği noktadaki yüzey genişliklerinin (L ve W) farkının yarısı (a) olarak belirtilmiştir.



Şekil 2.14 : İslak aşındırıcı çözeltisi kullanılarak (100) silikonda V şeklinde bir oluğun oluşturulmasının kesit görüntüsü [79].

Şekil 2.14'den ıslak aşındırma kullanılacak zaman maske tasarımının daha büyük olması gerektiği anlaşılmaktadır. Bu büyüklük oranı denklem (2.1)'de açıklanmıştır.

$$W = L - 2\alpha = L - \frac{2d}{\tan 54.74^\circ} = L - \frac{2d}{1.414} \quad (2.1)$$

Sert maske (Hard Mask)

Silikon dioksit, metaller ve metal oksitler gibi sert maskeler, fotorezistlerin sınırlamaları nedeniyle sıklıkla kullanılmaktadır. Avantaj olarak fotorezistlerden daha yüksek seçicilik ve daha geniş bir sıcaklık aralığı sunarlar. Dezavantaj olarak, sert maskeler işlem karmaşıklığı sunmaktadır [11]. Aşındırma işleminden önce alt tabaka üzerine sert bir maske yerleştirilir ve desenlendirme (patterning) işlemi gerçekleştirilir. Fakat bu sert maske malzemesinin biriktirilmesi (deposition) yüksek sıcaklık proseslerini içerebilir ve bu yüksek sıcaklı dağlama işlemindeki nihai yapıların kalitesinin düşmesine sebep olmaktadır. Biriktirme (deposition), desenleme (patterning) ve uygulamaların gösterildiği en yaygın sert maske malzemeleri Çizelge 2.2 'de listelenmiştir.

Çizelge 2.2 : Tipik sert maske malzemeleri ve en sık kullanılan biriktirme (deposition) ve desenleme (patterning) yöntemleri ve uygulamaları [29].

Malzeme	Biriktirme	Desenleme	Uygulama
SiO_2	(PE) CVD, Termal Oksitleme	HF (ıslak), CHF_3 (kuru)	Derin Dağlama, Yüksek-Sıcaklıkta Dağlama
Al	Püskürtmeli Metal Film, Buharlaştırma	H_3PO_4 (ıslak), Cl_2 (kuru)	Kuvars Dağlama
Al_2O_3	Püskürtmeli Metal Film,	HF (ıslak), SF_6 (kuru)	Yüksek Seçicilik Süreci
Cr	Püskürtmeli Metal Film,	$HClO_4$ / $Ce(NH_4)_2(NO_3)_6$ (ıslak)	Yüksek Seçicilik Süreci
Ni	Kaplama Levhaları	Desenli Kaplama	Kuvars Dağlama

Geleneksel RIEde silikon ve silikon dioksit arasındaki seçicilik 10: 1 ila 50: 1'dir ve DRIE'de yaklaşık bir büyüklük sırası daha yüksektir. SiO_2 (Silisyum dioksit veya silika) sert maske malzemeleri, RIE veya Islak dağlama (Wet Etching) 'da HF (hydrofluoric acid) ile, CHF_3 (trifluoromethane) kullanılarak kolayca ve seçici bir şekilde dağlama işlemi yapılabilir. Silisyumun oksidasyonu yüksek sıcaklıklı bir adımdır ve SiO_2 (Silisyum dioksit veya silika) kullanımını sınırlar. Chemical Vapor Deposition (CVD) SiO_2 , sert maske malzemeleri, daha düşük sıcaklıklarda biriktirilebilir, fakat kalitesi termal SiO_2 'den daha düşüktür.

Alüminyum; sert maske malzemeleri, mikrofabrikasyon tesislerinde geniş bulunabilirliği ve flor bazlı RIE proseslerinde olağanüstü yüksek seçiciliği nedeniyle iyi bir maske malzemesidir [26]. Cl bazlı kimyasal aşındırma, kullanıldığında alüminyumun plazma aşınması mümkündür, ancak genellikle alüminyum, sert maske malzemeleri, orijinal desenleri genişleten izotropik ıslak dağlama kullanılarak aşındırılır. Islak dağlamadan kaynaklanan ince kamalar yani saplamalar (wedges) plazma tarafından hızla aşınır ve sert maskenin kenarı siperi genişleterek (veya bir sırtın daralması) düzelir. Flor esaslı plazmada, alüminyum bir maskenin mikro pürüzlülüğü ürettiği bilinmektedir. Mikro pürüzlülük, alüminyumun dağlama alanına püskürtülmesi ve yeniden yerleştirilmesi ile başlatılır, burada bir mikro maske olarak işlev görür.

Alüminyum oksit (Al_2O_3) gibi bazı metal oksitler de sert maskeler olarak kullanılabilir. Metal oksit sert maskelerin özellikleri, hem oksidin kimyasal doğasına hem de biriktirme işlemine bağlıdır. Bazı ince metal oksitler, nihai sonucu iyileştiren RIE kullanılarak desenlendirilebilir, ancak çoğu durumda desenlemede ıslak dağlama gerekir. Metal oksidin birikmesi, atomik tabaka biriktirme (ALD, atomic layer deposition) ekipmanı gibi imalat teknolojilerine yönelik özel araçlar da gerektirebilir. Tez kapsamında alüminyum sert maske olarak kullanılmış ve silikon palaka üst yüzeyinde biriktirilmiştir. Biriken alüminyum sert maske üzerine Şekil 2.11 ,2.12 ve Şekil 2.13'te gösterilen maskeler kullanılarak istenilen tasarımın alüminyum üzerine desenlenmesi sağlanmıştır. Desenleme işlemi bittikten sonra silikon plaka aşındırma işlemine hazır hale gelmiştir.

2.2.1.3 Temiz oda

Temiz oda, en sade dille, bir üretim tesisi/ hastane/laboratuvar gibi ortamlar içinde oluşturulan belirli faaliyetlerin gerçekleştirildiği mümkün olan en temiz alanı sağlamak için toz, havadaki mikroplar ve aerosol parçacıkları gibi kirleticilerin filtrelendiği kontrollü bir ortamdır. Temiz odaların başlıca özellikleri şunlardır [22]:

- partikülleri dışarıda tutmak için aşırı vakum (50 Pa);
- filtrelenmiş hava (0.15µm partikül boyutunda %99,9995);
- gelen havanın ısıtılması/soğutulması/nemlendirilmesi/kurutulması;
- çalışma alanlarında laminer hava akışı;
- malzeme uyumluluğu;
- mekanik ve elektriksel karşılıklı etkileşiminin en aza indirilmesi;
- çalışma tezgahlarının kendine ait çalışma prosedürlerinin bulunması.

Bir temiz oda, birim hacimdeki partikül miktarına bağlı olarak farklı kirlilik seviyelerine göre sınıflandırılabilir. Tanıma göre, temiz odanın, kaynağı ne olursa olsun sınırlı sayıda mikropartikül içeren ortam olduğunu gösterir. Çizelge 2.3, sınıflandırmayı daha ayrıntılı olarak açıklamaktadır [80].

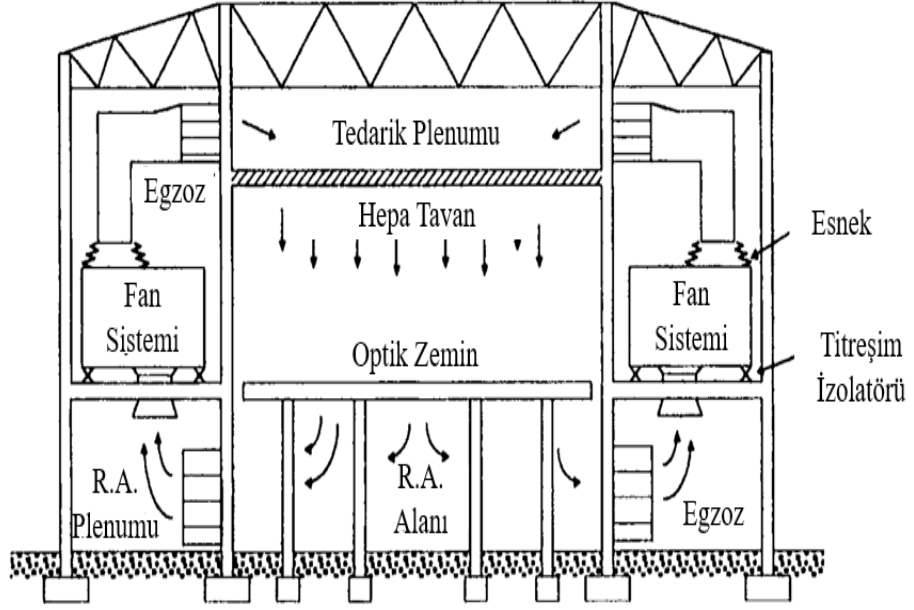
Temiz odalar başlangıçta partikül kontaminasyonunu azaltmak için bir çözümdü (temiz odalar mikro elektronik için değil, hassas mekanik montaj için icat edildi). Daha sonra, litografide daha iyi tekrarlanabilirlik için sıcaklık ve nem kontrolü tanındı [7]. Şekil 2.15'de dikey akışlı temiz oda ele alınmıştır. Temiz odada fanlar, HEPA (Yüksek Verimli Partikül Yakalayıcı) filtre tavanından tek taraflı hava akışı üretir. Hava yüksek

oranda temizlenmiştir ve sıcaklık ve nem kontrollüdür. Binanın geri kalanından izole edilmiş optik zemin, mikrolitografi ve mikroskopi işlemlerini istikrarsızlaştıracak titreşimleri önlemektedir [22], [81].

Çizelge 2.3 : Tipik temiz odalar ve temiz bölgeler için seçilen havadaki partikül temizlik sınıfları [80].

ISO sınıflandırma numarası (N)	Aşağıda gösterilen dikkate alınan boyuta eşit ve daha büyük partiküller için maksimum konsantrasyon limitleri (partikül / m^3 veya hava)					
	0.1 μm	0.2 μm	0.3 μm	0.5 μm	1 μm	5 μm
ISO Sınıf 1	10	2				
ISO Sınıf 2	100	24	10	4		
ISO Sınıf 3	1 000	237	102	35	8	
ISO Sınıf 4	10 000	2 370	1 020	352	83	
ISO Sınıf 5	100 000	23 700	10 200	3 520	832	29
ISO Sınıf 6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
ISO Sınıf 7				352 000	83 200	2 930
ISO Sınıf 8				3 520 000	832 000	29 300
ISO Sınıf 9				35 200 000	8 320 000	293 000

NOT: Ölçüm süreciyle ilgili belirsizlikler, sınıflandırma seviyesinin belirlenmesinde en fazla üç anlamlı rakam içeren konsantrasyon verilerinin kullanılmasını gerektirir.



Şekil 2.15 : Yarı iletken üretiminde sıklıkla kullanılan dikey akışlı temiz oda (R.A = Dönüş Havası) [81].

Tez kapsamında Sabancı Üniversitesi–SUNUM (Sabancı Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi) temiz oda laboratuvarları kullanılmıştır. Şekil 2.16’da Sabancı Üniversitesi–SUNUM (Sabancı Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi) temiz oda genel görüntüsü gösterilmiştir.



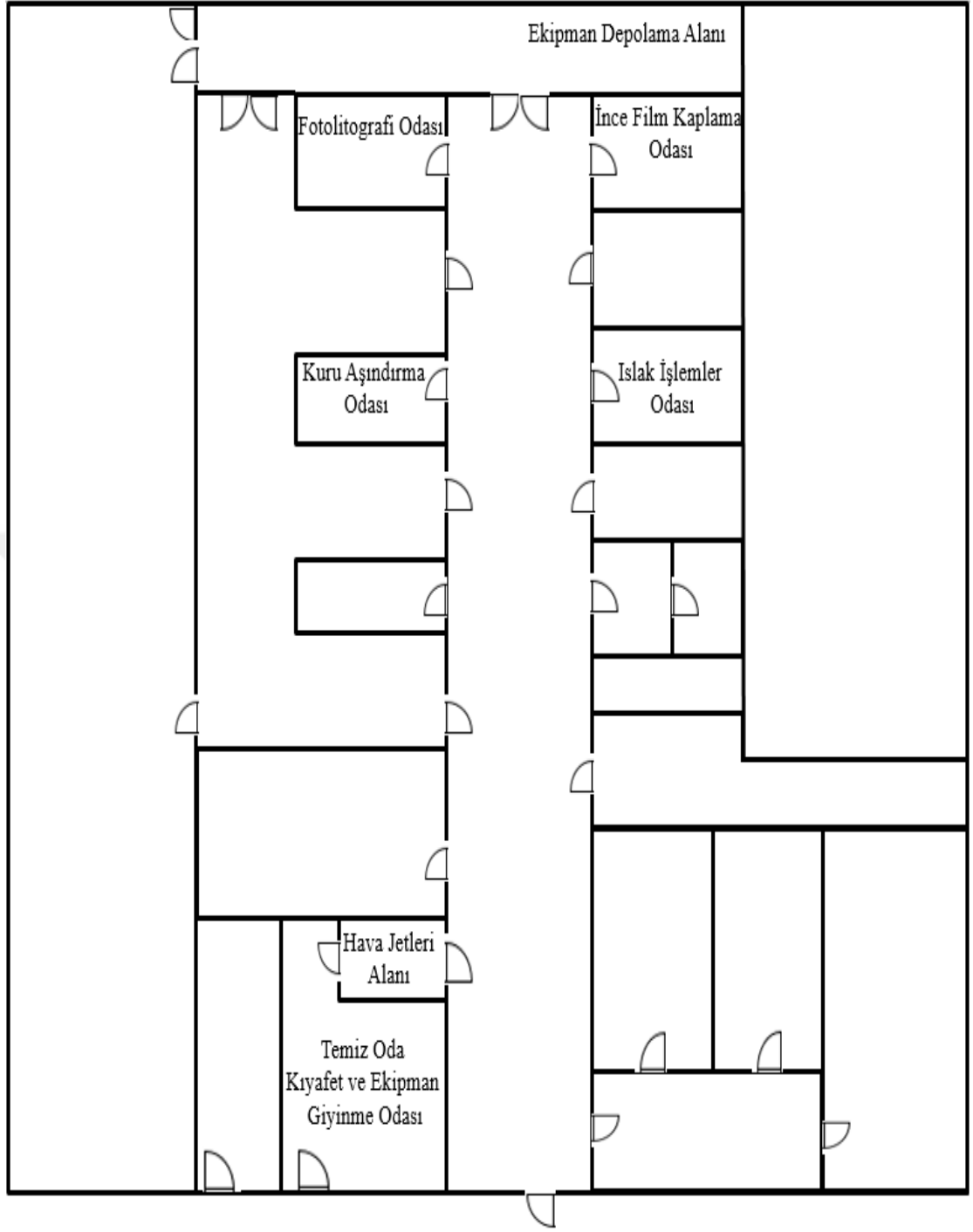
Şekil 2.16 : Sabancı Üniversitesi – SUNUM Temiz oda genel görüntüsü.

Çizelge 2.3 'de gösterilen partikül özelliklerine ek olarak çok sayıda temiz oda özelliği bulunmaktadır (Çizelge 2.4).

Şekil 2.17'de Sabancı Üniversitesi – SUNUM (Sabancı Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi) temiz oda içerisinde tez kapsamında kullanılan alanlar şematik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 2.4 : Tipik temiz odalar ve temiz bölgeler için seçilen havadaki partikül temizlik sınıfları [82].

Tasarım Parametreleri	Kriterler
Temizlik, parçalar/ ft^3	
İşlem alanı $\geq 0.12 \mu m$	≤ 1
Servis alanı $\geq 0.30 \mu m$	≤ 1.00
Sıcaklık kontrol, °C	
Fotolitografi alanı	22 ± 0.1
Diğer temiz oda alanları	22 ± 0.5
Nem kontrol, %	
Fotolitografi alanı	43 ± 2
Diğer temiz oda alanları	43 ± 5
Hava Kalitesi, ppb	
Toplam Hidrokarbonlar (THC)	< 100
NO_x	< 0.5
SO_2	< 0.5
Temiz oda iç yüzey gaz çıkışı oranı, torr-L/ cm^2 /saniye	6.3×10^8
Dış ortama göre temiz oda basıncı, Pa	> 30
Akustik Ses, dB	< 60
Titreşim (8 den 100 Hz), μm /saniye	< 3
Topraklama direnci, Ω	< 1
Manyetik alan değişimi, mG	$< \pm 1$
Şarj voltajı, V	$< \pm 50$



Şekil 2.17 : Sabancı Üniversitesi – SUNUM Temiz oda şematik gösterimi.

Şekil 2.18 'de kullanım amaçlarına göre farklılık gösteren laboratuvarlar gösterilmektedir. Bu alanlar tez kapsamında sıklıkla kullanılan laboratuvarlardır.



Şekil 2.18 : Sabancı Üniversitesi – SUNUM temiz oda içerisindeki kullanım amaçlarına göre farklılık gösteren laboratuvarların temel görüntüsü.

Temiz oda mümkün olan en temiz alanı oluşturulmuş yapıdır. Fakat bu temizlik sadece yapının kendisini ve hava akımlarını içermemektedir, aynı zamanda insanlara yönelik prosedürleri de içermektedir. Öncelikle temiz oda servis alanlarına girmeden önce dış dünyaya göre temiz ancak tek taraflı hava akışı olmayan işlem alanı bulunur. Şekil 2.19 (a) 'da bu alana girmeden önce kullanıcının kullanması zorunlu olan kıyafet ve ekipmanlar gösterilmiştir. Kullanıcı kendi şahsi ayakkabısı üzerine galoş (ayakkabı çevresini ve tabanını saracak şekilde) geçirmek zorundalardır. Bu alana girdikten sonra insanlar temiz odalara artan temizlik aşamalarında girerler: girişte saç bonesi ile saçları tamamen kapanır, yüze takılan maske ile solunum tarafından aktarılacak partiküller engellenmiş olur. Bir sonraki aşama bir temiz oda tulumu ve galoş geçirilen şahsi ayakkabı üstüne temiz oda çizmeleri giyilmektedir. Temizlik sınıfına bağlı olarak, başka koruyucu giysiler eklenir. Şekil 2.19 (b)'da temiz oda içerisindeki çalışma

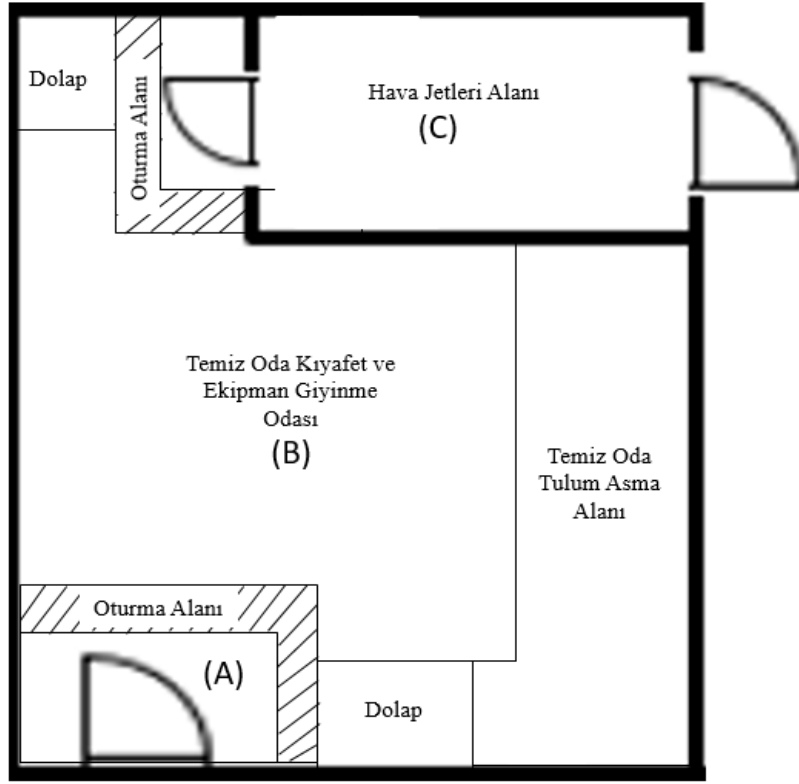
amacına göre kullanılacak ekipmanlara göre kullanması gereken diğer ekipmanlar gösterilmiştir. Bunlar solunum yolunu ile aktarılabilecek partikülleri engelleyen maske üzerine bir yüz maskesi ve ikinci bir başlık katmanı (siper) eklenir. Sonraki aşama olarak giyilen tulum üzerine laboratuvar önlüğü ve son olarak neopren, nitril veya PVC eldivenler kullanılmaktadır.



Şekil 2.19 : (a) Temiz oda servis alanına girmek için kullanılan kıyafet ve ekipmanlar, (b) temiz oda kullanım amacına göre giyilmesi gereken ekipmanlar.

Temiz oda servis alanına girmeden önce değişim alanından üretim alanına kontaminasyonun en aza indirilmesi için ‘hava kilidi’ adı verilen bir alan bulunmaktadır [81]. Bu alanda hava duşları bulunmaktadır. Personel hava duşuna girer ve hava jetleri temiz oda kıyafetleriyle hareket ederek havanın her yüzeye temasını sağlarlar. Bu hava duşu, partikülleri giysilerden çıkarmak ve dolayısıyla temiz odadaki dağılımı azaltmak için tasarlanmıştır. Şekil 2.20’de Sabancı Üniversitesi–SUNUM (Sabancı Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi) temiz oda servis alanına girmeden önce kıyafet ve ekipmanların giyildiği oda şematik olarak gösterilmiştir. (A) noktasından giyinme odasına giriş yapılmaktadır ve bu alanda kişisel ayakkabı üzerine galoş giyilerek ayakkabı tabanı kapatılmaktadır. (B) noktası Şekil 2.19 (a)’da gösterilen kıyafet ve ekipmanların giyildiği alandır. (C) noktası kontaminasyonu en aza indirmek için giyilen kıyafet ve ekipmanlar üzerine hava

püskürten hava jetlerinin bulunduğu alandır. (C) noktasından sonra temiz oda servis alanına giriş yapılmaktadır.



Şekil 2.20 : Sabancı Üniversitesi – SUNUM temiz oda kıyafet ve ekipman giyinme odası şematik gösterimi.

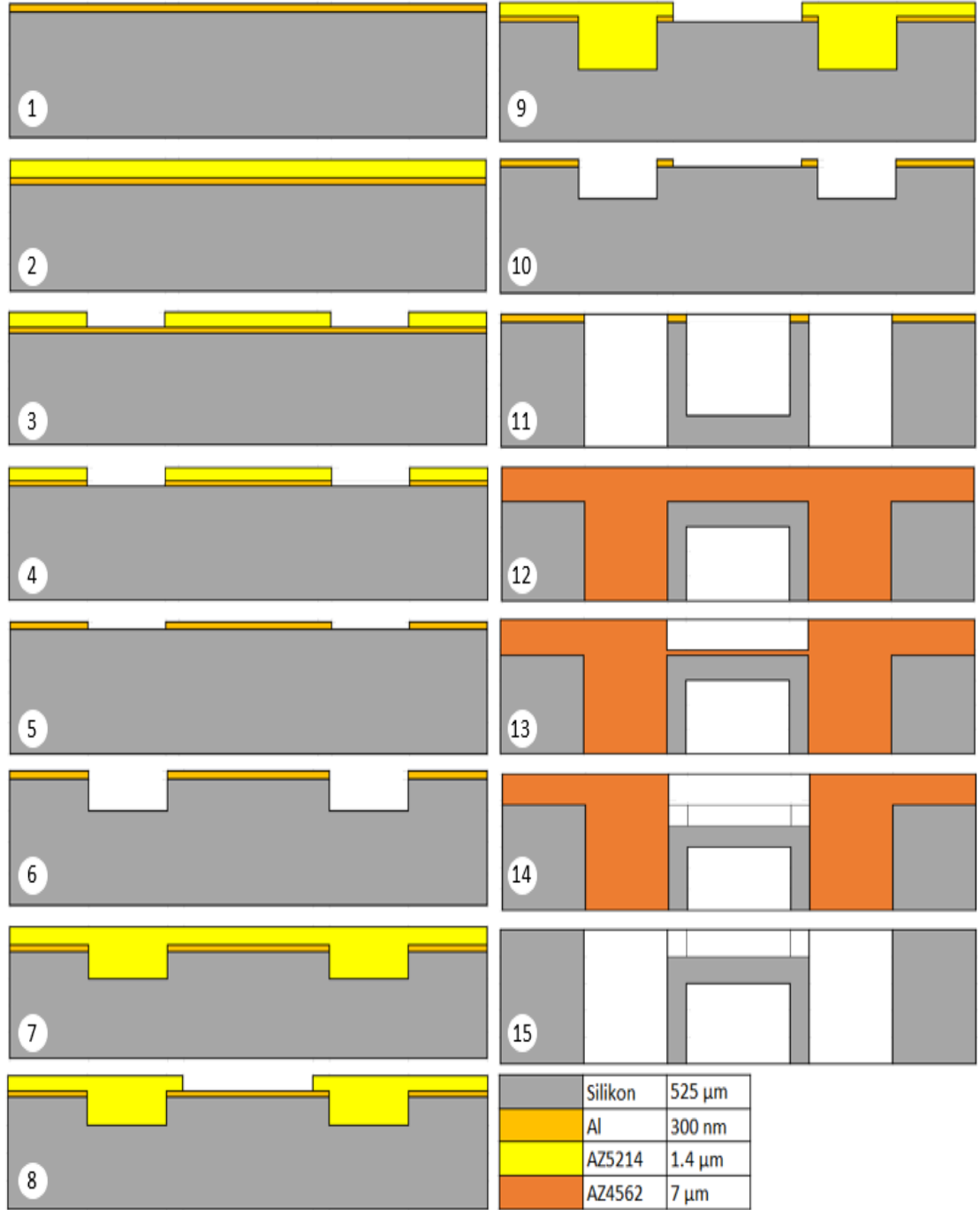
2.2.2 Mikro pompa ve yardımcı ekipman üretimi

2.2.2.1 Silikon plaka (wafer) üretimi

100 mm çapında silikon devre levhası kullanılarak aynı anda iki adet mikro pompa üretimi gerçekleştirilmiştir. Silikon devre levhasının oryantasyonu (100) plaka şeklindedir. Aşındırma işlemi her iki yüzeye de uygulanacağı için Şekil 2.9’da gösterilmiş olan her iki yüzeyi de parlatılmış (Double-Side Polishing – DSP) silikon plaka kullanılmıştır.

Her aşındırma işlemi öncesi yapılması gereken, aşınma gerçekleştirilecek yüzeyin herhangi bir kontaminasyonu engellemek amaçlı basınçlı hava kullanılarak dikkatlice temizlenmesidir. Burada dikkat edilmesi gereken kırılma durumlarını engellemek için silikon plakanın sabitlenerek basınçlı havanın püskürtülmesidir. Bu sebeple silikon plaka, temiz oda mendili üzerinde sabitlenmektedir. Temiz oda mendili (Texwipe,

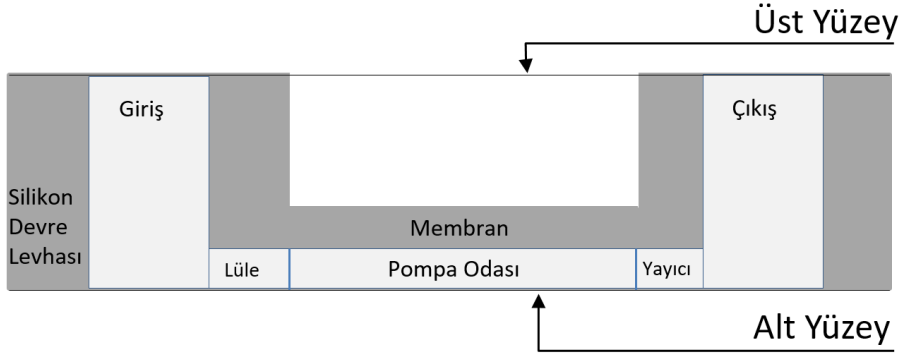
TechniCloth) toz zerresi tutmayan, %55 selüloz ve %45 polyester karışımı içermektedir. Silikon plakanın her iki yüzeyi de aşındırılmıştır. Bu aşındırma işlemlerinde tüm yüzey değil; sadece istenilen tasarımın bölgelerinin aşınması sağlandığı için Şekil 2.11- 13'te gösterilen maskeler kullanılmıştır. Şekil 2.21'de gerekli tüm adımları içeren proses şeması gösterilmiş ve bu onbeş adım tek tek açıklanmıştır.



Şekil 2.21 : Mikro pompa üretim adımlarını içeren proses şeması.

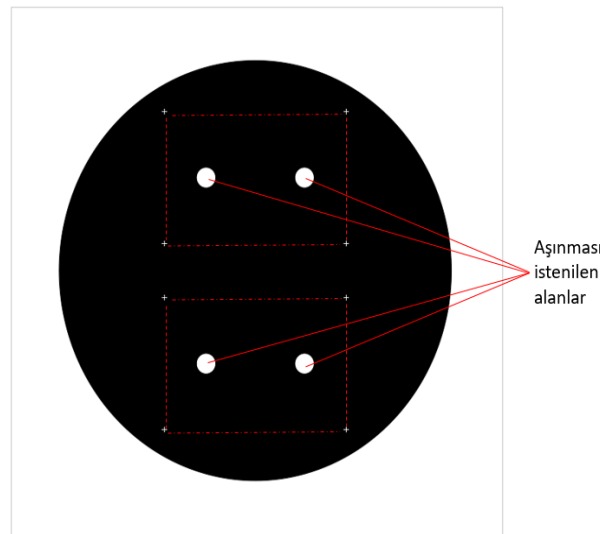
1. Aşama:

İlk adım olarak Şekil 2.22’de gösterilmiş olan silikon plakanın üst yüzeyi kullanılarak pompa odasına akışkan giriş/çıkışını sağlayacak olan kanalların aşındırma işlemi gerçekleştirilmiştir.



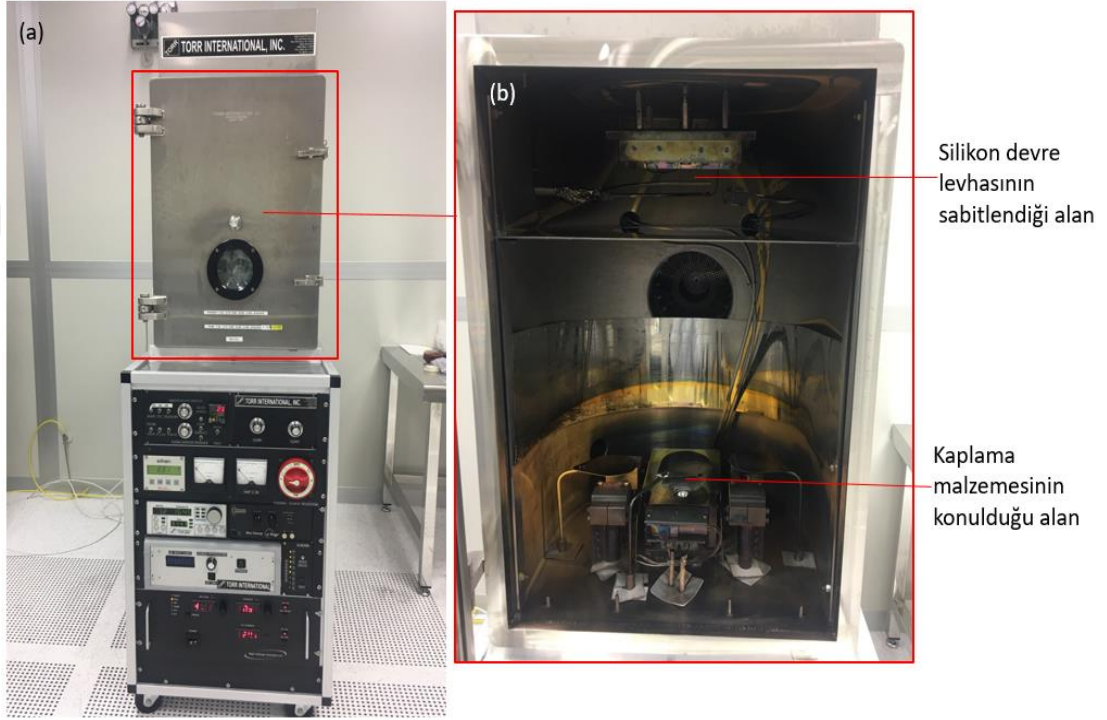
Şekil 2.22 : Silikon plakanın üst/alt yüzey ve bu yüzeylerde aşınma işlemi gerçekleştirilecek alanların gösterimi.

Bu aşınma işlemi içinde Şekil 2.23’de gösterilen maske kullanılmıştır. Şekilden anlaşılacağı üzere yuvarlak form silikon plaka ile aynı çapa sahiptir. Kırmızı şeritli dikdörtgenler silikon plakası üzerinde aynı anda 2 adet mikro pompa tasarımının aşındırma işleminin gerçekleştirileceğini vurgulamaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken şekilde dört adet beyaz yuvarlak alan sadece aşınacak, geriye kalan siyah alan aşınmayacaktır. Bu yüzden bu alanın aşınma işleminden korunması lazımdır. Bu sebeple tüm yüzey 300 nm kalınlığa sahip olacak şekilde e-ışın (e-beam) buharlaştırma yoluyla alüminyum biriktirilmesi sağlanarak bir tabaka elde edilmiştir.



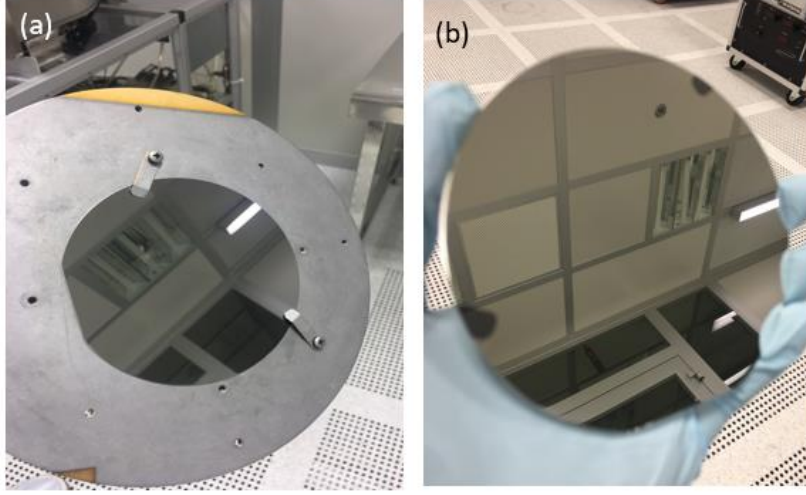
Şekil 2.23 : İlk adımda aşınma işleminin gerçekleştirileceği alanların gösterimi.

Tüm yüzeyin Al ile kaplanması için kullanılan cihaz Şekil 2.24’de gösterilmiştir. Cihazın daha önce kullanımının etkilerini en aza indirmek adına Şekil 2.24 (b)’de gösterilen iç yüzeyi detaylı bir şekilde elektrikli süpürge ile temizlenmekte ve kaplama malzemesi olarak kullanılacak Alüminyum yuvasına konulmaktadır. Temizleme işlemi sonrası silikon plaka Şekil 2.25 (a)’ da gösterildiği gibi sabitleme aparatına sıkıca bağlanmıştır ve Şekil 2.24 (b) de gösterilen konuma sabitlenmesi için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 2.24 : (a) E-ışın buharlaştırma yöntemi ile yüzey kaplama cihazı genel görüntüsü, (b) yüzey kaplamanın yapıldığı iç alan gösterimi.

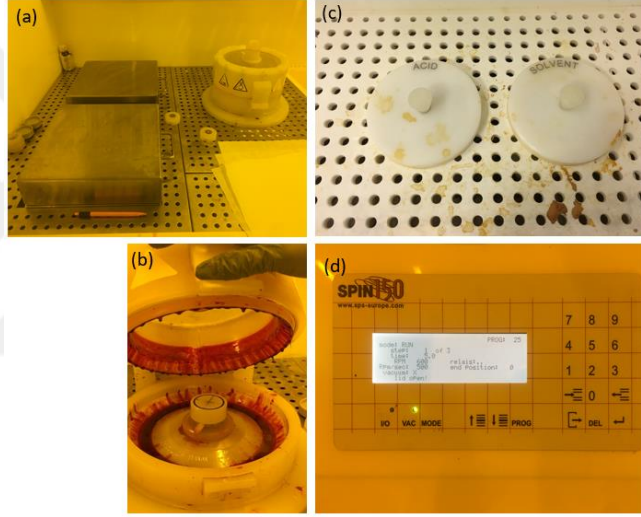
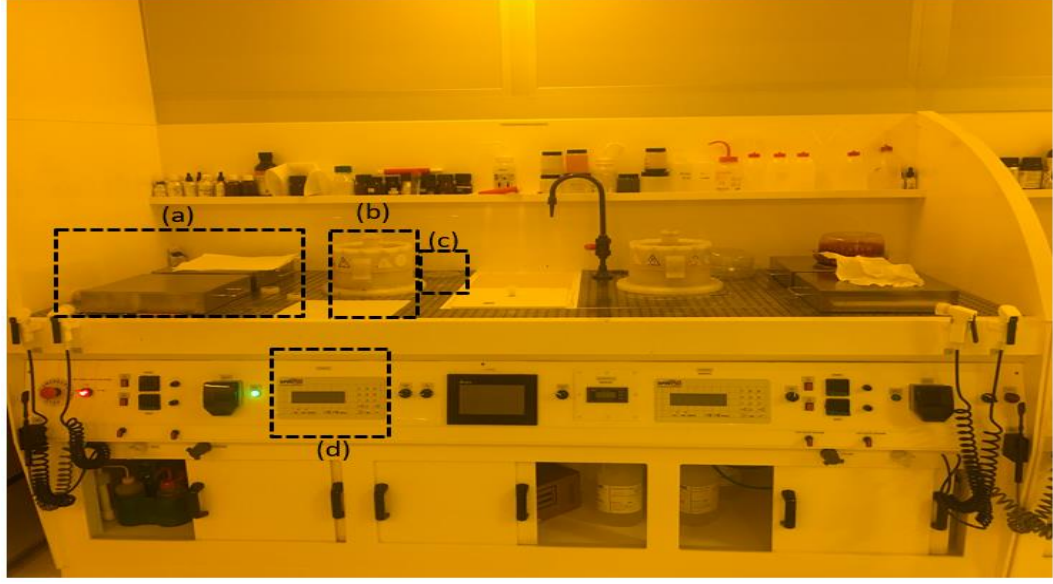
Cihaz içerisinde malzeme ve silikon plaka konulduktan sonra kapak sıkıca kapatılarak yaklaşık 2 saat süren vakumlama işlemi başlatılmıştır. Cihazın kontrol panelinden vakuma alındığı görüldükten sonra, kontrollü bir şekilde akım artırımı yapılarak yüzeye alüminyum kaplama işlemi başlatılmıştır. Kontrol panelinden kaplama miktarı 300 nm olarak okunduğunda işlem sonlandırılarak, cihaz vakumdan çıkartılmıştır ve Şekil 2.25 (b)’de gösterilen yüzey elde edilmiştir.



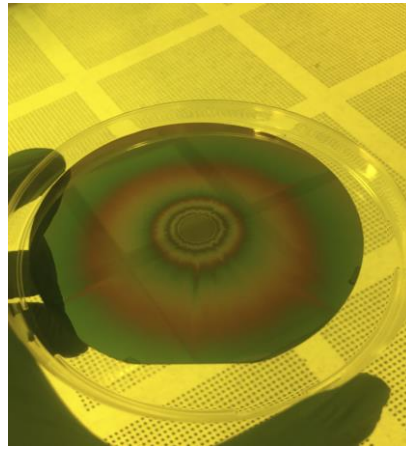
Şekil 2.25 : (a) E-ışın buharlaştırma yöntemi için kullanılacak silikon plakanın sabitleme aparatına bağlanmış şeklinin, (b) e-ışın (e-beam) buharlaştırma yöntemi ile Al ile kaplanan silikon plaka gösterimi.

2. Aşama:

Bu aşamada kullanılan yöntem fotolitografi tekniğidir. Maske üzerinde bulunan desenin silikon plaka üzerine çıkması için uygun yüzeyin oluşturulması işlemidir. Yöntem için Şekil 2.26'da gösterilen tezgah kullanılmaktadır. Öncelikle ocak (Şekil 2.26 (a)) sıcaklığı 110°C değerine ayarlanarak kaplama işlemi yapılırken ocak sıcaklığının istenilen değere ulaşması amaçlanmıştır. Alüminyum ile kaplı silikon plaka döner levha (spinner) (Şekil 2.26 (b)) içerisinde merkezlenmiş ve vakum tuşuna basılarak silikon plakanın dönme zamanında hareket halinde olup kırılması engellenmiştir. Üzerini tamamen kaplayacak şekilde AZ 5214 E dökülmüş, Şekil 2.26 (d)'de gösterilen panelde bir reçete oluşturularak bu döner levhanın (spinner) 450 rpm/s ivme ile 60 saniye boyunca 4000 rpm değerinde çalışması sağlanmıştır. Son olarak, numune ile fotorezist bağını güçlendirmek için, 110°C ocakta 60 saniye bekletilerek, fırınlama (hard bake) işlemi yapılmıştır. İşlem sonrasında Şekil 2.27' de gösterilen maskeleme işlemine hazır, yüzeyi $1.4\ \mu\text{m}$ kalınlıkta AZ5214 E ile kaplı silikon plaka üst yüzey görüntüsü elde edilmiştir.



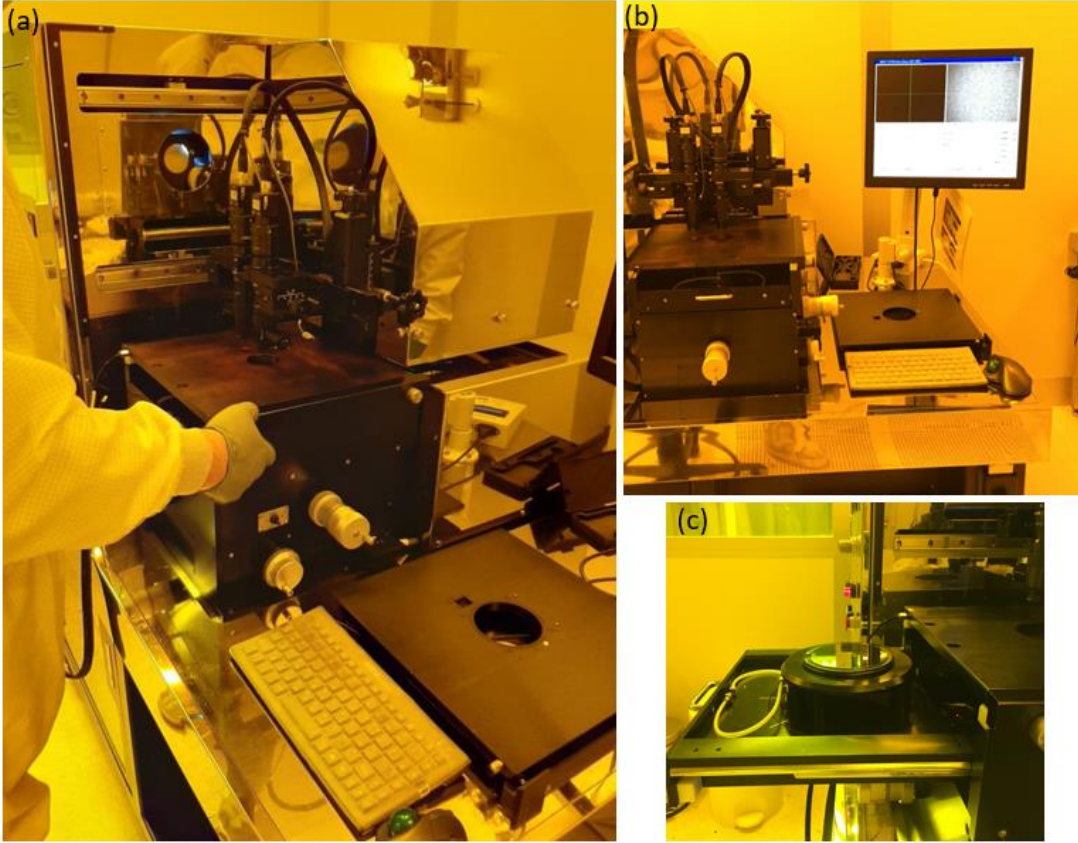
Şekil 2.26 : Fotolitografi çalışma tezgahı ve detay görüntüleri; (a) ön ve arka ocak, (b) döner levha (spinner), (c) atık boşaltım alanı, (d) kontrol paneli gösterimi.



Şekil 2.27 : Fotolitografi tekniği ile AZ 5214 E kaplanmış silikon plaka yüzey görünümü.

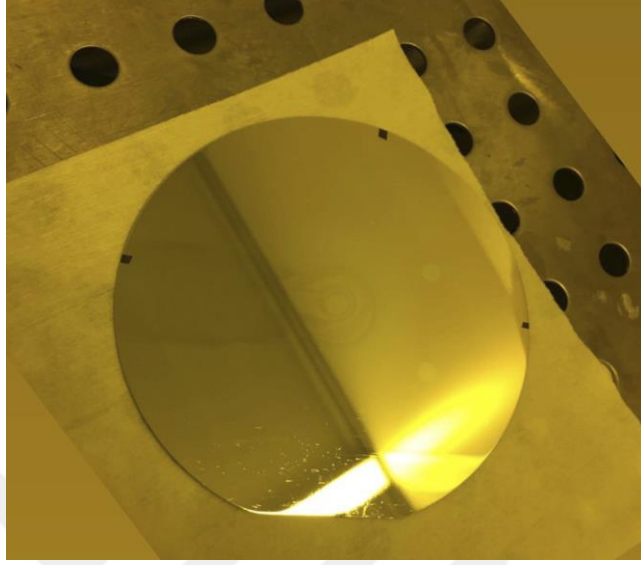
3. Aşama:

Önceden hazırlanmış maske üzerindeki desenin silikon plaka üzerine aktarılması işlemi için ilk adım olarak UV ışığı geçirmeyen levha üzerine Şekil 2.23’de gösterilen maske, silikon plaka da Şekil 2.28 (c)’de gösterilen Maske Hizalayıcı UV-Litografi (Midas System Co., Ltd., Daejeon, Kore, MDA-60MS Mask Aligner 10, 16 cm) cihazının tablasına yerleştirilmiş ve vakum sağlanarak silikon paletin kayması engellenmiştir. Üzerine maske sabitlenmiş UV ışığı geçirmeyen levha tabla Şekil 2.28 (a)’da gösterilen yuvaya yerleştirildikten sonra kontrol paneli (Şekil 2.28 (b)) yardımı ile maske ve silikon plaka arasında eş merkezleme yapılmıştır. UV ışığı aktif hale getirilerek, UV ışığına maruz bırakılan silikon plaka üzerine istenilen desen işlenmiştir.



Şekil 2.28 : (a) Maske Hizalayıcı UV-Litografi cihazı genel görüntüsü, (b) kontrol paneli, (c) silikon plakanın yerleştirildiği alan görüntüsü.

Bu desenin görünür hale gelmesi için silikon plaka, MIF 726 geliştirici (Technic France) ile doldurulmuş, petri kabının içine 40 saniye süreyle konulmuş ve Şekil 2.29 deki görüntü elde edilmiştir.



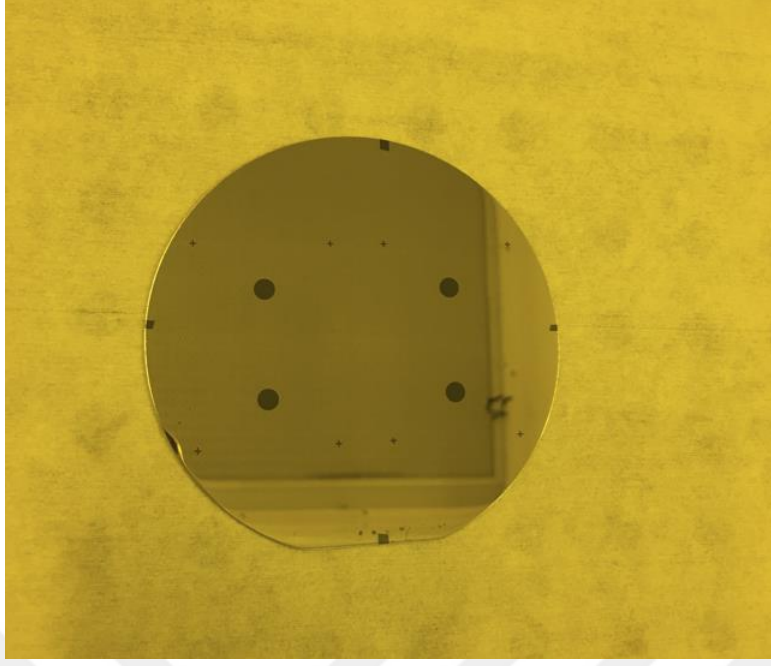
Şekil 2.29 : MIF 726 geliştirici uygulanmış silikon plakada oluşan desen görüntüsü.

4. Aşama:

Şekil 2.29’da gösterilen silikon plaka üzerinde beliren desen ile silikon plaka arasında Şekil 2.21 (1)’de gösterilen 300 nm kalınlığında alüminyum katmanı bulunmaktadır. Bu katman kaldırıldığında silikon plakanın üst yüzeyine ulaşılmış olunacak ve aşındırma işlemi gerçekleştirilebilecektir. Bunun için Şekil 2.26 (a) da gösterilen ocak yüksek 70°C sıcaklığa getirilir ve cam petri kabı içine alüminyum aşındırıcı koyularak, silikon plaka bu petri kabına daldırılır ve petri kabı ocak üzerinde iki dakika ve on saniye boyunca bekletilir. Böylece, desenin çıktığı alanlarda bulunan alüminyum katmanlı yüzeyden aşınmıştır.

5. Aşama:

Silikon plaka üzerinde desenlenen alanlar aşınmaya hazırdır. Desen bulunmayan alanlarda silikon plaka üzerinde sırasıyla 300 nm alüminyum ve sonra 1.4 µm kalınlığında fotorezist (AZ 5214 E) bulunmaktadır. Alüminyum katmanı silikon plaka aşınma zamanında koruyacaktır fakat fotorezistin bir işlevi artık kalmamıştır. Bu sebeple silikon plaka önce aseton dolu petri kabında ve sonrada damıtılmış su ile yıkanarak fotorezisten arınmış ve basınçlı hava ile de kurutularak elde edilmiştir (Şekil 2.30).



Şekil 2.30 : Alüminyum aşındırıcı uygulanmış silikon plakada oluşan desen görüntüsü.

6. Aşama:

Aşınmaya hazır silikon plaka için kuru aşındırma yöntemi (DRIE) kullanılmıştır.. Bu yöntem 1.1.2.1 başlığı altında detaylıca ele alınmıştır.

Kuru aşındırma işlemi Şekil 2.31’de gösterilen cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Şekilde cihaz ve kontrol paneli yan yana konumlandırılmıştır. Silikon plakanın plazma çemberi içine konulması için oluşturulan yuvanın üst detay görüntüsü de şekilde gösterilmiştir. Bu yuvaya konulan silikon plaka sonrası cihaz vakuma alınmış ve raylı sistem eşliğinde numune plazma çemberinin içine gönderilmiştir. Cihaz içine numune yerleştirilmeden önce, daha önce yapılan çalışmalardan kalan gazların temizlenmesi için cihaz boş olarak temizleme programı ile minimum altı saat çalıştırılarak kontaminasyon önlenmiştir.



Şekil 2.31 : Kuru aşındırma yönteminin (DRIE) gerçekleştirildiği cihaz görüntüsü.

Silikon plaka cihaza yerleştirildikten sonra kontrol panelinden ne kadar süre aşındırma sağlanacağı belirlenmektedir. Sürenin belirlenmesi ne kadar derinlikte aşınma sağlanacağı ile orantılı olduğu için bu derinliğin belirlenmesi gerekmektedir. Bu derinliğin belirlenmesinde iki yöntem kullanılmıştır:

- 1) İki aşamalı olan uzun yöntem (aşındırma süresi daha uzun sürer):

İlk aşama olarak, Şekil 2.2’de gösterilen, mikro pompa odasına akışkanın giriş/çıkış kanalının tamamının aşındırılmasıdır. Bu derinlik silikon plakanın toplam kalınlığı olan ($t_{silikon}$) 500 μm kadardır.

İkinci aşama olarak, giriş/çıkış kanalı tamamen aşındırdıktan sonra PZT tetikleyici malzemenin yerleştirileceği yuva için aşındırma işlemi başlatılır ve bu derinlikte 340 μm ’dir.

İki ayrı uzun aşındırma işlemi (500 μm ve 340 μm) sonucunda üst yüzeydeki aşındırma işlemi bitmiş olunur.

- 2) İki aşamalı olan kısa yöntem (aşındırma süresi daha kısa sürer);

İlk aşama olarak, Şekil 2.11’de gösterilen, mikro pompa odasına akışkanın giriş/çıkış kanalının aşındırılmasıdır. Aşındırma miktarı, pompa odası derinliğinin (80 μm) ve membran derinliğinin (80 μm) toplamıdır (160 μm).

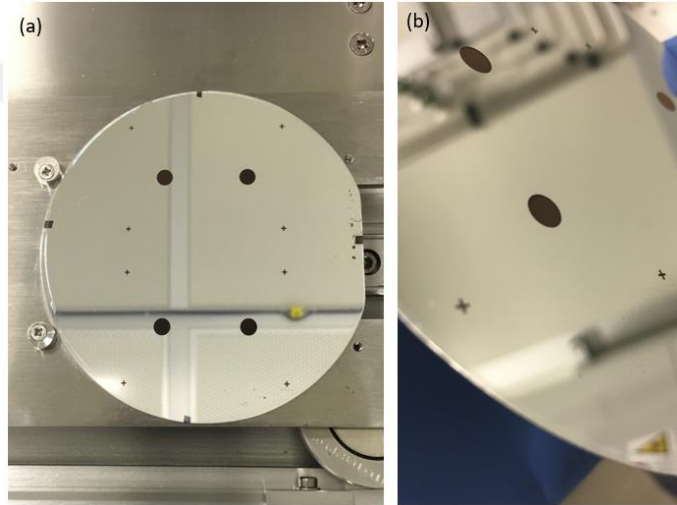
İkinci aşama olarak, giriş/çıkış kanalının bir kısmı (160 μm) aşındırıldıktan sonra, Şekil 2.12 'de gösterilen hem giriş/çıkış kanalını hem de PZT tetikleyici malzemenin yerleştirileceği yuvayı gösteren maske kullanılır ve silikon plakanın sonuna kadar aşındırma işlemi yapılır. Bu işlem sonucu aynı zamanda hem giriş/çıkış kanalı hemde PZT mazleme için kullanılacak yuva için aşındırma işlemi bitmiş olur.

Bu iki yöntem arasında ciddi bir toplam işlem süresi farkı vardır.

Birinci, uzun olan yöntemde aşındırma işlemi sırası ile 500 μm ve 340 μm için yapılmaktadır.

İkinci, kısa olan yöntemde aşındırma işlemi sırası ile 160 μm ve 340 μm için yapılmaktadır.

Tez kapsamında ikinci, kısa olan yöntem yani 160 μm aşınma sağlandıktan sonra PZT tetikleyici malzemin yuvası için (340 μm) aşındırma işlemine geçilmiştir. Bu yöntemle ilerlemekle ciddi süre kazanımları elde edilmiştir.



Şekil 2.32 : Kuru aşındırma yöntemi (DRIE) ile 160 μm aşınan giriş/çıkış kanallarının (a) üst ve (b) yakın detay görüntüsü.

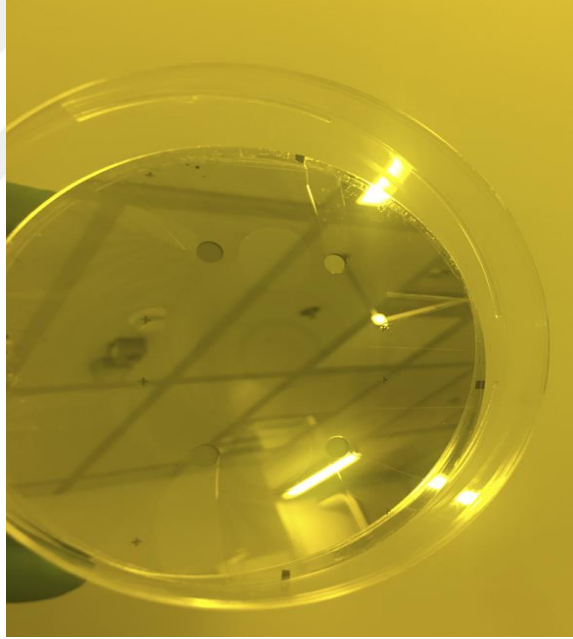
7. Aşama:

Bu aşamada elimizde üst yüzeyi Al ile kaplı ve giriş/çıkış kanalları üzerindeki Al kaldırılarak bu kanallarıda 160 μm kadar aşınmış silikon plaka bulunmaktadır. Amacımız bu giriş/çıkış kanallarının ortasında bulunan ve pompa odası ile eş merkezli olan PZT tetikleyici malzemenin yerleştirileceği yuvanın da aşınmasını başaltmaktır.

Bunun için bu yuvanın ebatlarında silikon plaka üzerine desenleme işlemi yapılmalıdır. Desenleme işlemi için öncelikle tekrar Şekil 2.21 (2)'de belirtilen fotolitografi tekniği uygulanarak silikon plakanın yüzeyi 1,4 µm kalınlıkta AZ5214 E ile kaplanmıştır. Fotorezist malzeme silikon plaka yüzeyinden 1,4 µm kalınlıkta fakat giriş/çıkış kanallarının şimdiye kadar aşındığı 160 µm'nin tamamını doldurmuştur.

8. Aşama:

Üzeri fotorezist (AZ 5214 E) ile kaplı silikon plaka için Maske Hizalayıcı UV-Litografi cihazı ile Şekil 2.21 (3)'de belirtilen adımlar tekrarlanarak PZT tetikleyici malzemenin yerleştirileceği yuvanın deseninin çıkarma işlemi tamamlanmıştır. Bu aşamada maske olarak Şekil 2.12' de gösterilen maske kullanılmıştır. Desenleme işlemi bittiğinde, bu desenin görünür hale gelmesi için silikon plaka, MIF 726 geliştirici (Technic France) ile doldurulmuş petri kabının içine 40 saniye süreyle konular ve Şekil 2.33'deki görüntü elde edilmiştir.



Şekil 2.33 : MIF 726 geliştirici uygulanmış silikon plakada oluşan desen görüntüsü.

9. Aşama:

Şekil 2.33'de gösterilen desen ile aşındırılacak olan silikon plaka arasında Al katmanı bulunmaktadır. Bu Al katmanı kaldırmak için Şekil 2.21 (4)'de belirtilen adımlar tekrarlanarak

Alüminyum aşındırıcı bulunan cam petri kabı içerisine silikon plaka konulur ve 70°C de bulunan ocakta iki dakika ve on saniye boyunca bekletilir ve Al katman silikon plaka üzerinden kaldırılmış olur.

10. Aşama:

Bu aşamada silikon plakanın aşınmasında bir görevi olmayan, sadece desenleme işleminde kullanılan 1,4 µm kalınlığında fotorezist (AZ 5214 E) yüzeyden temizlenmiştir. Şekil 2.21 (5)'de kullanılan adımlar tekrarlanarak aseton ile fotorezist temizlenmiş ve aşınma işlemine hazır bir silikon plaka elde edilmiştir.

11. Aşama:

Giriş /çıkış kanalları 160 µm aşınmış olan ve PZT tetikleyici malzemin yerleştirileceği alanında aşınmaya hazır olan silikon plaka için kuru aşındırma yöntemini (DRIE) yapmaya devam edilmiştir. Bu aşındırma işlemi için Şekil 2.214(6) detaylı şekilde anlatılan aşamaların hepsi tekrarlanmıştır. Aşındırma işlemi hem PZT tetikleyici malzeme yuvası için hem de giriş / çıkış kanalları için 340 µm derinliğe sahiptir ve bu aşınma sonucunda Şekil 2.34 de gösterilen silikon plaka elde edilmiş ve üst yüzey aşındırma işlemi tamamlanmıştır.



Şekil 2.34 : Kuru aşındırma yöntemi (DRIE) ile 340 µm aşınan giriş/çıkış kanalları ve PZT tetikleyici.

12. Aşama:

Silikon plakanın üst yüzeyine PZT tetikleyici malzemesi için aşındırılan yuva derinliği 340 µm derinliğe sahiptir. Bu derinliğin kontrolü şeklide aşınması gerekmektedir.

Amaç; desen dışında kalan alanların aşınmasını engelleyerek silikon plakanın kalınlığının azalmasını engellemektir (Bkz. 2.2.1.2. Maske Tasarımı)

Bu aşamada silikon plakanın alt yüzeyinde bulunan pompa odası, lüle/yayıcı için aşınma işlemine geçilmiştir. Bu bölümlerin eş derinliğe sahip ve 80 µm'dir. Bu değer üst yüzey aşınmasına göre oldukça küçük kalmaktadır. Maske seçimi de buna göre değerlendirilmiş ve maske için AZ 4562 kullanılmıştır. Fotorezist malzemesi (AZ4562) bu aşamada hem maskeleme işlemi için (maskede bulunan desenin silikon plaka alt yüzeyine işlenmesi için); hem de aşınma sırasında aşınmasını istemediğimiz alanların korunması için kullanılmıştır. Şekil 2.21 (2) de detaylı olarak bahsedilen fotolitografi tekniği kullanılarak maske üzerinde bulunan desenin silikon plaka üzerine çıkması için uygun yüzeyin oluşturulması sağlanmıştır. Buradaki tek fark kullanılan fotorezist malzemesi (AZ 4562) ve reçetesidir. Kontrol paneline girilen reçete ile döner levhanın (spinner) 600 rpm/s ivme ile 45 saniye boyunca 4000 rpm'de çalışması sağlanmıştır. Son olarak 115°C derece sıcaklıktaki ocakta 90 saniye bekletilerek, fırınlama (hard bake) işlemi yapılmıştır. İşlem sonrasında maskeleme işlemine hazır, yüzeyi 7 µm kalınlıkta AZ 4562 ile kaplı, silikon plakanın alt üzeyi elde edilmiştir.

13. Aşama:

Fotorezist ile kaplı ve desenleme işlemine hazır silikon plaka Şekil 2.28'de gösterilen Maske Hizalayıcı UV-Litografi cihazının silikon plakanın yerleştirildiği alana koyulmuş ve sistem vakuma alınarak sabitlenmiştir. Şekil 2.13'de gösterilen ve pompa odası, lüle/yayıcı desenini içeren asetat maske de cihaza Şekil 2.21 (3)'de anlatıldığı gibi yerleştirilerek UV ışığına maruz bırakılmış ve istenilen desenin silikon plakanın alt yüzeyine işlenmesi sağlanmıştır.

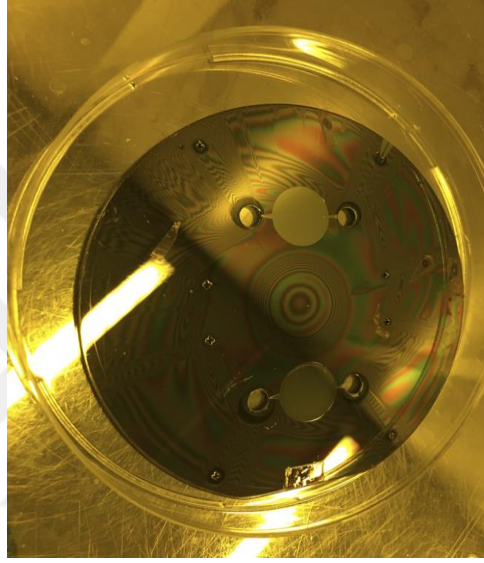
Bu desenin görünür hale gelmesi için silikon plaka, AZ 400 K geliştirici (Merck Performance, Microchemicals GmbH) ve 1:3 oranında deiyonize (DI) sudan oluşan karışık çözelti içine, maruz kalan alanı çıkarmak için 2 dakika süreyle daldırılmıştır.

Silikon plakanın üst yüzeyinde uygulanan fotorezist (AZ 5214 E) kuru aşındırma yöntemine (DRIE) başlamadan önce yüzeyden temizlenmiştir. Çünkü; yüzeyde bulunan 300 nm kalınlığa sahip alüminyum katman sert maske olarak kullanıldığı için fotoreziste gerek kalmamıştır. Bu aşamada ise herhangi bir sert maske kullanılmadığı için fotorezist kuruaşındırma yöntemi (DRIE)süresince koruyucu katman olarak

kullanılmıştır. Bu sebeple numune ile fotorezist arası bağın güçlenmesi için silikon plaka 110 °C'de 5 dakika boyunca fırınlanmıştır.

14. Aşama:

Silikon plakanın alt yüzeyine desenlenen pompa odası, lüle ve yayıcının aşınması için Şekil 2.31'de gösterilen kuru aşındırma yöntemi (DRIE) cihazı içine yerleştirilen numune sonrası cihaz vakuma alınarak aşındırma işlemi başlatılmıştır. DRIE işlemi, silikon plaka üzerine 80 µm ölçüsünde bir derinlik aşındırıcaya kadar devam ettirilmiştir (Şekil 2.35).



Şekil 2.35 : Aşındırma işlemi bitmiş, üzeri fotorezist (AZ 4562) ile kaplı silikon plakanın alt yüzey görüntüsü.

15. Aşama:

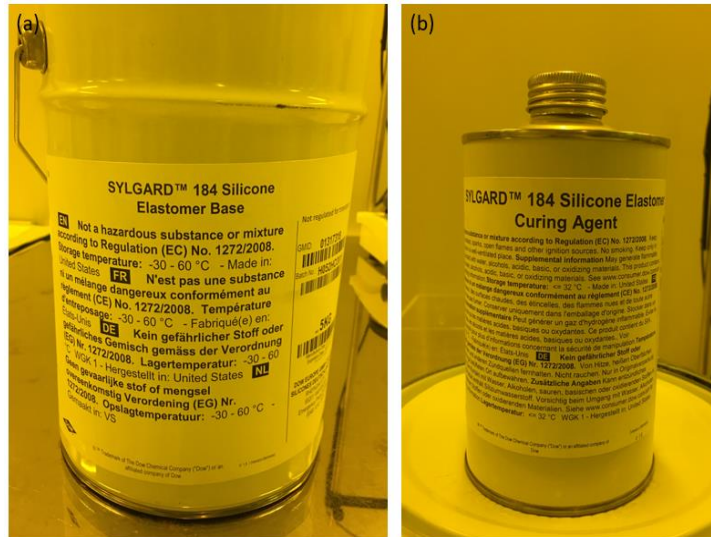
Aşındırma işlemi biten silikon plaka üzerinde fotorezistin işlevi bittiği için fotorezistin temizlenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple silikon plaka önce aseton dolu petri kabında ve sonrada Ddamıtılmış su ile yıkanarak fotorezisten arınmış ve basınçlı hava ile de kurutulmuştur. Kurutulan silikon plaka tasarımında hesaplanan dikdörtgen formlara getirilmiş ve Şekil 2.36'da gösterilmiştir.



Şekil 2.36 : Fotorezisti temizlenmiş ve tasarım ebatlarına getirilmiş silikon plakanın alt yüzey görüntüsü.

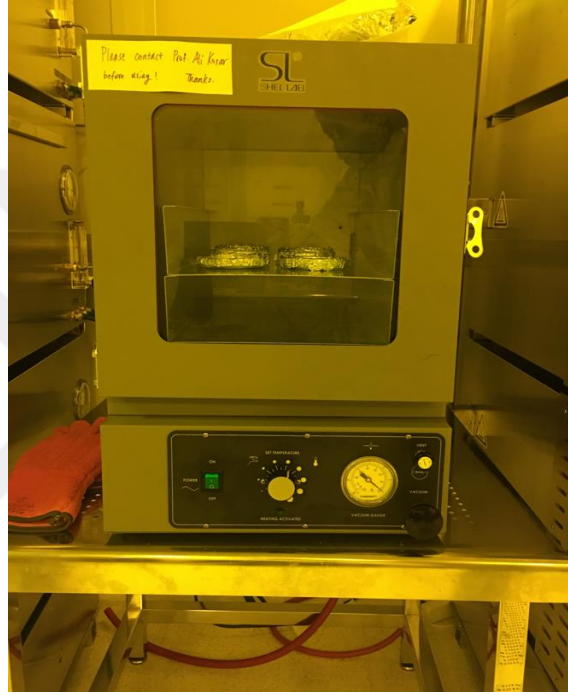
2.2.2.2 PDMS (Polidimetilsiloksan) üretimi

Sızdırmazlık elemanı olarak kullanılacak olan PDMS üretimi için gerekli üretim aşamaları için Guichard M. ve arkadaşlarının 2020 yılında yaptıkları çalışmalar kullanılmıştır [83]. Bu çalışma eşliğinde PDMS prepolimeri (silikon elastomer bazını) ve sertleştirme maddesini, bir petri kabı içinde 10:1 oranında (örn., 10 g baz + 1 g sertleştirme maddesi) karıştırıldı. Tez kapsamında kullanılan PDMS baz ve sertleştirici malzeme (Sylgard 184, The Dow Chemical Company) Şekil 2.37’de gösterilmiştir.



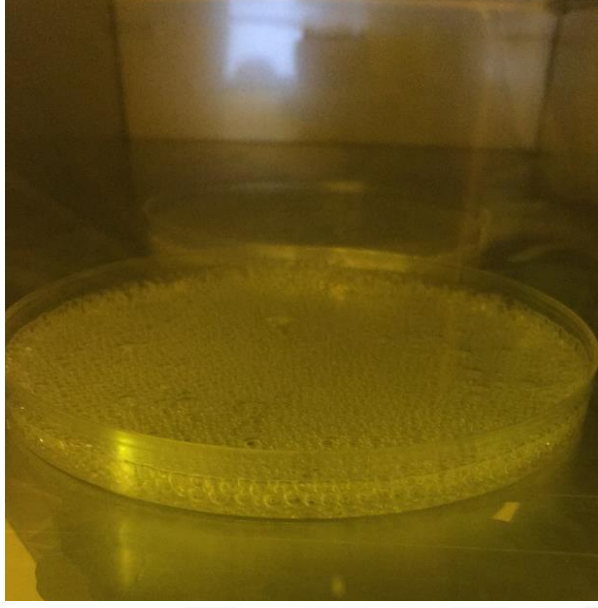
Şekil 2.37 : PDMS üretimi için kullanılan (a) silikon elastomer baz ve (b) sertleştirici malzeme.

Silikon plaka üst yüzeyi ve alt yüzeyi için iki ayrı kalınlıkta PDMS üretimi sağlanmıştır. Silikon elastomer baz ve sertleştirici malzeme karışımının döküleceği kap olarak silikon plaka ile aynı çaba sahip petri kabı kullanılmıştır. Silikon plakanın üst yüzeyi için 40 gr baz ve 4 gr sertleştirici kullanılarak karışım 4 dakika kadar karıştırılmıştır. Burada önemli olan sertleştirici malzemenin her yere eşit bir şekilde karışması ve homojen bir yapı elde edilmesidir. Karışım vakum altında gazdan arındırılması için Şekil 2.38’de gösterilen vakumlu fırın (Sheldon Manufacturing, Inc., Cornelius, OR, USA) kullanılmıştır.



Şekil 2.38 : PDMS üretimi için kullanılan vakumlu fırın ön görüntüsü.

Burada dikkat edilecek nokta cihaz içinde vakum uygularken, PDMS karışımı konulan kap eğer çok fazla doldurulmuş ise taşma yapabileceğidir, çünkü vakum altında karışım köpük üretecektir. Tez kapsamında vakum altında bekletilen karışımın ürettiği köpük görüntüsü Şekil 2.39’da gösterilmiştir.



Şekil 2.39 : Vakum altında köpük üreten PDMS karışım görüntüsü.

Petri kabı içinde köpük tamamen söndüğünde, karışım homojen bir hale geldiğinde, vakum kapatılarak, sertleştirme işlemi başlatılmıştır. Sertleştirme işlemi için cihazın sıcaklığı 70°C değerine getirilir ve en az 4 saat cihaz içinde sertleşmesi sağlanır. Çıkarılan petri kapları oda sıcaklığında soğumaya bırakılır ve kürlenmiş PDMS bir spatula yardımı ile petri kabından çıkartılır. Çeşitli kalınlıklarda (1000 μm -160 μm) üretilen homojen PDMS'ler Şekil 2.40'ta gösterilmiştir.



Şekil 2.40 : Tez kapsamında üretilen homojen PDMS görüntüsü.

2.3 Sistem Kurulumu ve Çalışma İlkeleri

2.3.1 Mikro pompa sistem kurulumu

Tez kapsamında, tezin ana hattı diyeceğimiz olguyu, silikon plaka üzerine mikro düzey bir pompanın aşındırma yöntemleri kullanılarak üretilmesi oluşturmaktadır. O yüzden tez kapsamında bahsedilen, mikro pompa sistemi; silikon plaka ve yardımcı ekipmanları olarak düşünülebilir. Yardımcı ekipmanlar; PDMS, PZT tetikleyici malzeme ve cam lamel olarak ele alınmaktadır. Tezin ana hattı olarak düşünülen silikon plaka üzerine işlenmiş mikro düzey bir pompa ve yardımcı ekipmanlardan PDMS tez kapsamı dahilinde üretimi yapılmaktadır ve Bölüm 2.2.2 altında detaylı olarak ele alınmıştır.

Yardımcı ekipmanlardan PZT tetikleyici malzeme ve cam lamel tedarik edilmiştir.

Kuru aşındırma yöntemi kullanılarak silikon plaka üzerine aşındırılan mikro düzey pompanın çalışır bir sistem düzeneği haline getirilerek için literatürde çeşitli yöntemler kullanılmıştır. İlk yöntem; Cui Q. ve arkadaşları 2006 yılında gerçekleştirildiği çalışmada ele alınmıştır. Şekil 2.1(b)'de gösterildiği gibi silikon plakanın alt yüzeyi (pompa odası, lüle ve yayıcının bulunduğu yüzey) cam yapı ile anodik bağ kurularak birleştirilmiştir [8]. İkinci kullanılan yöntem; Guan ve arkadaşlarının 2020 yılında yaptıkları çalışmada sandviç metodu kullanmışlardır. Bunun için ortada silikon plaka, silikon plakanın alt ve üst yüzeylerine sızdırmazlık sağlaması için PDM ve bu PDMS lerin üstüne iki rijit yapı koyulmuş ve bu rijit yapılar vidalar yardımı ile birbirine bağlanmış ve sıkıştırılmıştır. Sadviç metodu Şekil 2.2(a) da detaylı olarak gösterilmiştir [9]. Diğer bir yöntem ise tez kapsamında da kullanılan PDMS malzemenin oksijen plazma uygulaması ile birleştirilme yöntemidir.

Borok A. ve arkadaşları 2021 yılında yaptıkları çalışmada oksijen plazma yöntemi incelemişler ve plazma tedavisi, PDMS yüzey modifikasyonu için açık ara en yaygın kullanılan yöntemdir olduğunu vurgulamışlardır [84]. Ayrıca yapılan bu çalışmada, PDMS bağlanması için silanol açısından zengin bir yüzey oluşturmak için düşük-orta vakum aralığındaki basınçlarla oksijen plazması kullanılmıştır. Gaz içeriği ve basıncın yanı sıra, diğer iki ana işlem parametresi, başarılı bağlanma için optimize edilmesi gereken plazma gücü ve maruz kalma süresi olduğunu vurgulamışlardır. Plazma tedavisinin önemli bir avantajı olarak, ortak bir plazma odası (reaktör) ile bu koşulların

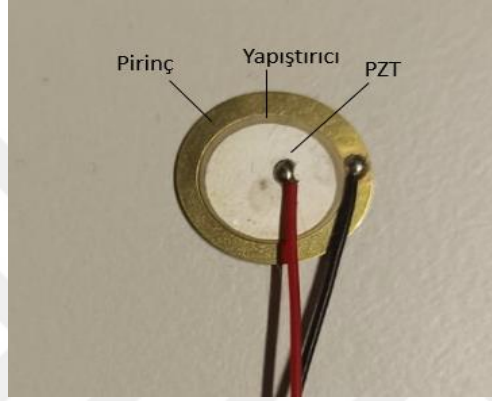
hassas bir şekilde ayarlanabilmesi ve hassas bir şekilde kontrol edilebilmesi, böylece tekrarlanabilir sonuçlar ve genel olarak daha iyi bağ kalitesi sağlaması olduğu sonucunu çıkarmışlardır. Oksijen plazma uygulamasını ele alan diğer bir çalışmada [85] yüzeyler arasında kovalent bağ kurularak, yüzeyin hidrofilik hale getirildiğini bahsetmiştir. Hidrofilik hale gelen yüzeylerin, atmosfere maruz kaldıklarında hızla hidrofobik eğilimlerine geri döndüğünü açıklamıştır. Ayrıca oksijen plazması tekniği ile bağlama uygulaması imalat sürecine önemli miktarda maliyet ve zaman avantajı sağladığını vurgulamıştır.

Şekil 2.2’de gösterildiği üzere silikon plaka üst yüzeyine PDMS eklenmesi ve PDMS-silikon bağı oksijen plazma ile birleştirme yöntemi kullanılmıştır. Bu birleştirme yöntemi için Sabancı Üniversitesi/Sunum binası içerisinde yer alan oksijen plazma cihazı (Harrick Plasma Cleaner, Ithaca, NY, ABD) kullanılmıştır. Oksijen plazma cihazında PDMS-silikon veya PDMS-cam’ın plazma aktivasyonu için aynı reçete kullanılmıştır. Proses gazı olarak oksijen (O_2), basınç için 200 mTorr - 1 Torr, 20W RF-gücü ve işlem süresi için 15-60 saniye kullanılmıştır. Bağlanması istenilen yüzeyler cihaz içerisine koyulmadan önce yüzey temizliği yapılarak yerleştirilmiştir. Ayrıca reçete bitip cihazdan çıkartılan yüzeyler için bağ kuvveti temiz ve etkin olması önemlidir. Bu sebeple yüzeylerin birbirine teması hızlı bir şekilde yapılarak kontamine olması engellenir ve ayrıca yaklaşık 30 saniye kadar üzerine basınç uygulanır. Bu adımlar, aşağıdaki üç işlem içinde tekrarlanmıştır.

- PDMS – silikon plaka üst yüzeyi arasında,
Böylelikle silikon plaka üst yüzeyine PDMS (oksijen plazma uygulanmadan önce Şekil 2.12’de gösterildiği üzere akışkan giriş/çıkış kanalı ve PZT tetikleyici malzeme yuvası için PDMS üzerinden daire şeklinde alanlar kesilmiştir) bağlama işlemi gerçekleşmiştir.
- Aynı silikon plaka alt yüzeyi – PDMS arasında,
Böylelikle silikon plakanın her iki yüzeyine de PDMS bağlanmıştır.
- Aynı silikon plakanın alt yüzeyine bağlanan PDMS – cam lamel arasında.

Kuru aşındırma yöntemi kullanılarak silikon plaka üzerine aşındırılan mikro düzey pompanın çalışır bir sistem düzeneği haline getirek için son adım olarak PZT tetikleyici malzemenin membran üzerine sabitlenmesi gerçekleştirilmiştir.

Üretilen mikro düzey pompadaki önemli bir detay valf içermemesi ve basınç farkı oluşturarak akışkanın girişten çıkışa doğru hareket etmesidir. Pompa odasında bu basınç farkı oluşumunu membranın aşağı yukarı hareket etmesi ile sağlanmaktadır. Membran hareketi içinde tetkleyici malzeme olarak PZT kullanılmıştır. Tez kapsamında KYOCERA PZT kullanıldı. Şekil 2.41’de gösterildiği üzere PZT üç unsurdan oluşur: bir PZT piezoelektrik katman, bir bağlantı katmanı (tutkal) ve bir pirinç disk. Pirinç diskin dış çapı $15 \pm 0,1$ mm, seramik diskin çapı ise $12 \pm 0,3$ mm'dir. Pirinç disk ve toplam kalınlık sırasıyla $0,2 \pm 0,03$ mm ve $0,42 \pm 0,1$ mm'dir. Son olarak, rezonans empedans değeri 600 ohm'dur ve kapasitans değeri $8.000 \pm \%30$ pF'dir

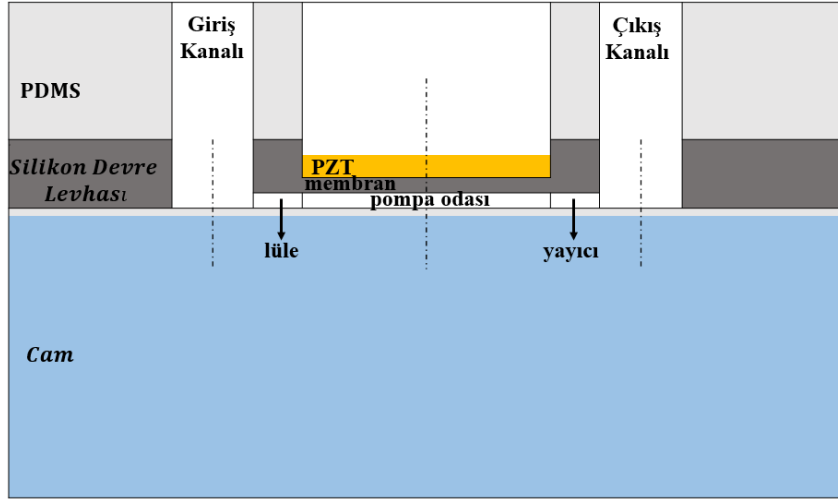


Şekil 2.41 : Piezoelektrik dönüştürücü (PZT) aktüatör görüntüsü.

Şekil 2.41’de gösterilen PZT tetkleyici malzeme silikon plaka üst yüzeyi üzerinde bulunan membran üzerine ince bir iletken epoksi tabakası kullanılarak bağlanmıştır. Böylelikle mikro pompa sistem kurulumu tamamlanmıştır.

2.3.2 Üretilen mikro pompa sisteminin çalışma prensibi

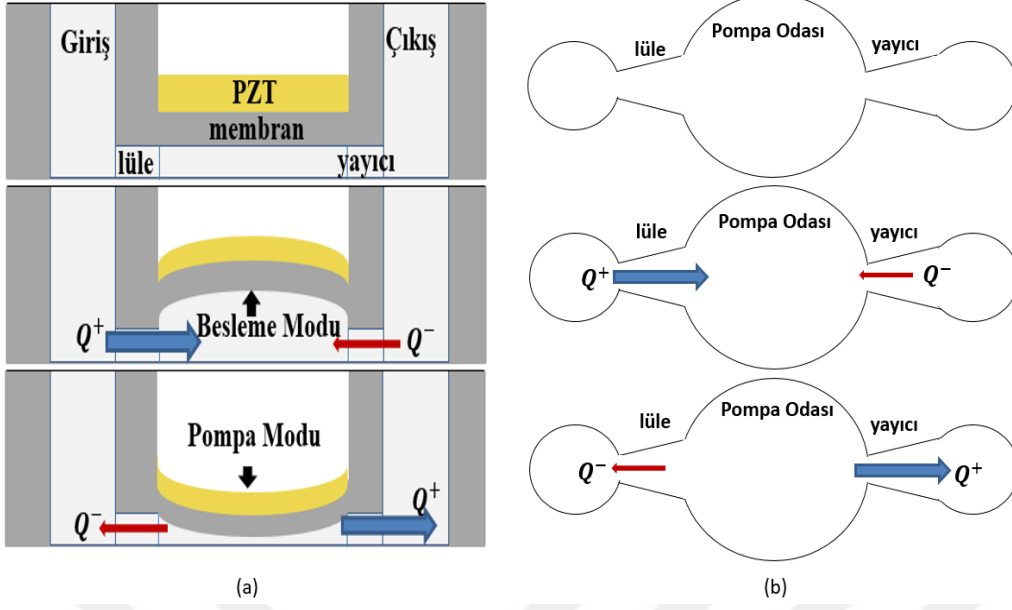
Tez Tez kapsamında üretilen mikro düzey pompa dört temel alandan oluşmaktadır. Bunlar, Şekil 2.42’de görüldüğü gibi pompa odası, lüle/yayıcı, piezoelektrik dönüştürücü (PZT), giriş/çıkış kanallarıdır.



Şekil 2.42 : PZT ile çalıştırılan valfsiz mikro pompanın şematik görüntüsü.

Mikro pompanın çalışması PZT tetikleme malzemesine uygulanan bir elektrik alanı ile başlamaktadır. PZT tetikleme malzemesinde üretilen gerilim, bağlı olduğu membranın da kendisi ile birlikte hareket ederek genişlemesine veya büzülmesine neden olarak mikro pompanın harekete geçmesine neden olur. Bu hareket, membranın bükülmesine (yukarı/aşağı) neden olur ve bu da bir döngüye yol açar. Tipik bir çevrimin iki modu vardır: besleme (emme) ve pompa modu (sıkıştırma) [61], [86]. Her iki mod için de Şekil 2.43 (a)'da membran hareketi, pompa odası içine akışkan hareketi de Şekil 2.43 (b)'de gösterilmiştir.

Şekil 2. 43 (a)'da gösterildiği üzere, besleme (emme) modunda membran yukarı doğru hareket eder. Bu hareket, pompa odasının içinde negatif bir basınç neden olur. Pompa haznesindeki negatif basınç, giriş bölgesindeki akışkanı kendine doğru çekerek akışkanın pompa haznesini doldurmasını sağlar. Besleme (emme) modu durumunda pompa odasının üst görüntüsünde (Şekil 2.43 (b)) bu ağırlıklı olarak (Q^+ ve mavi ok ile gösterilmiştir) lüleden pompa odasına doğru bir akış gerçekleşmektedir. Şekil 2. 43 (a)'da gösterildiği üzere pompa modu (sıkıştırma) esnasında membran aşağı doğru hareket eder ve bu da pompa odası içindeki basıncın artmasına neden olur. Pompa haznesindeki pozitif basınç, pompa içindeki akışkanı yayıcı aracılığı ile çıkış kanalına doğru iterek akışkanın tahliyesini sağlar. Besleme (emme) ve pompa modu (sıkıştırma) esnasında sadece lüle veya sadece yayıcı kanalında akışkan hareketi gözlemlenmez, her iki kanalda da akışkan hareketi olur. Önemli olan ağırlıklı olarak akışkanın hangi yönde hareket ettiğidir. Bu sebeple, ağırlıklı akışkan hareketi (Q^+ ve mavi ok ile gösterilirken, zayıf akışkan hareketi için (Q^- ve kırmızı ok kullanılmıştır.

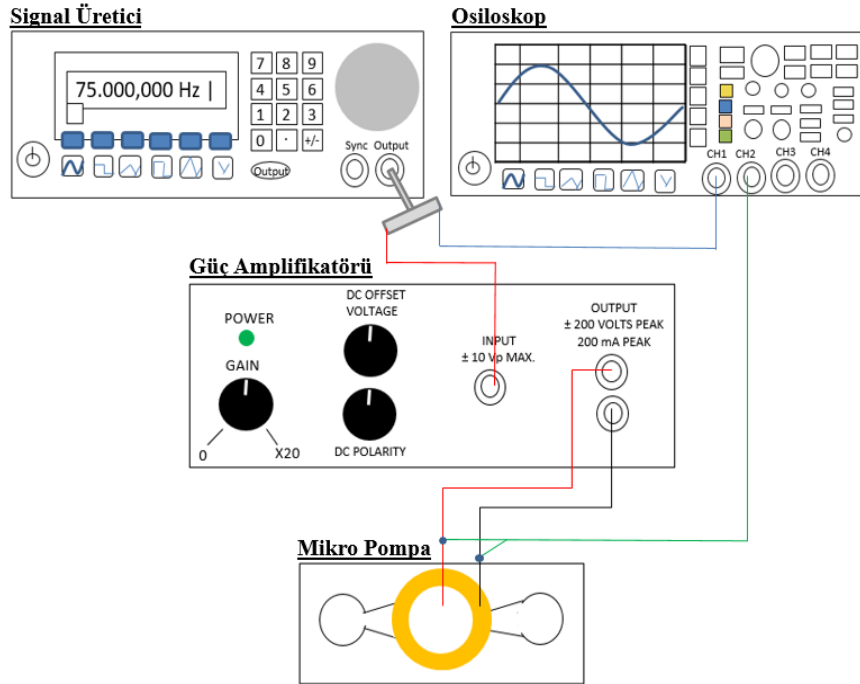


Şekil 2.43 : Valfsiz bir mikro pompanın çalışma prensibi; (a) mikro pompa sisteminin enine kesit görünümü, (b) mikro pompanın üstten görünümü.

3. DENEYSSEL KURULUM VE İLKELER

3.1 Deneysel Ekipman Kurulumu

Deney düzeneği için gerekli ekipmanların başında mikropompanın voltajını sağlamak için bir sinyal üretici (Agilent 33220A) gerekmektedir. Bu voltaj, piezoelektrik mikro pompayı çalıştırmak için bir güç amplifikatörü (Piezo Systems, INC. Model EPA-104) tarafından büyütülmesi gerekmektedir. Ayrıca piezoelektrik tetikleyici malzemenin sürüş sinyalini gözlemlemek ve ölçmek için osiloskop (Tektronix, TDS3034B) kullanıldı. Deney çıktısı olarak debi değeri kullanılması planlanmıştır. Bu sebeple ortalama debi değeri elde etmek için zaman aralığını ayarlamak gerekti ve bu yüzden bir kronometre kullanılmıştır. Son olarak mikro pompa çıkış kanalı bölgesinde biriken sıvı miktarını ölçmek için çeşitli hacim değerlerine sahip mikropipetler kullanılmıştır. Şekil 3.1’ de deneysel ekipmanlar ve bunların birbiri ile bağlantısı gösterilmiştir. Sinyal üretici cihazının “çıkıtısının” bir ucu osiloskopa bağlanarak üretilen sinyali görmemiz sağlanırken, bir ucu da güç amplifikatörünün “giriş” kanalına bağlanmıştır çünkü voltaj güç amplifikatörü tarafından büyütülmektedir. PZT tetikleyici malzeme de güç amplifikatörünün “çıkıtı” kanalına bağlanarak deney düzeneği ekipman bağlantıları sağlanmıştır.



Şekil 3.1 : Deney düzeneğinin şeması.

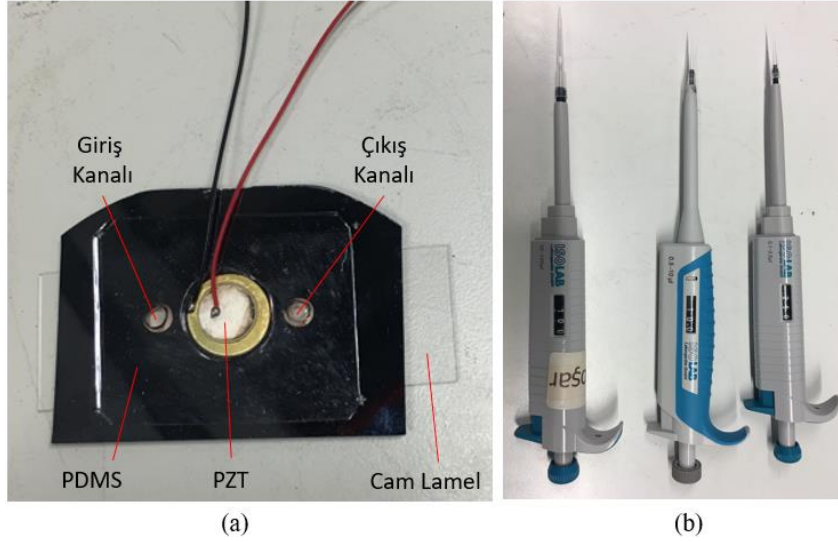
3.2 Deney İlkeleri

Deneylere başlamadan önce yapılan literatür incelemesinde ana çalışma sıvısı olarak damıtılmış su, metanol (ISOLAB) ve etanol (ISOLAB) kullanıldığı görülmüştür [87]. Tez kapsamında yapılan deney sonuçlarının literatürle uyumlu olması ve kıyaslanabilmesi adına tez kapsamında da aynı çalışma sıvıları olarak bu üç akışkan seçilmiştir. Kullanılan akışkaların yoğunluk ve kinematik viskozite değerleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Çalışma sıvılarının özelliklerinin listesi [87].

Çalışma Sıvısı	Yoğunluk (kg/m^3)	Kinematik Viskozite ($\text{m}^2/\text{s}) \times 10^6$
Damıtılmış Su	997.0	1.04
Metanol	791.8	0.75
Etanol	790.0	1.52

Mikro pompa sisteminin üstten görünümünde giriş ve çıkış kanalları Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Cam lamel silikon plakanın alt yüzeyinde bulunmaktadır. Silikon plakanın üst yüzeyinde ise PDMS ve PZT tetikleyici malzeme yerleştirilmiştir. Yerleştirilen PDMS sızdırmazlık elemanı 1000 μm yüksekliğe sahiptir ve hem PDMS hem de silikon plaka eş merkezlidir. Eş merkezli olarak yerleştirilen silikon plaka ve PDMS’in sahip olduğu giriş ve çıkış kanalları silindirik bir forma sahiptir. Bu silindirik form 5mm çap ve 1500 μm toplam (1000 μm PDMS, 500 μm Silikon plaka ile) yüksekliğe sahiptir. Akışkan çıkış kanalı, ortalama sıvı debi miktarını ölçmek için kullanıldı. Yapılan testler sırasında akışkan, 5 mm çapında ve toplam yüksekliği 1500 μm olan silindirik sıvı çıkış kanalında birikmiştir. Test süresinin (5 dakika) sonunda güç kaynağı kapatılmıştır. Çıkış kanalında toplanan akışkan hacmi mikro pipetler yardımıyla bu kanaldan toplanmıştır. Böylece birim zamanda toplanan akışkan debisi $\mu\text{l}/\text{dk}$ cinsinden elde edilmiştir. Şekil 3.2’de görüldüğü üzere bu mikropipetler μl biriminde çeşitli hassas ölçüm değerlerine sahiptir. Mikro pipetlerin hassasiyeti sayesinde çıkış kanalında akışkan kalmaması sağlanmıştır.



Şekil 3.2 : (a) Mikro pompa sisteminin üstten görünüşü, (b) 0.1-2.5 μ l / 0.5-10 μ l / 10-100 μ l için Mikropipetler (ISOLAB, Laborgerate GmbH).

Tez kapsamında yapılan deneyler sıfır karşı basınçta gerçekleştirilmiştir. Sıfır karşı basınç, giriş ve çıkış kanallarının aynı yüksekliğe sahip ve bu yüzden aynı seviyede atmosfere açıldığı anlamına gelmektedir. Yapılan deneyler sırasında için kronometre kullanıldı. Her deney için 5 dakika kullanıldı ve bu süre boyunca deney düzeneğine hiçbir şekilde müdahale edilmedi. Beş dakika sonunda piezoelektrik tetikleyici malzemeyi harekete geçirmek için kullanılan güç kaynağı durdurulmuştur. Pompa odası tarafından çıkış kanalına aktarılan akışkan mikropipet yardımı ile toplanmıştır. Mikropipet üzerinde görüntülenen akışkan hacmi mikrolitre olarak toplanmıştır. Bu akışkan hacmi, test süresine kullanılarak mikro pompanın dakika başına sağladığı mikrolitre cinsinden akış değeri, ortalama akış debisi olarak elde edildi. Buna göre, ortalama debi değeri aşağıda gösterilen formül ile hesaplanmıştır:

$$\emptyset = \frac{V}{t} \left[\frac{\mu l}{dakika} \right] \quad (3.1)$$

Burada gösterilen \emptyset hacimsel debi, V çıkış kanalındaki akışkan hacmi ve t deney süresidir. Her deney aynı koşullar altında 3 kez tekrarlanmış ve elde edilen ortalama akış debilerinin ortalaması alınarak deneysel veri datası olarak kullanılmıştır. Akış debisindeki belirsizlik değeri, belirsizlik yayılım yöntemi [88] kullanılarak hesaplandı. Buna göre ortalama akış debisindeki ortalama belirsizlik $\pm 1.86 \mu$ l/dk olarak hesaplanmıştır.



4. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

Tez kapsamında planlanan deneyler için ağırlıklı olarak değiştirilen temel etken sürüş frekans değeridir. Bu sebeple deneylere başlamadan önce mikropompa deney düzeneğinin çalışacağı maksimum sürüş frekans değeri elde edilmiş ve bu değer çevresindeki sürüş frekans aralığı deneyler boyunca kullanılmıştır. Maksimum sürüş frekans aralığını bulmamız için uygulamamız gereken uyarma voltajı da maksimum değerde olmalıdır, bu sebeple öncelikle piezo elektrik diske uygulanacak maksimum uyarma voltaj değeri belirlenmiştir.

Başlangıçta, piezo elektrik diske uygulanacak maksimum uyarma voltajını belirlemek için başlangıç voltajı olarak $10 V_{P-P}$ kullanılmış ve $5 V_{P-P}$ aralıklarla $120 V_{P-P}$ 'ye kadar yükseltilerek bu alan taranmıştır. $60 V_{P-P}$ olarak uygulanan uyarma voltajında piezoelektrik diskin maksimum çalışma değerine sahip olduğu bulunmuştur. İkinci adım olarak, $60 V_{P-P}$ uyarma voltaj değerinde piezoelektrik elemanın rezonans frekansının bulunması amaçlanmıştır. Sürüş frekans değeri 50 Hz'den 500 Hz'e 25 Hz aralıklarla taranmış ve en iyi debi 150 Hz'de elde edilmiştir. Yapılması planlanan deneylerde maksimum uyarma voltaj değeri olarak $60 V_{P-P}$ ve maximum sürüş frekans değeri olarak da 150 Hz kullanılmıştır.

Tez kapsamında planlanan deneyler göz önüne alındığında “frekansın”, “frekans dalga tipinin” ve “çalışma akışkanının” ortalama akış debisi üzerindeki etkilerini incelemek için uyarma voltaj değeri $60 V_{P-P}$ 'de sabit tutulmuştur. “Uyarma voltajının” akışkan debisi üzerindeki etkisi incelenirken de frekans değeri 150 Hz'de sabit tutularak değişen V_{P-P} değerleri incelenmiştir.

Çizelge 4.1: Piezoelektrik valfsiz mikro pompa ile yapılan deney parametreleri.

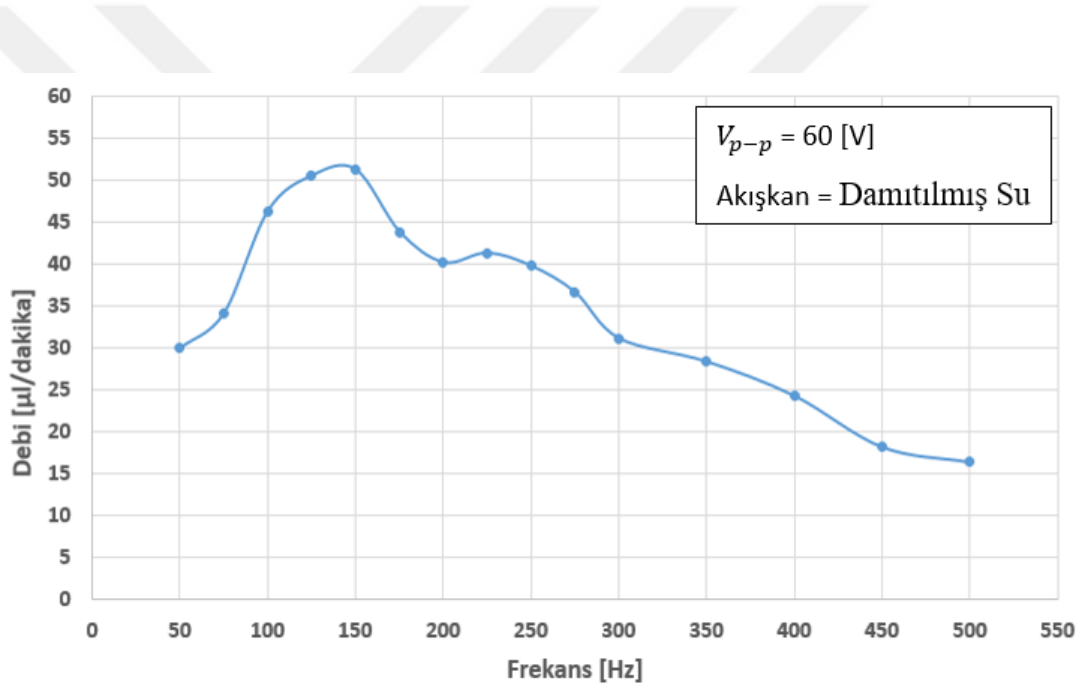
Deney Numarası	Sürüş Frekansı [Hz]	Uyarma Voltajı [V]	Frekans Dalga Tipi	Çalışma Akışkanı
1	50 - 500	60	Kare Dalga	Damıtılmış Su
2	150	10 – 60	Kare Dalga	Damıtılmış Su
3	50 - 500	60	Kare – Sinüs - Üçgen Dalga	Damıtılmış Su
4	50 - 500	60	Kare Dalga	Damıtılmış Su – Etanol - Metanol

4.1 Sürüş Frekans Değerinin Akışkan Debisi Üzerine Etkisi

Deney süresince sürüş frekans değeri, üretilen mikro pompanın performans değerini belirlemede en önemli parametrelerden biridir. Sürüş frekans değerinin etkisini ortaya çıkarmak için mikro pompa tarafından görülen karşı basınç değeri (atmosfer basıncı) ve uyarma gerilimi (V_{P-P}) sabit tutulmuş, sürüş frekansı küçük artışlarla değiştirilmiştir. Burada sabit tutulması gereken uyarma gerilimi (V_{P-P}) değeri için daha önce belirlenmiş olan 60 V_{P-P} uyarma voltaj değeri kullanılmıştır. Yapılan deney sonuçlarından elde edilen akış debisi değerleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Şekil 4.1’e göre, mevcut piezoelektrik ile tetiklenen mikro pompa kullanılarak yapılan deneyler sonucu, 50 Hz sürüş frekans değerinde maximum akış debisi (optimum performans) elde edilmiş ve bu değer için mikro pompada gözlemlenen akış debisi yaklaşık 52 $\mu\text{l}/\text{dk}$ ’lık maksimum değerine ulaşmıştır. Sürüş frekans değeri 150 Hz’den daha yüksek değerlere çıkartıldığında, akış debisi değerinin düşmeye başladığı gözlemlenmiştir. Singh S. ve arkadaşlarının 2015 yılında yaptıkları simülasyon çalışmasında bu durum ele alınmıştır [52]. Singh S. ve arkadaşlarının yaptıkları simülasyon çalışmalarından, uygulanan sürüş frekans değeri arttıkça membrana uygulanan basıncın arttığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada elde ettikleri bir başka gözlem, maksimum voltaj ve diğer parametreler sabit kaldığında, membranın maksimum yer değiştirmesinin daha yüksek sürüş frekans değerlerinde azalmasıdır. Membrandaki yer değiştirmenin azalması akışkan debi miktarının azalmasına sebep olmaktadır. Ayrıca, membrandaki yer değiştirmenin sadece büyüklük olarak azalmadığı, aynı zamanda membran yer değiştirme tepkisinde bir gecikme gösterdiği gözlemlenmiştir. Simülasyon

çalışmasından çıkarılan sonuç; deney başlangıcından rezonans frekans değerine kadar debideki artış olurken, rezonans frekansı sonrası, frekansın daha fazla artmasıyla debide gözlemlenen azalmanın sebebi membrana uygulanan basınçtaki artış ile yer değiştirmesindeki azalmadır.

Tez kapsamında üretilen mikro pompanın rezonans frekansının 150 Hz olduğu deneyler sonucu elde edilmiştir. Yapılan literatür araştırması ışığında Şekil 4.1’de gösterilen debi- frekans değerleri incelenmiştir. Deneylerde elde edilen debi değerinde yaklaşık 150 Hz den sonra azalma olmasının sebebi; membran üzerine uygulanan basınç değerinin 150 Hz den sonra artması ve böylelikle membran yer değiştirmesinde azalma olmasıdır. Membran yer değiştirmesinde azalma olması da debi değerinin azalmasına sebep olmaktadır.

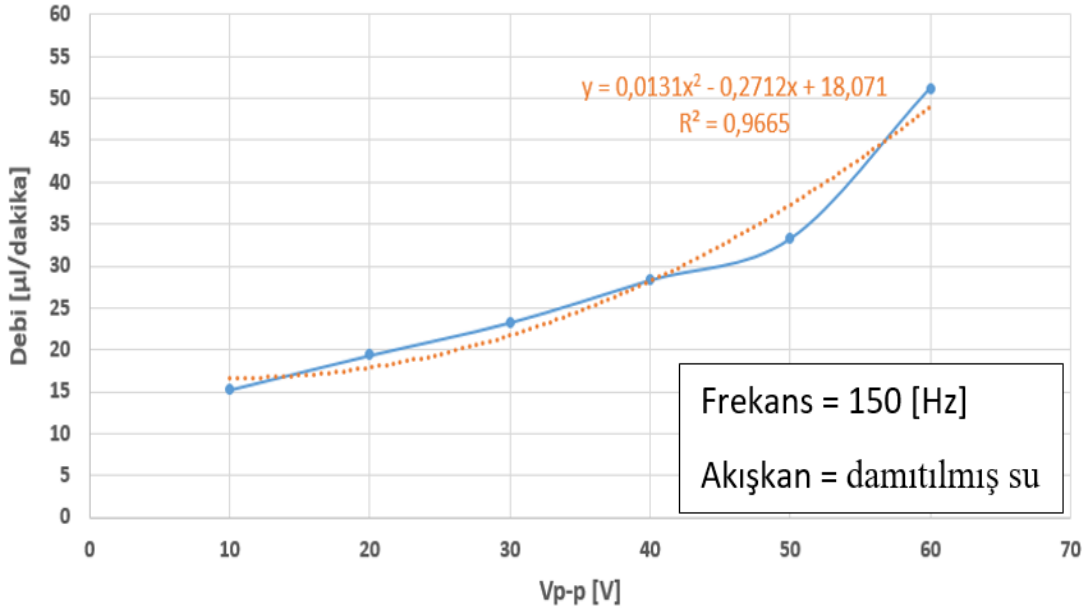


Şekil 4.1 : Sabit 60 V_{p-p} uyarma voltaj değerinde değişen sürüş frekans değerinin akışkan debisi üzerine etkisi.

4.2 Uyarma Voltaj Değerinin Akışkan Debisi Üzerine Etkisi

Uygulanan V_{p-p} voltaj değeri, akışkan debi değeri ve dolayısıyla mikro pompa performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olan bir başka parametredir. Bu etkiyi incelemek için, sürüş frekansı ve karşı basınç değeri sabit tutularak, küçük artışlarla çeşitli voltaj değerleri uygulanmıştır. Burada sabit tutulması gereken karşı basınç olarak atmosfer basıncı ve sürüş frekans değeri için 150 Hz kullanılmıştır. Şekil 4.2’de görülebileceği gibi, tepeden tepeye voltaj değeri 10 V’tan 10 V değerinde artışlar ile

60 V'a yükseltildiğinde, akış hızı 15 $\mu\text{l}/\text{dk}$ 'dan yaklaşık 52 $\mu\text{l}/\text{dk}$ 'ya yükselmektedir. Yapılan literatür araştırmasında [89], uyarma voltaj değerindeki değişimle membran yer değiştirmesinde de bir değişim olduğu ve bu durumun da akışkan debi değerini önemli ölçüde değiştirdiği sonucu çıkarılmıştır. Tez kapsamında üretilen mikro pompaya uygulanan tepeden tepeye voltaj, piezoelektrik diskin ve dolayısıyla membranın yukarı ve aşağı hareketini etkilemektedir. Yukarı doğru hareket, pompa odasının hacminin arttığını gösterir. Pompa odasının hacmindeki artış, giriş kanalından daha fazla sıvı çekebilen daha fazla basınç üretir. Tepeden tepeye voltaj ile piezoelektrik diskin yukarı doğru hareketinde kademeli bir artış vardır. Sonuç olarak uygulanan V_{p-p} değeri arttıkça pompa odasının toplam hacmi de artar. Bu da mikro pompanın girişten çıkışa daha fazla sıvı pompaladığı anlamına gelir.



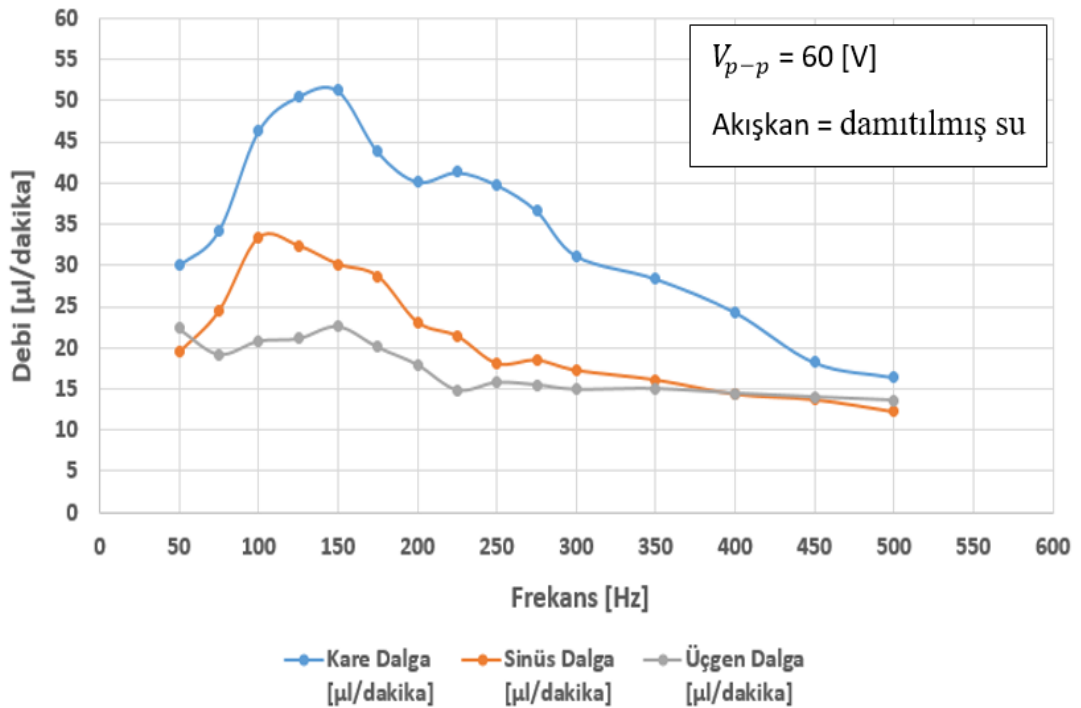
Şekil 4.2 : Sabit 150 Hz sürüş frekans değerinde, uyarma voltaj değerinin [V_{p-p}] bir fonksiyonu olarak akış hızı.

4.3 Sürüş Frekansı Dalga Türünün Akışkan Debisi Üzerine Etkisi

Bu deneyde, sürüş frekansı için üç ana dalga türü ele alınmıştır: Sinüs dalgası, kare dalga ve üçgen dalgadır. Bu etkiyi incelemek için, uyarma voltaj değeri ve karşı basınç değeri sabit tutularak, küçük artışlarla çeşitli frekans değerleri her üç dalga türü için uygulanmıştır. Burada sabit tutulması gereken karşı basınç olarak atmosfer basıncı, uyarma voltajı için 60 V_{p-p} değeri kullanılmıştır. Her dalga türü için 50 ilâ 500 Hz arasındaki sürüş frekans değerleri taranmıştır. Deney sonucu elde edilen akışkan debisi değerleri Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Bu şekile göre kare dalga profili 30 $\mu\text{l}/\text{dk}$ ile başlar

ve tepe noktasında yaklaşık 52 $\mu\text{l}/\text{dk}$ 'lık bir maksimum değere ulaşır. Sinüs dalgası profili için bu noktalar sırasıyla 20 $\mu\text{l}/\text{dk}$ ve 34 $\mu\text{l}/\text{dk}$ akış debilerine karşılık gelir. Üçgen dalga düşünüldüğünde, akış debisi 21 $\mu\text{l}/\text{dk}$ ile başlarken maksimum akış debisi 23,5 $\mu\text{l}/\text{dk}$ 'dır. Sonuç olarak kare dalga profili için debideki artış eğiliminin sinüzoidal ve üçgen dalga profillerine göre 50-150 Hz aralığında daha baskın olduğu görülmektedir. Literatürdeki simülasyon çalışmaları, kare dalga profilinin diğer dalga profillerine göre neden daha yüksek akış debi değerlerine sahip olduğunu açıklamaktadır.

Kolahdouz E.M. ve arkadaşlarının 2014 yılında yaptıkları simülasyon çalışmada, bunu pompa odası içerisinde oluşan girdaplar ile açıklamışlardır [88]. Membran konumu zamanla dinamik olarak değişen sinüzoidal dalga formunun aksine, kare dalga formunda, membran pozisyonundaki tutarlılık nedeniyle akışın yüksek hız gradyan bölgelerinde girdaplar oluşturmak için yeterli zamanı vardır. Başka bir deyişle, keskin dalga biçimi uyarımı, lüle ve yayıcıya diyodiklik (ters akıştaki basınç düşüşünün kanal boyunca ileri akıştaki basınç düşüşüne oranı) özelliğinde yardımcı olur. Benzer gözlemler ve sonuçlar literatürde vardır [66], [90].



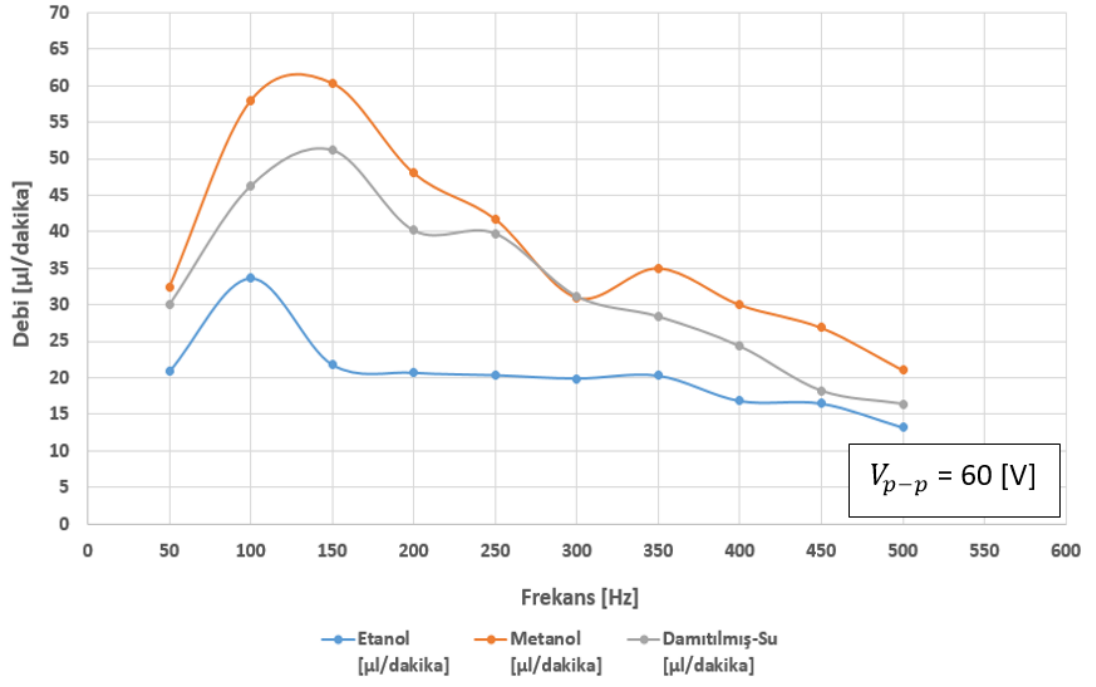
Şekil 4.3 : Farklı sürüş frekansı dalga türünün akışkan debisi profili.

4.4 Çalışma Sıvısının Akışkan Debisi Üzerine Etkisi

Bu deneyde, sürüş frekansı için üç ana dalga türü ele alınmıştır: Sinüs dalgası, kare Kinematik viskozite değerinin akış debisi üzerine etkisini görmek için, uyarma voltaj değeri ve karşı basınç değeri sabit tutularak, küçük artışlarla çeşitli frekans değerleri akışkan türü içinde uygulanmıştır. Burada sabit tutulması gereken karşı basınç olarak atmosfer basıncı ve uyarma voltajı için $60 V_{P-P}$ değeri kullanılmıştır. Her akışkan türü için 50 ilâ 500 Hz arasındaki sürüş frekans değerleri taranmıştır. Deney sonucu elde edilen akışkan debi değerleri Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Kinematik viskozite, aynı sıcaklıkta metanol için $0.75 \times 10^{-6} [m^2/s]$ ve etanol için $1.52 \times 10^{-6} [m^2/s]$ 'dir. Elde edilen maksimum debiler, $60 V_{P-P}$ 'de metanol için $60.3 \mu l/dk$ ve etanol için $22 \mu l/dk$ 'dir. Viskozite ne kadar düşükse, akışa karşı direnç o kadar düşük olacağından sıvı katmanları birinden diğerine o kadar hızlı kayar. Akışkanın daha hızlı akışı, çıkıştan sabit bir zamanda daha fazla akışkanın geçmesine izin verir. Şekil 4.4'de görüldüğü gibi, benzer dinamik viskozite değerlerine sahip su ve metanolün akış hız değerleri birbirine yakındır. Bu da dinamik viskozitenin akış hızı üzerindeki baskın etkisini ifade eder. Şekil 4.4 ele alındığında akış debi profillerinde tıkaç (plug) benzeri bir görüntü söz konusudur. Diğer bir deyişle, debi değeri belirli bir frekans değerine kadar artmakta bu değerden sonra artan frekansla birlikte azalır. Akış debisinde gözlemlenen bu profil Sayar E. tarafından 2012 yılında yapılan simülasyon çalışması ile açıklanmıştır [87]. Womersley sayısının gözlemlenen akış debi profil görüntüsünü etkilediği sonucu çıkarılmıştır. Önemli bir boyutsuz parametre olarak Womersley sayısı (α), Reynolds ve Strouhal sayılarının bir fonksiyonudur:

$$\alpha = (2\pi ReSt)^{1/2} = 2\pi f \frac{L^2}{\nu} \quad (4.1)$$

Bu çalışmadaki Womersley sayısının (α) aralığı, 50 ilâ 500 Hz arasındaki sürüş frekansları için 2.1-6.6'dır. Bu aralık için, Womersley sayısı yeterince büyüktür, bu da hız profilinin nispeten düz olduğunu veya tıkaç benzeri bir profile sahip olduğunu gösterir.



Şekil 4.4 : Farklı çalışma sıvısının akışkan debisi üzerine etkisi.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, akışkanın piezoelektrik tetikleyici ile tetiklenerek, oluşan basınç farkı ile giriş kanalından çıkış kanalına doğru hareketi sağlanmıştır. Mikro pompa sistem düzeneği için mikro pompa ve sızdırmazlık elemanı PDMS üretimi yapılmış ve cam lamel ve piezoelektrik tetikleyici ile birleştirilerek çalışır bir mikro pompa sistemi oluşturulmuştur.

Mikro pompa tasarımında önem teşkil eden iki ana detay bulunmaktadır: Bunlardan ilki, valf tasarımında, valf yerine, lüle / yayıcı kullanılmasıdır. Böylelikle hareketli yapıların sisteme vereceği ekstra hasar çıkarma unsuru da elimine edilmiştir. Tasarımdaki diğer önemli detay ise piezoelektrik tetikleyici malzeme ile akışkan temasını kesen membran kullanılmış olmasıdır.

Tasarımı gerçekleştirilen, piezoelektrik ile tetiklenen valfsiz mikro düzey pompa üretim yöntemi için temiz oda ortamından faydalanılmıştır. Mikro pompa üretimi esnasında MEMS (Mikroelektromekanik Sistemler) üretim teknikleri kullanılmıştır. Mikro pompa üretimi için 500 µm kalınlığa, 100 mm çapında, (100) oryantasyona sahip, her iki yüzeyi de parlatılmış silikon plaka kullanılmıştır. Silikon plakanın üst yüzeyinde piezo elektrik tetikleyici malzemenin konumlandırılacağı yuva oluşturulmuştur. Oluşturulan bu yuva 340 µm derinliğe sahiptir. Silikon plakanın alt yüzeyi ise pompa odası, lüle ve yayıcı için kullanılmıştır. Bu yapılar eş kalınlığa, 80 µm, sahiptir. Silikon plakanın üst yüzeyinden alt yüzeyine kadar, tüm mikro pompa plaka kalınlığı, 500 µm, kullanılarak akışkanın giriş/çıkış kanalları oluşturulmuştur. MEMS (Mikro Elektro Mekanik Sistemler) üretim tekniklerden kuru aşındırma (DRIE) yöntemi, her iki yüzey aşındırılması için kullanılmıştır. Aşındırma işlemine başlamadan önce istenilen desene göre aşınmasını istemediğimiz bölgelere ayrı bir kaplama uygulanarak yüzey korunmuştur. Silikon plakanın üst ve alt yüzeylerinde farklı kaplama malzemeleri kullanılmıştır. Bunun sebebi her iki yüzey için de farklı yüksekliklerde aşındırma işlemi uygulanmasıdır. Mikro pompaya akışkan besleyen giriş/çıkış kanallarının kalınlığı, silikon devre levhası kalınlığı kadardır. Bu yükseklik, kuru aşındırma yöntemi (DRIE) süresinin uzamasına sebep olmuştur. İşlem süresinin uzaması aşınması istenmeyen bölgelerin de aşınma olasılığını arttırmaktadır. Bu sebeple silikon plakanın üst yüzeyinin korunması için yüzey alüminyum ile kaplanmıştır. Silikon plakanın alt yüzeyi, pompa odası ve lüle/yayıcının aşındırılacağı

alt yüzeyi için kuru aşındırmada geçecek işlem süresi üst yüzeyine oranla yaklaşık olarak 6.5 kat daha azdır. Aşındırma süresinin az olacağı bu alt yüzey aşındırma işlemi için fotorezist (AZ 4562) malzemesi kullanılarak yüzey korunması sağlanmıştır. Yüzey kaplama işlemlerinde sonra Şekil 2.34’de gösterilen adımlar uygulanarak mikro pompa üretim işlemi tamamlanmıştır. Silikon plakanın üst yüzeyine piezoelektrik tetikleyici malzeme yuvası ve giriş/çıkış kanalları aşındırma işlemi sırasında kullanılan yöntem ve maske çeşitleri ile toplam üretim süresinde ciddi bir zaman kazanım avantajı sağlanmıştır. Ayrıca bu adımlar ile üretim için harcanan toplam maliyet de azaltılmıştır. Maliyet azaltımında en önemli etkenlerden biri kuru aşındırma yöntem (DRIE) cihazının kullanım süresinin azaltılmasıdır. 2.2.2.1 Silikon plaka (wafer) üretimi başlığı altında, 6. Aşama’da anlatılan iki aşamalı kısa yöntem kullanılarak, üretim için gerekli tüm ekipmanların kullanım süresi de azaltılmış olmuştur.

Silikon plakanın her iki yüzeyine uygulanan aşındırma işleminden sonra sızdırmazlık elemanı için kullanılan PDMS malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Burada silikon plaka her iki yüzeyine de farklı kalınlıklara sahip PDMS üretimi gerçekleştirilmiştir. Özellikle silikon plaka alt yüzeyi için üretilen PDMS sızdırmazlık elemanı kalınlığı silikon plaka toplam kalınlığına oranla çok ince üretilmiştir. Bu yüzeyde iki sebeple PDMS sızdırmazlık elemanı kullanılmıştır: Bunlardan ilki silikon plakanın alt yüzeyini cam lamel ile birleşmesini sağlamaktır. Burada oksijen plazma cihazı kullanılarak malzeme yüzey enerjisi artırılmış ve yapışma işlemi gerçekleştirilmiştir. Diğer sebep ise silikon devre levhası alt yüzeyine uygulanan cam lamel de herhangi bir kırılma olma durumunda PDMS sızdırmazlık elemanı cam lamelin parçalara ayrılması engellemekte ve deneylerin devamlılığını sağlamaktadır.

Üretim aşamalarından sonra (PDMS sızdırmazlık elemanı ve silikon plakanın yüzeyine aşındırılarak mikro düzey valf içermeyen pompa) PZT tetikleyici malzeme konumlandırılması ile mikro pompa sistemi tamamlanmıştır.

Tezin ikinci aşaması olarak üretimi sağlanan PZT ile tetiklenen valfsiz mikro düzey pompanın performansına ilişkin parametrik bir çalışma yapılmıştır. Yapılan parametrik çalışmada üç çalışma sıvısı kullanılmıştır. Üretimi sağlanan mikro pompa, 150 Hz frekansta ve 60 V_{p-p} voltaj ile çalışma sıvısı olarak da damıtılmış su kullanıldığında 52 [μ l/dak] ortalama akış debisi sağlamaktadır.

ÖNERİLER

Tez kapsamında yürütülen çalışma, valf kullanmadan mikro kanallar kullanılarak sıvıların taşınmasının pompalama ilkeleri hakkında öncü niteliktedir. Parametrik etkileri ortaya koyması ve tasarım kılavuzları sağlaması sayesinde bu çalışma, ilaç dağıtımını gibi birçok uygulamada kullanılacak valfsiz piezoelektrik mikro pompaların tasarımı ve geliştirilmesi için bir referans potansiyeli taşımaktadır. Mikro düzey yapıların üretilmesi, üretilen bu mikro düzey cihazlardan geçen akışları ve bu cihazlarında MEMS (Mikro Elektro Mekanik Sistemler) uygulamalarındaki yerini daha da geliştirmek için aşağıda gelecekteki araştırmalar için tasarım, üretim yöntemleri ve yapılan deneysel çalışmalar alanında önerilerde bulunulmuştur.

- Valf kullanılmadan lüle/yayıcı tasarlanan mikro pompa tasarımında lüle/yayıcı tasarımında kullanılan açının değiştirilmesinin akışkan debisi üzerine etkisi ele alınmalıdır. Bunun için tez kapsamında kullanılan lüle/yayıcı açısından ($(\theta) 9.4^\circ$) daha düşük açı değerlerinin kullanılması önerilmektedir.
- Üretim esnasında aşındırma işlemi için kuru aşındırma yöntemi (DRIE) kullanılmıştır. Gelecek çalışmalar için aşındırma yöntemi olarak ıslak aşındırma yöntemi ele alınabilir. Islak aşındırma yönteminde önemli olan nokta ile silikon plakanın toplam kalınlığının ($500 \mu\text{m}$) aşınmasını sağlarken, aşınmasını istemediğimiz alanlar için silikon plakanın yüzeyini kaplayacak film malzemesi seçimidir. Bunun için metalik formda film malzemesi seçimi yapılmalıdır.
- Üretilen mikro pompa da akışkan ile piezoelektrik tetikleyici malzeme ile teması engellemesi için silikon plakadan membran tasarlanmıştır. Gelecek çalışmalarda silikon formda membran yerine PDMS yapıda membran tasarımı yapılarak, membran malzemesinin akışkan debisi üzerine etkisi ele alınmalıdır.
- Silikon plaka alt yüzeyinde bulunan pompa odası, lüle/yayıcı açıklığı cam lamel ile kapatılması için, ince bir zar formunda PDMS kullanılarak oksijen plazma yöntemi kullanılmıştır. Gelecek çalışmalarda silikon plaka ile cam lamelin birbirlerine anodik bağ yöntemi ile birleştirilmesinin akışkan debisi üzerine etkisi incelenmelidir.
- Tez kapsamında membran hareketini sağlaması için piezoelektrik tetikleyici malzeme kullanılmıştır. Gelecek çalışmalarda tetikleyici yönteminin

değiştirilerek (örneğin akustik etkileşimler) deneylerin gerçekleştirilmesi önerilmektedir. Böylelikle maksimum akışkan debisi için uygun olan tetikleyici malzeme belirlenmiş olacaktır.

- Deneyler esnasında mikro düzey yer değişimlerini ölçebilecek cihazlar yardımı ile membran hareketi inceleyerek membranın zamana göre hareketi (aşağı/yukarı) ve bu hareketin hangi zamanda hangi konumda (membran merkezi, lüle çıkışı, yayıcı girişi vb.) gerçekleştiği belirlenebilir.
- Tez kapsamında kullanılan mikro pompada deneyler sıfır geri basınç eşliğinde yapılmıştır. Geri basınç uygulandığında akışkan debisinde gözlemlenecek değişimi ele almak için çıkış kanalına çeşitli basınç değerleri uygulayarak, akış debisi değişimi çalışılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] **Gidde, R. R., Pawar, P. M., Ronge, B. P. ve Dhamgaye, V. P.,** (2019). Design optimization of an electromagnetic actuation based valveless micropump for drug delivery application, *Microsyst. Technol.*, vol. 25, no. 2, pp. 509–519. doi: 10.1007/s00542-018-3987-y.
- [2] **Aboubakri, A., Ahmadi, V. E. ve Koşar, A.,** (2020). Modeling of a Passive-Valve Piezoelectric Micro-Pump: A Parametric Study, *Micromachines*, vol. 11, no. 8, p. 752. doi: 10.3390/mi11080752.
- [3] **Su, W., Gao, X., Jiang, L. ve Qin, J.,** (2015). Microfluidic platform towards point-of-care diagnostics in infectious diseases, *Jornal of Chromatography A*, vol. 1377, pp. 13–26. doi: 10.1016/j.chroma.2014.12.041.
- [4] **Ozbey, A., Karimzadehkhoei, M., Kocaturk, N. M., Bilir, S. E., Kutlu, O., Gozuacik, D. ve Kosar, A.,** (2019). Inertial focusing of cancer cell lines in curvilinear microchannels, *Micro and Nano Engineering.*, vol. 2, pp. 53–63. doi: 10.1016/j.mne.2019.01.002.
- [5] **Erdem, K., Ahmadi, V. E., Kosar, A. ve Kuddusi, L.,** (2020). Differential Sorting of Microparticles using spiral microchannels with elliptic configurations, *Micromachines*, vol. 11, no. 4, pp. 412. doi: 10.3390/mi11040412.
- [6] **Ahmadi, V. E., Butun, I., Altay, R., Bazaz, S. R. Alijani, H., Celik, S., Warkiani, M. E. ve Koşar, A.,** (2021). The effects of baffle configuration and number on inertial mixing in a curved serpentine micromixer: Experimental and numerical study, *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 168, pp. 490–498. doi: 10.1016/j.cherd.2021.02.028.
- [7] **Mu, Y. H., Hung, N. P. ve Ngoi, K. A.,** (1999). Optimisation Design of a Piezoelectric Micropump, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 15, no. 8, pp. 573–576. doi: 10.1007/s001700050104.
- [8] **Cui, Q., Liu, C. ve Zha, X. F.,** (2007). Study on a piezoelectric micropump for the controlled drug delivery system, *Microfluidics and Nanofluidics*, vol. 3, no. 4, pp. 377–390. doi: 10.1007/s10404-006-0137-0.
- [9] **Guan, Y., Meng, X., Liu, Y., Bai, M. ve Xu, F.,** (2020). Modeling, vibration analysis and fabrication of micropumps based on piezoelectric transducers, *International Journal Acoustics and Vibration*, vol. 25, no. 3, pp. 383–391. doi: 10.20855/ijav.2020.25.31670.

- [10] **Kaçar A., Özer M. B. ve Taşcıoğlu Y.,** (2020). A novel artificial pancreas: energy efficient valveless piezoelectric actuated closed-loop insulin pump for T1DM, *Applied Sciences*, vol. 10, p. 5294.
- [11] **Lindroos, V., Tilli M., Lehto A. ve Motooka, T.,** (2010). *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies*.doi: 10.1016/C2009-0-19030-X
- [12] **Nguyen, N. T.,** (2012). *Micromixers Fundamentals, Design and Fabrication*, 2.Baskı.
- [13] **Laermer F. ve Urban, A.,** (2003). Challenges, developments and applications of silicon deep reactive ion etching, *Microelectronic Engineering*, vol. 67–68, pp. 349–355. doi: 10.1016/S0167-9317(03)00089-3.
- [14] **Ghodssi, R. ve Lin, P.,** (2011). *MEMS Materials and Processes Handbook*, 1.Baskı, Boston, MA: Springer US.
- [15] **Chang, B., Leussink, P., Jensen, F., Hübner, J. ve Jansen, H.,** (2018). DREM: Infinite etch selectivity and optimized scallop size distribution with conventional photoresists in an adapted multiplexed Bosch DRIE process, *Microelectronic Engineering*, vol. 191, pp. 77–83. doi: 10.1016/j.mee.2018.01.034.
- [16] **Fu, J., Li, J., Yu, J., Liu, R., Li, J., Wang, W., Wang, W. ve Chen, D.,** (2018). Improving sidewall roughness by combined RIE-Bosch process, *Material Science in Semiconductor Processing*, vol. 83, pp. 186–191. doi: 10.1016/j.mssp.2018.04.033.
- [17] **Laermer F. ve Schilp, A.,** (1996). Method for anisotropically etching silicon, US 5,501,893 A.
- [18] **Laermer F., Schilp A., Funk K. ve Offenbergl, M.,** (1999). Bosch deep silicon etching: improving uniformity and etch rate for advanced MEMS applications, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*.
- [19] **Li, D.,** (2015). *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*. New York, NY: Springer New York.
- [20] **Laermer F. ve Urban. A.,** (2010). Plasma system and method for anisotropically etching structures into a substrate, US 7,855,150 B2.
- [21] **Tachi, S., Tsujimoto, K. ve Okudaira, S.,** (1988). Low-temperature reactive ion etching and microwave plasma etching of silicon, *Applied Physics Letters*, vol. 52, no. 8, pp. 616–618. doi: 10.1063/1.99382.
- [22] **Franssila, S.,** (2004). *Introduction to Microfabrication*. Finland: Microelectronics Centre. doi: 10.1002/9781119990413.

- [23] **Boer M. J., Gardeniers J. G. E., Jansen H. V., Smulders E., Gilde M. J., Roelofs, G., Sasserath J. N. ve Elwenspoek, M.,** (2002). Guidelines for Etching Silicon MEMS Structures Using Fluorine High-Density Plasmas at Cryogenic Temperatures, *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 11, no. 4, pp. 385–401.
- [24] **Mellhaoui X., Dussart, R., Tillocher, T., Lefauchaux, P., Ranson, P., Boufnichel, M., ve Overzet, L. J.,** (2005). SiO_xF_y passivation layer in silicon cryoetching, *Journal of Applied Physics*, vol. 98, no. 10, p. 104901. doi: 10.1063/1.2133896.
- [25] **Sainiemi L. ve Franssila, S.,** (2007). Mask material effects in cryogenic deep reactive ion etching, *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement and Phenomena*, vol. 25, no. 3, p. 801. doi: 10.1116/1.2734157.
- [26] **Walker, M. J.,** (2021). Comparison of Bosch and cryogenic processes for patterning high aspect ratio features in silicon, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, vol.4407, pp. 89–99. doi: 10.1117/12.425288.
- [27] **Boer, M. D., Tierkstra, R., Berenschot, J., Jansen, H., Burger, G., Gareniers, J., Elwenspoek, M. ve Berg, A.,** (2000). Micromachining of buried micro channels in silicon, *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 94–103. doi: 10.1109/84.825783.
- [28] **Aachboun. S. ve Ranson, P.,** (1999). Deep anisotropic etching of silicon, *Journal of Vacuum Science and Technology A*, vol. 17, no. 4, pp. 2270–2273. doi: 10.1116/1.581759.
- [29] **Laermer, F., Franssila, S., Sainiemi, L. ve Kolari, K.,** (2015). Deep Reactive Ion Etching, in *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies*, Elsevier, pp. 444–469.
- [30] **Chollet, F. ve Liu, H.,** (2010). Microfabrication and Nanomanufacturing, Commons Deed.
- [31] **Abdullohoğlu M. R.,** (2012). *Mikro ölçekte elektrosprey sistemi üretimi ve karakterizasyonu* (Yüksel Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- [32] **Kovacs G.T.A., Maluf N. I. ve Petersen K.E.,** (1998). Bulk Micromachining of Silicon, Proceedings of the *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 86, no. 8.
- [33] **Williams, K. R. ve Muller, R. S.,** (1996). Etch rates for micromachining processing, *Journal of Microelectromechanical Systems.*, vol. 5, no. 4, pp. 256–269. doi: 10.1109/84.546406.
- [34] **Seidel H., Csepregi L., Heuberger A., Baumgartel H.,** (1990). Anisotropic Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solutions: II . Influence of Dopants, *Jornal of Electrochemical Society*, vol. 137.

- [35] **Kaminsky, G.**, (1985). Micromachining of silicon mechanical structures, *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectron. Nanom. Struct.*, vol. 3, no. 4, p. 1015. doi: 10.1116/1.583089.
- [36] **Kern W.**, (1978). Chemical etching of silicon, germanium, gallium arsenide and gallium phosphide, Radio Corporation of America(RCA) *Laboratories at Princeton.*, New Jersey, vol. 39, p. 50.
- [37] **Schnakenberg, U., Benecke, W., Löchel, B., Ullerich, S. ve Lange, P.**, (1990). NH₄OH-based etchants for silicon micromachining: Influence of additives and stability of passivation layers, *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 25, no. 1–3, pp. 1–7. doi: 10.1016/0924-4247(90)87001-Y.
- [38] **Tabata, O., Asahi, R., Funabashi, H., Shimaoka, K. ve Sugiyama, S.**, (1992). Anisotropic etching of silicon in TMAH solutions, *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 34, no. 1, pp. 51–57. doi: 10.1016/0924-4247(92)80139-T.
- [39] **Schnakenberg, U., Benecke, W. ve Lange, P.**, (1991). TMAHW etchants for silicon micromachining, in *TRANSDUCERS '91: 1991 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Digest of Technical Papers*, pp. 815–818. doi: 10.1109/SENSOR.1991.149008.
- [40] **Petersen, K.E.**, (1982). Silicon as a mechanical material, *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 70, no. 5, pp. 420–457. doi: 10.1109/PROC.1982.12331.
- [41] **Mehregany, M. ve Senturia, S. D.**, (1988). Anisotropic etching of silicon in hydrazine, *Sensors and Actuators*, vol. 13, no. 4, pp. 375–390. doi: 10.1016/0250-6874(88)80050-7.
- [42] **Lysko, J. M.**, (2003). Anisotropic etching of the silicon crystal-surface free energy model, *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 6, no. 4, pp. 235–241. doi: 10.1016/j.mssp.2003.09.003.
- [43] **Thong, J. T. L, Choi, W. K. ve Chong, C. W.**, (1997). TMAH etching of silicon and the interaction of etching parameters, *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 63, no. 3, pp. 243–249. doi: 10.1016/S0924-4247(97)80511-0.
- [44] **Abhari F., Jaafar H. ve Yunus, N.A.M.**, (2012). A comprehensive study of micropumps technologies, *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 7, pp. 9765–9780.
- [45] **Yazıcı, M. ve Akgün, M.**, (2018). *Piezoelektrik özellikli, polimer nano kompozit malzeme geliştirilmesi ve titreşim sensörü olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi* (Yüksel Lisans Tezi). Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [46] **Gök M. O. ve Karadöl, İ.**, (2018). Piezoelektrik uygulamalı ayakkabı tasarımı, *Journal of Social Humanities Sciences Research*, vol. 5, no. 22, pp. 888–893.
- [47] **Url-1**, <<https://docplayer.biz.tr/47310458-Basinc-gerilme-transduserleri.html>>, erişim tarihi 10/08/2020.

- [48] **Guan, Y., Ren, J., Zhang, G. ve Cheng, Z.,** (2009). Fabrication and experiment studies of the piezoelectric micropump with saw-tooth microchannel, *International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, pp. 733–737. doi: 10.1109/ICICISYS.2009.5358282.
- [49] **Gidde R. R., Pawar P. M. ve Dhamgaye V. P.,** (2019). Fully coupled modeling and design of a piezoelectric actuation based valveless micropump for drug delivery application., *Microsystem Technologies*, vol. 26, pp. 633–645.
- [50] **Zhao, X., Zhao, D. ve Guo, Q.,** (2020). A theoretical and experimental study of a piezoelectric pump with two elastic chambers, *Sensors*, vol. 20, no. 20, p. 5867. doi: 10.3390/s20205867.
- [51] **Laser, D .J. ve Santiago, J. G.,** (2004). A review of micropumps, *Journa of Micromechanics and Microengineering*, vol. 14, no. 6, pp. R35–R64. doi: 10.1088/0960-1317/14/6/R01.
- [52] **Singh, S., Kumar, N., George, D. ve Sen, A. K.,** (2015). Analytical modeling, simulations and experimental studies of a PZT actuated planar valveless PDMS micropump, *Sensors Actuators A Physical.*, vol. 225, pp. 81–94. doi: 10.1016/j.sna.2015.02.012.
- [53] **Olsson, A., Stemme, G. ve Stemme, E.,** (1995). A valve-less planar fluid pump with two pump chambers, *Sensors Actuators A Physical.*, vol. 47, no. 1–3, pp. 549–556. doi: 10.1016/0924-4247(94)00960-P.
- [54] **Ullmann, A.,** (1998). The piezoelectric valve-less pump—performance enhancement analysis, *Sensors Actuators A Physical.*, vol. 69, no. 1, pp. 97–105. doi: 10.1016/S0924-4247(98)00058-2.
- [55] **Zhou, Y. ve Amirouche, F.,** (2011). An electromagnetically-actuated all-PDMS valveless micropump for drug delivery, *Micromachines*, vol. 2, no. 3, pp. 345–355. doi: 10.3390/mi2030345.
- [56] **Tsui, Y.Y. ve Lu, S.L.,** (2008). Evaluation of the performance of a valveless micropump by CFD and lumped-system analyses, *Sensors Actuators A Physical.*, vol. 148, no. 1, pp. 138–148. doi: 10.1016/j.sna.2008.06.036.
- [57] **Sayar, E. ve Farouk, B.,** (2012). Three dimensional dynamic analysis of a piezoelectric valveless micropump: effects of working fluid, *International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE)*, vol. 88978, pp. 4–10.
- [58] **Ha, D.-H., Phan, V. P., Goo, N. S. ve Han, C.H.,** (2009). Three-dimensional electro-fluid-structural interaction simulation for pumping performance evaluation of a valveless micropump, *Smart Materials and Structures*, vol. 18, no. 10, p. 104015. doi: 10.1088/0964-1726/18/10/104015.
- [59] **Yao, Q., Xu, D., Pan, L. S., Teo, A.L.M., Ho, Lee, V.S.P. ve Shabbir, M.,** (2007). CFD simulations of flows in valveless micropumps, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics.*, vol. 1, no. 3, pp. 181–188. doi: 10.1080/19942060.2007.11015191.

- [60] **Andersson H., Wijngaart W., Nilsson P., Enoksson P. ve Stemme, G.,** (2001). A valve-less diffuser micropump for microfluidic analytical systems, *Sensors Actuators B Chemical*, vol. 72, pp. 259–265.
- [61] **Lee, D., Yoon, H. C. ve Ko, J.,** (2004). Fabrication and characterization of a bidirectional valveless peristaltic micropump and its application to a flow-type immunoanalysis, *Sensors Actuators B Chemical*, vol. 103, no. 1–2, pp. 409–415. doi: 10.1016/j.snb.2004.04.081.
- [62] **Olsson, A., Larsson, O., Holm, J., Lundbladh, L., Ohman, O. ve Stemme, G.,** (1998). Valve-less diffuser micropumps fabricated using thermoplastic replication, in *Proceedings IEEE The Tenth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems. An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots*, pp. 305–310. doi: 10.1109/MEMSYS.1997.581836.
- [63] **Olsson, A., Enoksson, P., Stemme, G. ve Stemme, E.,** (1996). An improved valve-less pump fabricated using deep reactive ion etching, in *Proceedings of Ninth International Workshop on Micro Electromechanical Systems*, pp. 479–484. doi: 10.1109/MEMSYS.1996.494029.
- [64] **Yang C.-C., Miao J.-M., Lih F.-L., Liu T.-L. ve Ho, M.H.,** (2011). The performance analysis of valveless micropump with contoured nozzle/diffuser, *International Journal of Mechanical, Industrial and Aerospace Sciences.*, vol. 5, pp. 508–513.
- [65] **Shen, C.-Y. ve Liu, H.-K.,** (2008). Fabrication and drive test of piezoelectric PDMS valveless micro pump, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, vol. 31, no. 4, pp. 615–623. doi: 10.1080/02533839.2008.9671415.
- [66] **Guan, Y. ve Li, X.,** (2018). Analysis of Vibrational Performance of A Piezoelectric Micropump with Diffuse/Nozzle Microchannel, *Nanotechnology and Precision Engineering*, vol. 1, pp. 138–144. doi: 10.13494/j.npe.20170014.
- [67] **Patil, S.B., Chu, V. ve Conde, J.P.,** (2008). Performance of thin film silicon MEMS on flexible plastic substrates, *Sensors Actuators A Physical*, vol. 144, no. 1, pp. 201–206. doi: 10.1016/j.sna.2007.12.022.
- [68] **Borenstein, J.T.,** (2008). Tissue Engineering, in *Comprehensive Microsystems*, Elsevier, pp. 541–583. doi: 10.1016/B978-044452190-3.00040-9.
- [69] **Paulasto-Kröckel, M., Tilli, M., Ross, G. ve Kuisma, H.,** (2020). Where is silicon based MEMS heading to?, in *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies*, Elsevier, pp. xxi–xxix. doi: 10.1016/B978-0-12-817786-0.00062-1
- [70] **Pratap, R. and Arunkumar, A.,** (2007). Material selection for MEMS devices, *Indian Journal of Pure and Applied Physics*, vol. 45, pp. 358–367.
- [71] **Verma, A., Mondal, K. ve Gupta, A.,** (2021). Si-based MEMS resonant sensor: A review from microfabrication perspective, *Microelectronics Journal*, vol. 118, p. 105210. doi: 10.1016/j.mejo.2021.105210.

- [72] **Willis, M.J.**, (2017). Crystallography Overview for MEMS, Southwest Center for Microsystems Education (SCME), University of New Mexico, Albuquerque, NM.
- [73] **Url-2**, <<https://www.universitywafer.com/silicon-orientation.html>>, erişim tarihi 14/12/2020.
- [74] **Url-3**, <<https://www.universitywafer.com/silicon-wafer-orientation.html>>, erişim tarihi 20/04/2021.
- [75] **Tilli, M.**, (2020). Silicon wafers preparation and properties, in *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies*, Elsevier, pp. 93–110. doi: 10.1016/B978-0-323-29965-7.00004-X
- [76] **Pei, Z.J., Fisher, G.R. ve Liu, J.**, (2008). Grinding of silicon wafers: A review from historical perspectives, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, no. 12–13, pp. 1297–1307. doi: 10.1016/j.ijmactools.2008.05.009.
- [77] **Url-4**, <<https://www.universitywafer.com/double-side-polished-silicon-wafers.html>>, erişim tarihi 08/05/2021.
- [78] **Franssila, S.**, (2004). Pattern Generation, in *Introduction to Microfabrication*, pp. 93–97. doi: 10.1002/9781119990413.ch8
- [79] **Yusof, N., Bais, B., Yeop Majlis, B., Soin, N. ve Yunas, J.**, (2019). Optimization of KOH etching process for MEMS square diaphragm using response surface method, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 15, no. 1, p. 113. doi: 10.11591/ijeecs.v15.i1.pp113-121.
- [80] **Url-5**, <<https://buck.lighting/blog/clean-room-concept>>, erişim tarihi 03/06/2021.
- [81] **Whyte, W.**, (2001). *Cleanroom technology: fundamentals of design, testing and operation*. John Wiley & Sons, Ltd. The Atrium, Southern Gate, Chichester West Sussex PO19 8SQ, England.
- [82] **Chang, C. Y. ve Sze, S. M.**, (1996). *ULSI Technology*, McGraw-Hill International Editions, Electrical Engineering Series.
- [83] **Guichard, M., Bertran Garcia de Olalla, E., Stanley, C.E. ve Grossmann, G.**, (2020). Microfluidic systems for plant root imaging, in *Plant Cell Biology / Methods in Cell Biology*, pp. 381–404. doi: 10.1016/bs.mcb.2020.03.012
- [84] **Borók, A., Laboda, K. ve Bonyár, A.**, (2021). PDMS Bonding Technologies for Microfluidic Applications: A Review, *Biosensors*, vol. 11, no. 8, p. 292. doi: 10.3390/bios11080292.

- [85] **Eddings, M. A., Johnson, M. A. ve Gale, B. K.,** (2008). Determining the optimal PDMS–PDMS bonding technique for microfluidic devices, *J. Micromechanics Microengineering*, vol.18, no.6, p.067001. doi: 10.1088/0960-1317/18/6/067001.
- [86] **Olsson A., Larsson O., Holm J., Lundbladh L., Öhman O. ve Stemme, G.,** (1998). Valve-less diffuser micropumps fabricated using thermoplastic replication, *Sensors Actuators A Physical.*, vol. 64, pp. 63–68.
- [87] **Sayar, E.,** (2012). Acoustically and Electrokinetically Driven Transport in Microfluidic Devices, Drexel University. Pennsylvania, United States.
- [88] **Kolahdouza, E. M., Mohammadzadeh, K., Shirani, E., Ziaei-Rad, S.,** (2014). Performance of piezoelectrically actuated micropump with different driving voltage shapes and frequencies, *Scientia Iranica Transactions B: Mechanical Engineering*, vol. 21, pp. 1635–1642.
- [89] **Chandrasekaran, A. ve Packirisamy, M.,** (2015). A study of cavitating and non-cavitating performances of valveless micropump through dynamic measurement of chamber pressure, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 25, no. 3, p. 035006. doi: 10.1088/0960-1317/25/3/035006.
- [90] **Guan, Y., Bai, M., Meng,X., Liu,Y. ve Xu, F.,** (2020). Experimental Investigation of Piezoelectric Micropumps with Single, Series or Parallel Pump Chambers, *International Journal of Acoustics and Vibration*, vol. 25, no. 3, pp. 453–460. doi: 10.20855/ijav.2020.25.31688.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Sevda ŞİMŞEK

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2016, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Isı-Akışkan Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2014-2017 ARÇELİK A.Ş. / AR-GE Mühendisi
- 2017- Mercedes-Benz Türk A.Ş. / AR-GE Mühendisi

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Şimşek S.**, Ahmadi V.E., Çelik S., Sayar E. ve Koşar A., (2022). Fabrication and Flow Rate Characterization of a DRIE Process Based Valveless Piezoelectric Micropump. *Journal of Micromechanics and Microengineering*