

**MİKRO-KANALLARDA AKUSTOFOREZ İLE PARÇACIK
MANİPÜLASYONU**

SÜLEYMAN BÜYÜKKOÇAK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2014

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ
Anabilim Dalı Başkanı

Süleyman Büyükkoçak tarafından hazırlanan “MİKRO-KANALLARDA AKUSTOFOREZ İLE PARÇACIK MANİPÜLASYONU” adlı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Mehmet Bülent ÖZER
Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan: Yrd. Doç. Dr. Yiğit TAŞÇIOĞLU

Üye : Yrd. Doç. Dr. Barbaros ÇETİN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet Bülent ÖZER

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Süleyman BÜYÜKKOÇAK

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri
Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Mehmet Bülent ÖZER
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Ekim 2014

Süleyman BÜYÜKKOÇAK

**MİKRO-KANALLARDA AKUSTOFOREZ İLE PARÇACIK
MANİPÜLASYONU**

ÖZET

Son yıllarda hücre ve parçacık analizlerinde mikro-çiplerin kullanımı bazı avantajlarından dolayı giderek artış göstermekte. Bu çalışmada mikro-çip uygulamalarından biri olan akustoforez ile parçacık manipülasyonu için nümerik simülasyon metotları geliştirildi ve simülasyon sonuçları doğrultusunda mikro-çipler üretildi. Simülasyon sonuçları literatürdeki deneysel bir çalışmanın sonuçları ile karşılaştırıldı ve sonuçların örtüştüğü görüldü. Farklı parametreler kullanılarak yapılan simülasyon sonuçları doğrultusunda optimize edilen ve malzeme olarak PDMS kullanılan çipler ile yapılan parçacık yıkama ve konsantrasyon deneylerinin başarılı olduğu görüldü.

Anahtar Kelimeler: Akustoforez, Simülasyon, PDMS, Parçacık Manipülasyonu, Optimizasyon

University : TOBB Economics and Technology University
Institute : Institute of Natural and Applied Sciences
Science Programme : Mechanical Engineering
Supervisor : Asst. Prof. Dr. Mehmet Bülent ÖZER
Degree Awarded and Date : M.Sc. – October 2014

Süleyman BÜYÜKKOÇAK

**PARTICLE MANIPULATION IN MICRO-CHANNELS USING
ACOUSTOPHORESIS**

ABSTRACT

The usage of lab on a chip devices has increased in years passed due to their advantages on cell/particle manipulation. In this study, numerical simulation methods for acoustophoresis have been developed and micro-chip devices have been designed and manufactured in accordance with simulation results. Numerical simulation and literature results were compared and correlation between the results was obtained. Particle washing and concentration processes were implemented successfully using micro-chip devices that are made of PDMS and optimized according to simulations with different parameters.

Keywords: Acoustophoresis, Simulation, PDMS, Particle Manipulation, Optimization

TEŞEKKÜR

Çalıőmam boyunca bana sürekli yol gösteren ve yardımını esirgemeyen tez danıőmanın ve hocam Yrd. Doç. Dr. Mehmet Bülent Özer'e, yine çalıőmam boyunca bana her türlü desteği veren Yrd. Doç. Dr. Barbaros Çetin'e teşekkür ederim.

Deneyleer esnasında tecrübelerini benimle paylaşan ve çalıőmalarımnda yardımını esirgemeyen Soheila Zeinali'ye ve üretimde emeği geçen Bilkent Üni. Mikro Sistem Tasarım ve Üretim Merkezi personeline teşekkür ederim.

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araőtırma Kurumu'na bu tez çalıőmasını 112M102 numaralı proje kapsamında desteklediği için teşekkür ederim.

Beni her zaman destekleyen ve yanımda olan aileme ve arkadaőım Burcu Kirőan'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SEMBOLLERİN LİSTESİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. TEORİ	8
2.1 Akustik Kuvvet Denklemi.....	8
2.2 Üç Boyutta İnterpolasyon.....	15
2.3 Çip ve Kanal Genişliği Formülü.....	17
2.4 Laminar Hız Profili.....	18
3. NÜMERİK SİMÜLASYONLAR	19
3.1 Akustik Alan ve Akış Alanı için Analitik Yaklaşımlar.....	22
3.2 Akış Alanı için Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	28
3.2.1 Parçacık Ayrıştırma.....	28
3.2.2 Parçacık Yıkama.....	40
3.3 Akustik ve Akış için Sonlu Elemanlar Yaklaşımı.....	43
3.3.1 Piezoların Etkisi.....	49
3.3.2 Model Geometrisinin Etkisi.....	52
3.3.3 Piezoların Simetrisinin Etkisi.....	56
3.3.4 Piezo Konfigürasyonunun Etkisi.....	60
3.3.5 Çip Malzemesinin Etkisi.....	63
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	66
4.1 Çip Üretimi.....	66
4.2 Deney Düzeneği ve Metodu.....	67
4.3 Çip Tasarımları.....	69

4.3.1	Tasarım Kriterleri.....	69
4.3.2	Çip Tasarımları ve Deney Sonuçları.....	70
5.	SONUÇLAR.....	78
	EKLER.....	84
	ÖZGEÇMİŞ.....	85

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge 2.1 Köşe noktaları genelleştirilmiş koordinatları.....	17
Çizelge 3.1 Malzemelerin akustik özellikleri.....	21
Çizelge 3.2 Nümerik simülasyon sonuçları-1	25
Çizelge 3.3 Nümerik simülasyon sonuçları-2	27
Çizelge 3.4 Nümerik simülasyon sonuçları-3	27
Çizelge 3.5 Simülasyon parametreleri	31
Çizelge 3.6 Ortam değişim verimi değerleri	43
Çizelge 3.7 Model geometrisi değiştirilerek alınan sonuçlar.....	53
Çizelge 3.8 Piezo simetrisi değiştirilerek alınan sonuçlar	57
Çizelge 3.9 Piezo konfigürasyonu değiştirilerek alınan sonuçlar	61
Çizelge 3.10 Çip malzemesi değiştirilerek alınan sonuçlar	63
Çizelge 4.1 Akış modeli debileri ve hata oranları.....	73
Çizelge 4.2 Deney parametreleri.....	74

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 2.1 Hexahedron eleman köşe noktaları.....	16
Şekil 3.1 Basınç ve kuvvet dağılımı.....	23
Şekil 3.2 Yıkama ünitesi	24
Şekil 3.3 Akustik alan içerisinde parçacık hareketi	25
Şekil 3.4 Ayırıştırma ünitesi.....	29
Şekil 3.5 Kanal girişindeki akış hızı profili	30
Şekil 3.6 Kanal çıkışındaki akış hızı profili.....	30
Şekil 3.7 Ana kanal girişindeki parçacık hareketi.....	32
Şekil 3.8 Ana kanal sonundaki parçacık hareketi	32
Şekil 3.9 Yan çıkış kanallarında parçacık hareketi	34
Şekil 3.10 Deneysel sonuçların ve nümerik simülasyon sonuçlarının histogram grafikleri.....	34
Şekil 3.11 Nümerik simülasyon sonuçları histogram grafikleri-1	36
Şekil 3.12 Nümerik simülasyon sonuçları histogram grafikleri-2	37
Şekil 3.13 Farklı hız debileri için nümerik sonuçlar	38
Şekil 3.14 Eş boyutlu parçacıkların farklı ortamlarda ayırıştırma sonuçları.....	39
Şekil 3.15 Difüzyon analizi sonuçları (Debi:0,2ml/dak.)	41
Şekil 3.16 Difüzyon analizi sonuçları (Debi:0,27ml/dak.)	41
Şekil 3.17 Yıkama işlemi parçacık yörüngeleri ve sıvı konsantrasyonları	42
Şekil 3.18 Akustik model ve çözüm ağı görünümü	46
Şekil 3.19 Kanal içerisindeki basınç çizgileri	47
Şekil 3.20 Basınç dağılım grafiği.....	48
Şekil 3.21 Kanal kesitindeki basınç alanları	50
Şekil 3.22 Düzlemsel dalga parçacık yörüngeleri.....	51
Şekil 3.23 Referans model parçacık yörüngeleri	51
Şekil 3.24 Piezo boyut farkı 0,5 mm iken parçacık yörüngeleri	59

Şekil 3.25 Piezonun üstte olduğu model görünümü	61
Şekil 4.1 Deney düzeneği fotoğrafı.....	68
Şekil 4.2 İlk tasarlanan kalıbın ve çipin fotoğrafları.....	71
Şekil 4.3 Son tasarlanan kalıbın ve çipin fotoğrafları	72
Şekil 4.4 Sonlu elemanlar modeli akış çizgileri.....	73
Şekil 4.5 Akustik alan kapalı iken parçacık hareketi	75
Şekil 4.6 Akustik alan açık ve debi düşük iken parçacık hareketi	75
Şekil 4.7 Akustik alan açık ve debi yüksek iken parçacık hareketi	76
Şekil 4.8 Ana kanal girişindeki parçacık hareketi.....	76
Şekil 4.9 Ultrasonik alan kapalı iken ana kanal çıkışı	77
Şekil 4.10 Ultrasonik alan açık iken ana kanal çıkışı.....	77

SEMBOLLERİN LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
P	Basınç
ρ	Yoğunluk
e	Birim Vektör
v	Hız
η	Dinamik Viskozite
β_r	Rölatif Viskozite
c_a	İzentropik Ses Hızı
ω	Frekans
φ	Hız Potansiyeli
λ	Dalga Boyu
α	Monopol Katsayısı
β	Dipol Katsayısı
m	Kütle
K	Sıkıştırılabilirlik Katsayısı
V	Hacim
a	Parçacık Yarıçapı
f_1	Malzeme Katsayısı
f_2	Malzeme Katsayısı
U^{rad}	Radyasyon Potansiyeli
F^{rad}	Radyasyon Kuvveti
K	Birim Uzunluktaki Dalga Sayısı
W	Kanal Genişliği
H	Kanal Yüksekliği
Φ	Akustik Kontrast Faktörü
E_{ac}	Akustik Enerji Yoğunluğu
μ^g	Genelleştirilmiş Koordinat
η^g	Genelleştirilmiş Koordinat
ξ^g	Genelleştirilmiş Koordinat
N	Şekil Fonksiyonu

1. GİRİŞ

Mikro-akışkan teknolojisi hücre analiz ve manipülasyon işlemlerinde oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Mikro-akışkan sistemlerin hücre manipülasyonu, hücre ayırması gibi işlemler için bazı önemli avantajları bulunmaktadır [1]. Hücre ayırma, yıkama ve konsantrasyon işlemleri, aferez¹, kök veya ender bulunan hücrelerin kandan toplanması, hücrelerin saklanıp depolanması için ortam değiştirme gibi farklı uygulamalarda kullanılabilir. Örnek olarak günümüzde en yaygın yıkama yöntemi santrifüjdür. Diğer manipülasyon yöntemleri arasında magnetoferez, akustoferez, dielektroforez, optik metotlar vardır [2]. Bu metotlar parçacıkların fiziksel özelliklerindeki farkları kullanarak birbirinden ayırır.

Son yıllarda, mikro-kanallar içerisinde akustoferez kullanarak hücre ve parçacık manipülasyonuna yönelik araştırmalar artmıştır. Akustoferez, santrifüj ve membran filtrasyonu gibi yöntemlerin yerini alabilecek gelecek vadeden bir yöntemdir. Diğer metotlara göre daha yüksek debilerde ve daha yüksek konsantrasyonlarda çalışabilmektedir [3]. Çalışma prensibi mikro-kanal içerisinde durağan akustik dalga oluşturmak ve buna bağlı olarak parçacıkların üzerinde kuvvet oluşturmaktır. Oluşan bu kuvvetlerin büyüklüğü parçacıkların sıkıştırılabilirliği, yoğunluğu ve boyutlarına göre değişim gösterir. Böylece farklı boyutlardaki veya farklı malzemeden yapılan parçacıklar üzerlerine farklı kuvvetler etki edeceği için belirli bir zamanda farklı konumlarda toplanabilirler. Parçacık grupları kanal bitiminde farklı çıkışlardan toplanabilir böylece her bir çıkışta farklı parçacık grubu birbirinden ayrılmış bir şekilde toplanır, bu işleme ayırma işlemi denir. Yıkama işlemi ise parçacıkların içinde bulunduğu taşıyıcı ortamın değiştirilmesidir. Bunun için iki sıvı kanal içerisinde birbirine paralel olarak akıtılır, akustik kuvvet etki ettiğinde parçacıklar kirli olan taşıyıcı sıvıdan temiz olan taşıyıcı sıvıya geçerler. Akış laminar olduğu için iki sıvı birbirine karışmaz. Kanal sonunda kirli taşıyıcı ve parçacıkları taşıyan temiz taşıyıcı farklı çıkışlardan alınarak birbirinden ayrılır. Konsantrasyon artırma işlemi ise parçacıkların bulunduğu taşıyıcı sıvı içerisindeki konsantrasyonunun artırılması ile

¹İng Apheresis: Kanın veya kan içerisindeki bazı maddelerin kandan ayıklanması

yapılır. Parçacıkları belirli bir noktaya toplayarak parçacık bulundurmeyen fazla sıvının atılması ile gerçekleşir.

Akustofrez uygulamaları parçacık/hücre konum manipülasyonu ve parçacık/hücre ayırıştırma olarak iki ana gruba ayrılabilir. İlk grup uygulamalar parçacıkları kanal içerisinde belirli konumları getirmeyi hedefler [4-10]. Parçacıklar toplu olarak kanalda istenilen konumda toplanabilir ise hücre/parçacık yıkama ve konsantrasyon işlemleri gerçekleştirilebilir. Hücre yıkama [11,12] ve konsantrasyon artırma işlemlerinin [13,14] akustik kuvvet uygulanarak başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği görülmüştür. İkinci grup uygulamalar ise parçacık [15,16] ve hücreleri [17-19] akustik kuvvet uygulayarak birbirinden ayırmayı hedeflemektedir.

Bahsedilen araştırmalarda akustofrez uygulamaların çoğunlukla deneysel çalışması yapılmıştır. Literatürde akustofrez çalışmaları içerisinde deneysel çalışmalar, parçacıkların yörüngelerini veya maruz kaldıkları kuvveti hesaplayan numerik modelleme çalışmalarından fazladır. Bu durumun esas nedeni bütün etkileri içeren bir simülasyonun günümüz bilgisayarlarının bile çözemeyeceği büyüklükte modellere ihtiyaç duyması ayrıca bu modellerin farklı fizik alanlarını eşzamanlı bulundurmasıdır. Akustik dalgayı oluşturan piezo-elektrik malzeme elektrik, mekanik ve akustik alanları frekansa bağlı olarak, mikro kanaldaki akış ise akışkanlar dinamiğini zamana bağlı olarak modeller. Simülasyon çözüldükçe bütün bu alanların eşzamanlı çözülmesi gerekir, bu da işlem yükünü oldukça artırır. Parçacıkların da akış ile birlikte hareket ettiği düşünülür ise oluşturulan çözüm ağının her zaman aralığından sonra tekrar oluşturulması ve çözümün bu şekilde tüm parçacıklar kanalı terk edene kadar yapılması oldukça zaman alacaktır. Literatürdeki az sayıdaki çalışmada bazı kabuller yapılarak problem basitleştirilmeye çalışılmış böylelikle simülasyon yapılabilmiştir. Akustik kuvvetlerin hesaplandığı bir çalışmada, elastik küre parçacıklar üzerine etkiyen kuvvetler sonlu elemanlar metodu ile çözülmüş ve sonuçların analitik çözüm sonuçları ile yakın çıktığı gözlemlenmiştir [20]. Başka bir çalışmada ise yağ parçacıkları ile kırmızı kan hücrelerinin birbirinden ayrılması analiz edilmiştir. Akış alanı sonlu hacimler yöntemi, akustik alan ise analitik olarak modellenmiştir. Disk şeklinde tasarlanan ayırıcı ünite aksel-simetrik olarak çözülmüştür fakat sonuç

herhangi bir deneysel sonuç ile karşılaştırılmamıştır [21]. Akustik alanın analitik yöntemle çözüldüğü başka bir çalışmada parçacık ayrıştırma işlemi modellenmiş. Akış alanı tam gelişmiş laminar akış olarak varsayıp, parabolik hız profilleri kullanılarak parçacık yörüngelerini hesaplanmıştır [22]. Neild ve çalışma arkadaşlarının kurduğu sonlu elemanlar modelinde durağan sıvı içindeki parçacıklar basınç düğüm noktaları üzerinde sıralandırılmış. Model piezo-elektrik malzemeyi, çip malzemesini ve kanal içerisindeki durağan sıvıyı da kapsamıştır. Analizde frekans cevabı çözdürülmüş ve farklı frekanslarda parçacıkların üzerinde sıralandığı basınç düğüm noktalarının sayısı ölçülmüştür. Nümerik model sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür [4,23]. Mikro-parçacık kapanının sonlu elemanlar metodu ile modellendiği çalışmada kapanın performansı optimize edilmeye çalışılmış. Farklı piezo boyutları, konfigürasyonları ve sayıları kullanılarak analizler yapılmıştır [24].

Bu tez çalışmasında ise hem parçacık yörüngelerini hesaplayan nümerik ve analitik modeller geliştirildi hem de bazı konfigürasyonların deneysel sonuçları elde edildi. Çalışmada ilk olarak yıkama ve ayırma üniteleri tasarlanırken kullanılabilir bir simülasyon metodu oluşturuldu. Problemin karmaşıklığını azaltmak için bazı kabuller yapıldı. Parçacıkların akustik alanı bozmadığı ve birbirleri ile etkileşimleri olmadığı varsayıldı. Böylece çözüm ağının tekrar tekrar oluşturulması gerekmedi ayrıca parçacıkların yörüngeleri diğer parçacıklarla etkileşimi olmadığı için teker teker hesaplanabildi. Simülasyonlarda parçacığın akış ile aynı hızda hareket ettiği ve kütlesi olmadığı düşünüldü. Yörünge hesaplanırken yazılan program parçacığın konumuna göre akış hızlarını hesaplayıp belirli bir zaman adımı boyunca parçacığı hesaplanan hızda hareket ettirir, daha sonra yeni konumuna göre tekrar hızları hesaplar ve parçacığı tekrar hareket ettir. Eğer parçacık akustik alan içerisine girmiş ise üzerine etkiyen kuvvet hesaplanır ve parçacık hareketine bu kuvvetten oluşan etki de eklenir. Parçacık bu şekilde çıkışlardan birinden çıkana kadar hareketini devam ettirir. Parçacıklar birbiri ile etkileşime girmediği için yörüngeler her parçacık için ayrı ayrı hesaplanabilir. Analiz sonuçlarını deney sonuçları ile karşılaştırabilmek için Monte-Carlo yaklaşımı benimsendi. Deneyde parçacıkların başlangıç veya kanala giriş konumları tam olarak bilinemediği ve parçacıkların boyutlarında da belirli sapmalar

olduğu için programın bazı parametreleri bu belirsizliği sağlayacak şekilde rastgele belirlendi. Akustik alan analitik bağıntılar ile hesaplandı. Oluşturulan modellerde akış parametreleri, kanal geometrisi ve parçacık özellikleri sonuçların karşılaştırabilmesi için deneysel bir çalışmadan [19] alındı.

Simülasyon metodu ve programı, basit bir modelden sürekli geliştirilerek son haline getirildi. Yapılan varsayımlar azaltılarak, sistem performansını etkileyen ve ilk etapta yok sayılan birçok parametrenin etkisi gözlemlendi. Oluşturulan ilk modelde sadece kanalın düz dikdörtgen prizmadan oluştuğu varsayıldı. Akış alanı laminar akış olarak kabul edildi ve hızlar analitik olarak hesaplandı. Akustik alan ise analitik metot ile çözüldü. Bu metot Bölüm 3.1’de anlatıldı. Daha sonra model geliştirilip bahsedilen deneysel çalışmadaki parametrelere sadık kalınarak giriş ve çıkış bölgelerindeki akış alanı sonlu elemanlar metodu ile COMSOL programı kullanılarak çözdürüldü. Orta kısımlarda tam gelişmiş laminar akış olduğu varsayımı devam ettirildi. Simülasyonlar sırasında deney parametreleri [19] kullanıldı sadece gerçek değeri bilinmeyen bir parametre ayarlanarak ayırma işlemi için sonuçlar elde edildi. Deneyde olduğu gibi üç farklı boyuttaki (3, 7, 10 μm) parçacık grubunun ayırma işlemi sonucunda çıkış yaptığı kanallar hesaplandı. Simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlarla tutarlı olduğu gözlemlendi. Böylece simülasyon metodunun silikon çipler için yeterince doğru olduğu sonucuna varıldı. Bu metot kullanılarak farklı kanal geometrileri ve akış hızları gibi parametrelerin performansa etkisi gözlemlendi. Elde edilen sonuçlara göre çip ve kanal tasarlandı. Bu şekilde yapılan simülasyon metodu ve sonuçları Bölüm 3.2’de gösterildi.

Çip üretilirken malzeme olarak literatürde sık olarak kullanılan silikon yerine polimer bir malzeme olan PDMS kullanılmasına karar verildi. Mikro-kanal üretiminde PDMS’in silikona göre üretim kolaylığı bu kararda etkili oldu. PDMS mikroçipler kalıplara dökülerek üretilebilir iken silikon mikroçip çok daha uzun ve pahalı olan litografi işlemi ile üretilir. Bu durum ileride kullanılması muhtemel kullan-at cihazlar için PDMS’in uygunluğunu göstermektedir. Kalıp içerisine polimer bir malzeme olan PDMS dökülerek fırımlandı. Kalıptan çıkarılan parça, plazma yapıştırma yöntemi ile cama yapıştırıldı. Son olarak çip üzerinde akış rezervuarları açılması ile çip üretimi

tamamlandı. İlk yapılan deneylerde bir adet piezo kullanıldı ve silikon çiplerde olduğu gibi çipin üst tarafına yapıştırıldı. Çip üretim aşamaları detaylı olarak Bölüm 4.1’de anlatıldı. Sinyal jeneratöründe üretilen sinyal, güçlü bir amfi üzerinden yükseltilecek piezoya aktarıldı. Deneyler 2-2,3 MHz titreşim frekans değerleri arasında yapıldı. Fakat sadece piezonun kalınlık modundaki rezonansı olan 2,25MHz civarında parçacık hareketi gözlemlendi. Piezoların yüksek genlikli dalgalar oluşturduğunu test etmek için piezolardan biri titreştirilirken karşısındaki piezodan ölçüm alındı. 2,2-2,3 MHz aralığında ölçülen genliklerin yüksek olduğu diğer frekanslarda genliğin oldukça düştüğü hatta sinyalin kaybolduğu görüldü. Deneylerde 5 µm çapında parçacıklar kullanıldı. Parçacıklar şırınga pompalar ile kanala basıldı. Pompa ve çip arasındaki bağlantı için 1 mL’lik şırınga ve serum hortumu kullanıldı. Kanal içerisindeki parçacık hareketi mikroskop kamera ile kaydedildi. Deney düzeneği ve metodu Bölüm 4.2’de gösterildi.

İlk etapta yapılan deneylerde istenilen sonuçlar elde edilemedi. Parçacıkların herhangi bir hareketi gözlemlenmedi. Bu nedenle literatürde çip malzemesi olarak PDMS’in kullanıldığı çalışmalar daha detaylı incelendi. Lenshof ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, çip malzemesi PDMS olan modellerde daha farklı piezo konfigürasyonu kullanılması gerektiği belirtilmiş, silikon ve PDMS arasındaki farkın genel akustik empedans değerinden kaynaklandığı gösterilmiştir. Silikon ve su arasında empedans farkı yüksek olduğu için yansıma kanal duvarında gerçekleşmekte yani kanal içerisinde istenen durağan dalga sadece kanalın genişliği doğru ayarlandığında oluşturulabilmektedir. Fakat su ve PDMS arasındaki empedans farkı düşük olduğu için yansıma kanal duvarında gerçekleştirilememekte bu nedenle durağan akustik dalganın tüm çip genişliğine oturtulması gerekmektedir. Bunun için de sadece kanal ölçüleri değil çip ölçülerinin de bu duruma göre ayarlanması gerekmektedir. Ayrıca kullanılan piezo malzemelerin de çipin üstüne değil yan duvarına yapıştırılması gerekmektedir. Piezo sayısı ikiye çıkartılabilir veya bir piezo ve bir yansıtıcı konfigürasyonu da kullanılabilir [25]. Mükemmel durağan dalgalar eşit genlik ve hızdaki ilerleyen ve geri gelen dalgaların toplamı ile oluşmaktadır. Yansıtıcı kullanılan konfigürasyonda PDMS’in akustik sönümü fazla olduğundan [33] dolayı ve daha önemlisi dalganın mükemmel bir şekilde ters fazda yansıması garanti edilemeyeceği için yansıtıcı yerine,

giden ve dönen dalgayı eşit genlik ve ters fazda tutmak için iki piezo konfigürasyonu seçildi. Deneyler kalıp değiştirilmeden sadece piezo konfigürasyonu değiştirilerek tekrarlandı. Kalıba PDMS dökülmeden önce yan duvarlara iki adet piezo malzeme yaslandı ardından döküm yapıldı. Bu deneylerde parçacıklar harekete geçirildi fakat istendiği gibi kanalın ortasına toplanmadı. Parçacıkların çoğunlukla duvara doğru hareket ettiği gözlemlendi.

Parçacıkların kanal içerisinde duvara yapışmak gibi davranışlar göstermesi akustik alanın düzgün dağılım gösterdiği kabulünün PDMS ile üretilen çipler için doğru olmadığını gösterdi. Bu nedenle piezo etkisini de içine alan yeni akustik analizlerin yapılması gerekliliği ortaya çıktı. Yeni yapılan analizlerde akustik alan sonlu elemanlar yöntemi çözdürüldü. Modelde iki adet ters fazda çalışan piezo, PDMS çip, su dolu kanal ve kanal yalıtımı için cam bulunmaktadır. Modelin frekans cevabı hesaplandı, çıktı olarak kanal içerisindeki üç eksenle akustik basınç ve hız değerleri alındı. Basınç ve hız değerleri daha sonra akustik kuvvet hesaplanırken kullanıldı. Modellerde çip yüksekliği ve genişliği, kanal yüksekliği, genişliği ve uzunluğu gibi bazı parametrelerin etkisi gözlemlendi. Her model için farklı frekans cevapları da çözdürüldü. Piezo boyutlarının farklı olması, piezo konumlarının hatalı olması, kanal duvarlarının piezo malzemelere eşit uzaklıkta olmaması gibi üretim esnasında oluşabilecek hataların da sistem performansını nasıl etkilediği gözlemlendi. Çeşitli analiz sonuçlarında deneyde görüldüğü gibi parçacıkların duvara gittiği, kanal içinde salınım yaptığı durumlar da görüldü. Parçacıkların üzerinde toplandığı basınç düğüm noktalarının kanalın ortasında oluşabilmesi için kanalın orta çizgisi etrafında mükemmel bir simetri oluşturulması gerektiği görüldü. Bu metot ile yapılan simülasyon sonuçları Bölüm 3.3'te gösterilmiştir.

Simülasyon sonuçlarından yola çıkarak yeni bir kalıp tasarlandı ve üretildi. Yeni kalıp ile üretilen çiplerde mükemmel simetrinin oluşturulması amaçlandı. Böylece piezoların oluşturduğu akustik dalgaların basınç düğüm noktaları kanalın ortasında oluşacak ve parçacıklar kanalın ortasına hareket edecekti. Diğer bir değişiklik ise çiplerin kanala yaklaştırılması oldu böylece PDMS sönümünden dolayı dalgaların genliğinin azalması bir miktar engellendi. Piezoların elektriksel bağlantıları da akustik

analizlerdeki ters fazda çalışacak şekilde polariteleri dikkate alınarak yapıldı. Böylelikle aynı sinyal verildiğinde piezolardan biri kalınlık yönünde uzarken diğeri kısaldı. Analiz sonuçlarına göre durağan dalganın basınç düğümü kanalın tam ortasında istenilen şekilde oluşturulabilir. Deneyde de kabul edilebilir şekilde basınç düğüm noktalarının kanalın ortasında oluşması sağlandı ve parçacıklar kanalın ortasında toplanabildi. Böylece yıkama ve konsantrasyon işlemleri deneysel olarak başarılı bir şekilde yapıldı. Deney sonuçları Bölüm 4.3'te verildi.

2. TEORİ

2.1 Akustik Kuvvet Denklemi

Akustik dalgaların parçacığa çarpması ile oluşan kuvvete akustik yayılım kuvveti denir. Bu kuvvetin büyüklüğünü ve yönünü hesaplamaya yönelik ilk çalışma sıkıştırılabilir parçacıklar için Yosioka ve Kawasima tarafından yapılmıştır [26]. Daha sonra bu çalışma Gorkov tarafından genelleştirilmiştir [27]. Bu çalışmada akustik kuvvet denklemleri ve denklem çıkarımları Henrik Bruus'un ders notlarından alınmıştır [28].

Ultrason akustiğinde 1,5MHz'den yüksek frekanslarda su içerisinde dalga boyları 1 mm'den küçüktür. Mikro-kanallar düşünüldüğünde mikro-kanal ve boşluklara bu dalgalar sığdırılabilir. Bahsedilen akustik dalgalar çok hızlı hareket eden yoğunluk, basınç ve hız alanlarını oluşturur. Bu hızlı salınım yapan alanlar sıvı veya sıvı içerisindeki parçalar üzerinde küçük, salınım yapmayan hız vektörü oluşturabilirler. Mikro-akışkan sistemlerde bu küçük etkiler önemli sonuçlara neden olurlar.

Akustikte kullanılan lineer dalga denklemi, basıncı (p) yoğunluk (ρ) cinsinden ifade eden termodinamik durum denklemi (2.1a), yoğunluğun zamana bağlı değişimini veren kinematik süreklilik denklemi (2.1b) ve hız alanını veren (v) Navier-Stokes denkleminin (2.1c) birleştirilmesi ile elde edilir.

$$p = p(\rho) \quad (2.1a)$$

$$\partial_t \rho = -\nabla \cdot (\rho v) \quad (2.1b)$$

$$\rho \partial_t v = -\nabla p - \rho(v \cdot \nabla)v + \eta \nabla^2 v + \beta^r \eta \nabla(\nabla \cdot v) \quad (2.1c)$$

Denklemlerde η sıvının dinamik viskozitesini ve β^r rölatif viskoziteyi ifade etmektedir. Normalde çözümü çok zor olan doğrusal olmayan bu denklemlerin pertürbasyon teorisi kullanılarak yakın çözümleri elde edilecek.

Yoğunluğu ρ_0 , basıncı p_0 olan denge konumundaki bir sıvıya herhangi bir akustik dalga etki ettiğini varsayalım. Akustik dalgadan dolayı oluşan basınç değişimine p_1 ,

yoğunluk değişimine ρ_1 dersek yoğunluk, basınç ve hız alanlarını (2.2)'deki gibi ifade edebiliriz;

$$\rho = \rho_0 + \rho_1 \quad p = p_0 + c_a^2 \rho_1 \quad \text{ve} \quad v = v_1 \quad (2.2)$$

Yukarıdaki basınç denkleminde c_a terimi termodinamik durum denklemi kullanılarak elde edilmiştir ve izentropik ses hızını ifade etmektedir.(2.2)'deki değişkenler (2.1b) ve (2.1c)'de yerine koyulup gerekli düzenlemeler yapılır ise;

$$\begin{aligned} \partial_t^2 \rho_1 &= -\nabla \cdot (\rho_0 \partial_t v_1) = c_a^2 \nabla^2 \rho_1 - (1 + \beta^r) \eta \nabla^2 (\nabla \cdot v_1) \\ &= c_a^2 \left[1 + \frac{(1 + \beta^r) \eta}{\rho_0 c_a^2} \partial_t \right] \nabla^2 \rho_1 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Basınç, yoğunluk ve hız alanlarının harmonik çözümleri olduğu varsayılırsa;

$$\begin{aligned} \rho_1(r, t) &= \rho_1(r) e^{-i\omega t}, \quad p_1(r, t) = c_a^2 \rho_1(r) e^{-i\omega t}, \\ v_1(r, t) &= v_1(r) e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (2.4)$$

(2.4)'teki değişkenler (2.3)'te kullanılıp gerekli düzenlemeler yapılırsa ve dinamik viskozite ihmal edilirse dalga denklemi elde edilir;

$$\nabla^2 p_1 = \frac{1}{c_a^2} \partial_t^2 p_1, \quad (2.5)$$

(2.5)'in bir boyutta çözümü hız alanı, basınç alanı ve hız potansiyeli cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$v_1 = -i \frac{1}{\rho_0 \omega} \nabla p_1 = \nabla \varphi_1 \quad (2.6a)$$

$$\varphi_1 = -i \frac{1}{\rho_0 \omega} p_1 \quad (2.6b)$$

Denklemden φ_1 hız potansiyelini ifade eder. Yüksek frekans düşük periyot (μs) değerlerinde çalışıldığı için kuvvet zamana bağlı değil, bir döngüdeki ortalama değere göre çözülür. Fakat birinci derece harmonik kullanıldığında ortalama değerler sıfır çıkmaktadır. Bu yüzden ikinci derece harmonikler de çözüme katılmalıdır.

$$\rho = \rho_0 + \rho_1 + \rho_2 \quad , \quad p = p_0 + c_a^2 \rho_1 + p_2 \quad \text{ve} \quad v = v_1 + v_2 \quad (2.7)$$

Denklemlerde $\langle X \rangle$ operatörü dögünün bir periyodundaki ortalama değeri alır,

$$\langle X \rangle = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau dt X(t) \quad (2.8)$$

(2.8)'deki değişkenler (2.1c)'de (Navier-Stokes) yerine koyulup gerekli düzenlemeler yapılır ise,

$$\langle p_2 \rangle = \frac{1}{2\rho_0 c_a^2} \langle p_1^2 \rangle - \frac{1}{2} \rho_0 \langle v_1^2 \rangle \quad (2.9)$$

Momentumun korunumu prensibine göre viskoz olmayan bir sıvıda akustik kuvvet F^{rad} , ikinci derece basınç ortalaması $\langle p_2 \rangle$ ve momentum akı tensörünün $\rho_0 \langle v_1 v_1 \rangle$ toplamının parçacık üzerindeki alanda integralinin alınması ile bulunabilir.

$$F^{\text{rad}} = - \int_{\partial\Omega} da \left\{ \left[\frac{1}{2\rho_0 c_a^2} \langle p_1^2 \rangle - \frac{1}{2} \rho_0 \langle v_1^2 \rangle \right] n + \rho_0 \langle (n \cdot v_1) v_1 \rangle \right\} \quad (2.10)$$

Akustik kuvvet denklemi küre şeklinde elastik parçalar için elde edilecektir. Çözümü basitleştirmek için hız v_1 ve basınç alanları p_1 hız potansiyeli cinsinden ifade edilebilir;

$$v_1 = \nabla \varphi_1 \quad (2.11a)$$

$$p_1 = i\rho_0 \omega \varphi_1 \quad (2.11b)$$

Dalga denklemi hız potansiyeli cinsinden yazılırsa;

$$\nabla^2 \varphi_1 = \frac{1}{c_a^2} \partial_t^2 \varphi_1 \quad (2.12)$$

Akustik dalgalar parçacık üzerinde kırılıp dağılırlar ve yeni bir hız potansiyeli oluştururlar (φ_{sc}). Parçaların yarıçapı etki eden akustik dalğanın boyundan çok küçük olduğu için dalgaların kırılma esnasında parçanın nokta olduğu varsayılabilir. Toplam hız potansiyeli gelen ve dağılan dalgaların potansiyelleri cinsinden yazılırsa;

$$\varphi_1 = \varphi_{in} + \varphi_{sc} \quad (2.13)$$

Dağılan hız potansiyeli hesaplanırken parçacık noktasal olduğu için çoklu kutup açılımı² uygulanabilir. Açılım yapılırken parametreler yakın alanda³ hesaplanır. Açılım sayesinde dağılan hız potansiyeli sadece iki katsayıya bağlı olarak yazılabilir;

$$\varphi_{sc} = \frac{\alpha}{r} + \frac{\beta(v_p - v_{in}) \cdot e_r}{r^2}, \quad r \ll \lambda \quad (2.14)$$

Denklemdaki α terimi noktasal kütlelerin varlığından, β terimi ise parçacık ve sıvı arasındaki hız farkından dolayı ortaya çıkmıştır. $(v_p - v_{in})$ terimi parça yüzeyinin gelen dalgaya göre göreceli hızını, e_r terimi ise noktasal parçacığın orijinine yerleştirilen bir küresel koordinat sistemine göre gelen dalganın yönünü gösteren birim vektörü ifade etmektedir.

Parça ortamda olmasaydı parçanın bulunduğu hacme ρ_{in} ile birlikte birim zamanda $\partial_t m$ kadar kütle girecekti fakat parça bulunduğu için bu kütle parça duvarlarından parçacık hızından (v_p) bağımsız olarak yansımaktadır. Zamana bağlı kütle değişimi parça duvarında hızın ve yoğunluk çarpımının integral alınması ile hesaplanabilir veya yoğunluk değişimi, hacim ve sıkıştırılabilirlik cinsinden ifade edilebilir. Parça yüzeyindeki hız;

$$v_{sc}^{(\alpha)} = \alpha \nabla(r^{-1}) = -\alpha \frac{e_r}{r^2} \quad (2.15)$$

Kütle değişimini hız ve yoğunluk cinsinden ifade eden denklem;

$$\partial_t m = \int_{\partial\Omega} da e_r \cdot (\rho_0 v_{sc}^{(\alpha)}) = -\alpha \rho_0 \int_{\partial\Omega} da \frac{1}{r^2} = -4\pi\alpha\rho_0 \quad (2.16)$$

Parçanın sıkıştırılabilirlik katsayısı;

$$K_p = -\frac{1}{V_p} \frac{\partial V_p}{\partial p} = \frac{1}{\rho_p} \frac{\partial \rho_p}{\partial p} = \frac{1}{\rho_p c_p^2} \quad (2.17)$$

Kütle değişimini sıkıştırılabilirlik katsayısı cinsinden ifade eden denklem;

² İng Multipole Expansion

³ İng Near-Field $r \ll \lambda$

$$\begin{aligned}
\partial_t m &= \partial_t [(\rho_0 + \rho_{in})V_p] = V_p \partial_t \rho_{in} + \rho_0 \partial_t V_p = V_p \partial_t \rho_{in} + \rho_0 \frac{\partial V_p}{\partial p} \partial_t p_{in} \\
&= V_p \partial_t \rho_{in} - \rho_0 \frac{V_p}{\rho_p c_p^2} c_a^2 \partial_t \rho_{in} = \left[1 - \frac{\rho_0 c_a^2}{\rho_p c_p^2} \right] V_p \partial_t \rho_{in} \quad (2.18)
\end{aligned}$$

(2.18) ve (2.16) eşitlendiğinde monopul terimden kaynaklanan dağılan hız potansiyeli elde edilir;

$$\varphi_{sc}^{(\alpha)} = -\frac{a^3}{3\rho_0} \left[1 - \frac{\rho_0 c_a^2}{\rho_p c_p^2} \right] \partial_t \rho_{in} \frac{1}{r} \quad (2.19)$$

Dipol terim hesaplanırken parça duvarındaki hızın sürekliliği kullanılır. Kutup ekseninin gelen akustik dalganın hızını (v_{in}) gösterdiği küresel bir koordinat sisteminin merkezinde bir parçacık olduğunu varsayalım. Bu durumda;

$$\varphi_{in} = v_{in} r \cos \theta \quad (2.20)$$

Hız vektörünün sınırlarda sürekli olduğu düşünülürse ve (2.13)'de bu durum göz önüne alınırsa $v_p = v_{in} + v_{sc}^{(\beta)}$ denklemi yazılabilir. Bu denklemden, kütlelen bağımsız olan v_{sc} terimi çekilip (2.14)'da yerine konulursa;

$$(v_p - v_{in}) \cdot e_r = \partial_r \varphi_{sc}^{(\beta)} = -\frac{2\beta}{r^3} \Big|_{r=a} (v_p - v_{in}) \cdot e_r = -\frac{2\beta}{a^3} (v_p - v_{in}) \cdot e_r \quad (2.21)$$

(2.21)'den $\beta = -a^3/2$ elde edilir ve dipol terimden kaynaklanan hız potansiyeli aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\varphi_{sc}^{(\beta)} = -\frac{a^3}{2r^2} (v_p - v_{in}) \cdot e_r \quad (2.22)$$

v_p terimini bulmak için parçanın içinde ve sıvının içinde Laplace denklemi $\nabla^2 \varphi = 0$ çözülür. Sınır koşulları olarak sınırlardaki hız ($\partial_r v_1 = \partial_r v_p$) ve basınç sürekliliği ($\rho_0 \varphi_1 = \rho_p \varphi_p$) kullanılır. Çözüm yapıp gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra dipol terimden kaynaklanan hız potansiyeli;

$$\varphi_{sc}^{(\beta)} = \frac{\rho_p - \rho_0}{2\rho_p + \rho_0} \frac{a^3 v_{in} \cos \theta}{r^2} \quad (2.23)$$

(2.19) ve (2.23) birleştirildiği zaman dağılan dalgaların toplam hız potansiyeli,

$$\varphi_{sc}^{(\beta)} = -f_1 \frac{a^3 \partial_t \rho_{in}}{3\rho_0 r} + f_2 \frac{a^3 v_{in} \cos\theta}{2r^2}, \quad r \ll \lambda \quad (2.24)$$

Denklemden geçen sadece madde özelliklerine bağlı f_1 ve f_2 katsayıları,

$$f_1 = 1 - \frac{\rho_0 c_a^2}{\rho_p c_p^2} \quad \text{ve} \quad f_2 = \frac{2(\rho_p - \rho_0)}{2\rho_p + \rho_0} \quad (2.25)$$

Kuvvetin, ikinci derece basınç ortalaması ve momentum akı tensörünün toplamının parça yüzeyi üzerinde integral alınması ile hesaplandığı (2.10)'da yazılmıştı. Kuvvet integrali alınırken önemli olan nokta her ne kadar hız potansiyeli katsayıları yakın bölgede hesaplanmış olsa da kuvvet integralinin uzak bölgede hesaplanmasıdır.

Yakın alan potansiyeli ve dalga denklemi kullanılarak uzak alan potansiyeli hesaplanabilir,

$$\varphi_{sc}(r, t) = -f_1 \frac{a^3}{3\rho_0} \frac{\partial_t \rho_{in}(t-r/c_a)}{r} + f_2 \frac{a^3}{2} \nabla \cdot \left(\frac{v_{in}(t-r/c_a)}{r} \right), \quad r \ll \lambda \quad (2.26)$$

Gelen ve dağılan potansiyel bilindiğine göre toplam potansiyel hesaplanarak kuvvet integrali alınabilir. Kuvvet integrali alınıp bazı ihmal ve düzenlemeler yapıldığında kuvvet denklemi elde edilir,

$$\mathbf{F}^{\text{rad}} = -\nabla U^{\text{rad}} \quad (2.27a)$$

$$U^{\text{rad}} = \frac{4\pi}{3} a^3 \left[f_1 \frac{1}{2\rho_0 c_a^2} \langle p_{in}^2 \rangle - f_2 \frac{3}{4} \rho_0 \langle v_{in}^2 \rangle \right] \quad (2.27b)$$

Denklem U^{rad} radyasyon potansiyelini ifade eder, kuvvet ise radyasyon potansiyelinin ıraksığının eksi işaretlisidir. Bulunan kuvvet denklemi sadece malzeme özelliklerine, hız alanına ve basınç alanına bağlıdır. Analizlerde akustik kuvvet numerik metotla hesaplanırken (2.27) kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modelinden elde edilen basınç ve hız değerleri MATLAB programına girilmiş, daha sonra bu girdiler kullanılarak kuvvet hesabı yapılmıştır.

Dikdörtgen kanal içerisinde sadece tek ekseninde durağan dalga oluştuğu varsayılırsa akustik potansiyel, hız alanı, basınç alanı ve yoğunluk alanı aşağıdaki gibi olur,

$$\varphi_{in}(y, t) = \frac{1}{k} u_0 \cos(ky) \cos(\omega t) \quad (2.28a)$$

$$v_{in}(y, t) = \nabla \varphi_{in} = -u_0 \sin(ky) \cos(\omega t) e_x \quad (2.28b)$$

$$p_{in}(y, t) = -\rho_0 \partial_t \varphi_{in} = \rho_0 c_a u_0 \cos(ky) \sin(\omega t) \quad (2.28c)$$

$$\rho_{in}(y, t) = -\frac{\rho_0}{c_a^2} \partial_t \varphi_{in} = \rho_0 \frac{u_0}{c_a} \cos(ky) \sin(\omega t) \quad (2.28d)$$

Burada $k = 2\pi/\lambda$ birim uzunluktaki dalga sayısını, y parçacığın y eksenindeki konumunu, e_x x eksenini yönündeki birim vektörü ifade etmektedir. (2.28)'deki değişkenler (2.27)'de yerine konur ise radyasyon potansiyeli,

$$U^{rad} = \pi a^3 \rho_0 u_0^2 \left[f_1 \frac{1}{3} \cos^2(ky) - f_2 \frac{1}{2} \sin^2(ky) \right] \quad (2.29)$$

Dalga tek boyutlu olduğu için radyasyon potansiyelinin sadece bir ekseninde kısmi türevinin alınması yeterlidir.

$$\begin{aligned} F_y^{rad} &= -\partial_y U_y^{rad} = 2\pi k a^3 \rho_0 u_0^2 \left[f_1 \frac{1}{3} \cos(ky) \sin(ky) + f_2 \frac{1}{2} \sin(ky) \cos(ky) \right] \\ &= 4\pi k a^3 \left(\frac{1}{4} \rho_0 u_0^2 \right) \left[\frac{\rho_p + \frac{2}{3}(\rho_p - \rho_0)}{2\rho_p + \rho_0} - \frac{1}{3} \frac{\rho_0 c_a^2}{\rho_p c_p^2} \right] \sin(2ky) \end{aligned} \quad (2.30)$$

Daha genel bir halde yazılır ise,

$$F_y^{rad} = 4\pi a^2 (ka) E_{ac} \Phi \sin(2ky) \quad (2.31a)$$

$$\Phi = \frac{\rho_p + \frac{2}{3}(\rho_p - \rho_0)}{2\rho_p + \rho_0} - \frac{1}{3} \frac{\rho_0 c_a^2}{\rho_p c_p^2} \quad (2.31b)$$

$$E_{ac} = \frac{1}{4} \rho_0 u_0^2 = \frac{p_a^2}{4\rho_0 c_a^2} \quad (2.31c)$$

Denklemden E_{ac} akustik enerji yoğunluğu, Φ ise akustik kontrast faktörünü, p_a ise basınç genliğini ifade eder.

Parça akış olmayan bir kanal içerisinde akustik kuvvete maruz kaldığında hareket esnasında bu kuvvete karşılık sıvı içerisinde sürüklenme kuvveti oluşacaktır. Bu iki kuvvet eşitlenir ise ortaya çıkan diferansiyel denklem,

$$6\pi\eta a \frac{dy}{dt} = 4\pi a^2 (ka) E_{ac} \Phi \sin(2ky) \quad (2.32)$$

Denklemin sol tarafı sürüklenme sağ tarafı ise akustik kuvveti ifade etmektedir. Belirtilen diferansiyel denklem çözülür ise parçanın akustik alan yönündeki konumunun zamana bağlı denklemi dikdörtgen kesitli bir kanal için elde edilir,

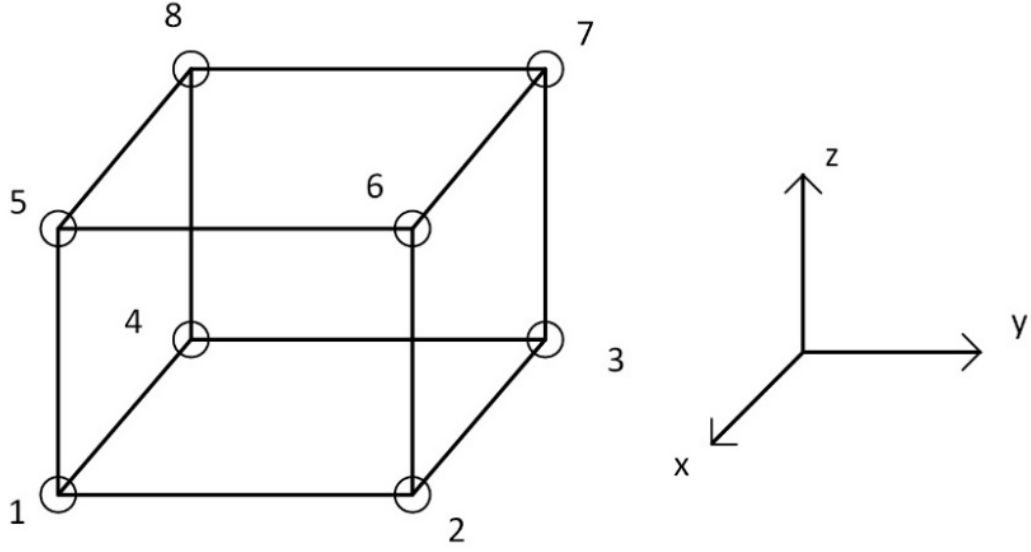
$$y(t) = \frac{1}{k_y} \arctan \left\{ \tan[ky(0)] \exp \left[\frac{4\Phi}{9} (k_y a)^2 \frac{E_{ac}}{\eta} t \right] \right\} \quad (2.33)$$

(2.33)'te $y(0)$, parçanın akustik alandaki başlangıç konumunu göstermektedir. Akustik kuvvetin ve parça hareketinin analitik çözüldüğü yöntemde bu denklem kullanılmaktadır.

2.2 Üç Boyutta İnterpolasyon

Simülasyonda sonlu elemanlar metodu kullanıldığında akış veya akustik analiz sonuçlarının MATLAB programında kullanılabilmesi için interpolasyon yapılması gerekmektedir. COMSOL programı ile çözülen sonlu eleman modelinden çıktı olarak belirlenen geometride belirlenen aralıklarla oluşturulan köşe noktalarındaki değerler alınabilir. Akış analizi yapıldıysa bu değerler akış hız vektörü bileşenlerini ifade eder, akustik analiz yapıldıysa basınç alanı ve üç eksenindeki hız alanlarını ifade eder.

Programdan çıktı alınan dosya, liste şeklinde her bir köşe noktasının üç eksenindeki koordinatını ve o köşe noktasındaki değerini içerir. Yani kanal içerisinde sadece köşe noktalarının olduğu kısımlarda çözüm değerleri bilinmektedir. Hâlbuki parçacıklar kanal içerisine herhangi bir noktada olabilirler bu nedenle istenen noktadaki çözüm değerinin elde edilmesi için üç boyutlu interpolasyon yapılmıştır. İnterpolasyon yapılırken sonlu elemanlar metodu içerisinde yer alan şekil fonksiyonları kullanılmıştır. Şekil 2.1'de sekiz köşe noktası bulunduran hexahedron elemanın şekli verilmiştir.



Şekil 2.1 Hexahedron eleman köşe noktaları

Şekildeki yuvarlaklar köşe noktalarını göstermektedir. Köşe noktalarındaki değerler bilindiği zaman küp içerisinde konumu bilinen herhangi bir noktanın değeri köşe noktalarından şekil fonksiyonları ile interpolasyon yapılarak hesaplanabilir. Hexahedron eleman için şekil fonksiyonları [29];

$$N_1 = \frac{1}{8} (1 - \xi^g)(1 - \eta^g)(1 - \mu^g), \quad N_2 = \frac{1}{8} (1 + \xi^g)(1 - \eta^g)(1 - \mu^g) \quad (2.34a)$$

$$N_3 = \frac{1}{8} (1 + \xi^g)(1 + \eta^g)(1 - \mu^g), \quad N_4 = \frac{1}{8} (1 - \xi^g)(1 + \eta^g)(1 - \mu^g) \quad (2.34b)$$

$$N_5 = \frac{1}{8} (1 - \xi^g)(1 - \eta^g)(1 + \mu^g), \quad N_6 = \frac{1}{8} (1 + \xi^g)(1 - \eta^g)(1 + \mu^g) \quad (2.34c)$$

$$N_7 = \frac{1}{8} (1 + \xi^g)(1 + \eta^g)(1 + \mu^g), \quad N_8 = \frac{1}{8} (1 - \xi^g)(1 + \eta^g)(1 + \mu^g) \quad (2.34d)$$

Denklemden μ^g, η^g, ξ^g genelleştirilmiş koordinatları, N_i i'nci şekil fonksiyonunu ifade eder. Genelleştirilmiş koordinatlar küp içerisindeki herhangi bir konumu köşe noktalarına göre normalize ederek ifade eder. Çizelge 2.1'de köşe noktaları koordinatları genelleştirilmiş koordinatlar cinsinden ifade edilmiştir.

Çizelge 2.1 Köşe noktaları genelleştirilmiş koordinatları

Köşe noktası	ξ	η	μ
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	1	1	-1
4	-1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	1	1	1
8	-1	1	1

Çözümün istendiği koordinatlar genelleştirilmiş koordinatlar cinsinden bulunur. Bulunan genelleştirilmiş koordinatlar için 8 adet şekil fonksiyonu hesaplandıktan sonra (2.35) kullanılarak o konumdaki değer hesaplanabilir [30].

$$u(x) = N_1u_1 + N_2u_2 + N_3u_3 + N_4u_4 + N_5u_5 + N_6u_6 + N_7u_7 + N_8u_8 \quad (2.35)$$

Denklemden u_i i'inci köşedeki değerleri, u hesaplanan değeri ifade eder. Bu şekilde istenen konumdaki hız veya basınç değerleri komşuluğundaki 8 köşe noktasındaki değerler kullanılarak hesaplanabilir.

2.3 Çip ve Kanal Genişliği Formülü

Çip tasarımı yapılırken çip ve kanal genişliği hesaplamada kullanılan formüller (2.36) ve (2.37)'de verilmiştir [25],

$$w_{kanal} = n_k \lambda_{kanal} / 2 \quad (2.36)$$

$$w_{çip} = w_{kanal} + n_ç \lambda_{çip} / 2 \quad (2.37)$$

w_{kanal} ve $w_{çip}$ kanal ve çip genişliklerini, λ_{kanal} ve $\lambda_{çip}$ kanal ve çip içerisindeki akustik dalga boylarını ifade etmektedir. n_k sayısı parçacıkların kanal içerisinde toplanma noktalarını belirler. $n_ç$ sayısı ise çip boyutunu belirler. Bu denklemler kullanılarak çip içerisinde maksimum genlikli durağan dalga oluşumu amaçlanır.

2.4 Laminar Hız Profili

Düz kanal kesitlerinde hız değerleri analitik bağıntılar ile hesaplandı. Laminar akışın olduğu bir kanal içerisinde süreklilik denklemi ve üç eksendeki momentumun korunumu denklemlerinden yola çıkarak (2.38) ve (2.39) elde edildi.

$$K = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(1-(-1)^n)^2 (1-(-1)^m)^2}{(\lambda^2 + \beta^2) \lambda^2 \beta^2} \quad (2.38)$$

$$u = \frac{4K}{w \cdot h} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(1-(-1)^n)(1-(-1)^m) \sin(\beta \cdot z) \sin(\lambda \cdot y)}{(\lambda^2 + \beta^2) \cdot \lambda \cdot \beta} \quad (2.39)$$

Denklemde $\lambda = n * \pi/w$, $\beta = m * \pi/h$, w kanal genişliği, h kanal yüksekliğidir.

3. NÜMERİK SİMÜLASYONLAR

Parçacık/hücre manipülasyon işlemlerinde kullanılacak çiplerin tasarlanmadan önce optimize edilebilmesi için simülasyon metotları geliştirildi. Daha önceden belirtildiği gibi bütün dinamikleri kapsayan tam bir modelin çözülmesi günümüz bilgisayarları ile çok uzun zaman almaktadır. Tam bir modelde akustik dalga oluşturmada kullanılan piezo malzeme bulunması çözüme elektrik, akustik ve yapısal dinamiklerin eklenmesini gerektirir. Tek başına bu durum bile işlem yükünü oldukça arttırmaktadır. Üstelik çok yüksek frekanslarda ($\sim 2\text{MHz}$), dalga boyları oldukça küçüktür ($\sim 0,5\text{mm}$) dolayısıyla oluşturulan çözüm ağındaki eleman boyutları da oldukça küçülmektedir. Genel görüş olarak bir dalga boyunda 6 eleman bulundurulması yeterlidir. Kanal ve çip geometrisinin de ince ($\sim 350\ \mu\text{m}$) ve çok uzun ($\sim 20\text{-}30\ \text{mm}$) olduğu düşünülür ise çözümü çok zor, hatta çok yüksek bellek kapasitesi gerektirdiği için çözülemeyen bir model ortaya çıkmaktadır. Parçacıkların akış ve akustik kuvvet nedeni ile hareketli olduğu da düşünülürse parçacıkların birbirleri ile iç içe geçmelerini engelleyecek ve konumlarının kaydını tutacak bir bilgisayar programı da yazılmadığıdır. Bahsedilen modelin, parçacıkların her hareketinden sonra tekrar ağ oluşturulup çözülmesi de gerekmektedir. Doğru sonuçların elde edilebilmesi için parçacık hareketinin küçük zaman aralıkları ($\sim 0,02\ \text{s}$) ile yapılması gerektiği de düşünülürse, tam bir simülasyon yapabilmek için çözümü çok uzun süren bir modelin binlerce defa çözümü yapılmalıdır.

Tam bir modelin çözümü çok zor olduğu için bazı ihmaller ve kabuller yapılarak çözüm basitleştirilmeye çalışılmıştır. Farklı simülasyon metotları denendiği için yapılan kabuller değişiklik göstermektedir fakat bazı kabuller her metot için geçerlidir. Bu kabullerden ilki, parçacıkların birbiri ile etkileşime girmediğidir yani parçacıklar birbirleri ile çarpışmazlar veya birbirlerine yapışmazlar. Akış içerisinde çarpışma yaşanma ihtimali gerçekte de düşüktür çünkü parçacıklar akış çizgilerini takip ederler, aynı akış çizgisi üzerindeki bütün parçacıklar aynı hızla hareket edeceği için çarpışma ihtimali azdır. Akustik alan içerisinde akışa dik hareket esnasında çarpışma yaşansa bile parçacıkların yörüngelerinde kayda değer bir sapma yaşanmaz. Bu kabul ile parçacıkların yörüngeleri birbirinden bağımsız olarak teker teker hesaplanabilir

böylelikle parçaların birbirleri ile ilişkisini kontrol eden bir programa ihtiyaç kalmaz. İkinci kabul ise parçacıkların akustik alanı bozmadıklarıdır. Kanal boş iken titreştirildiğinde oluşan basınç ve hız alanları, kanal içerisinde parçacıklar varken de aynıdır. Başka bir deyiş ile bir parçacığın çevresindeki başka bir parçacık, o parçacığa etkiyen kuvvetin yönünü ve büyüklüğünü etkilemez. Parçacık boyutu mikrometre seviyesinde olduğu ve akustik özellikleri suya yakın olduğu sürece bu kabul geçerlidir. Bu durum sonlu elemanlar modeli oluşturularak denendi, kanalın içerisine konulan 5µm çapında Polystrene küre parçacığın komşu bölgelerindeki basınç alanında değişime neden olmadığı görüldü. Bu kabul sayesinde hareketli çözüm ağı kullanılarak modelin defalarca çözülmesi yerine boş kanal kullanılarak bir kere çözülmesi yeterli olmaktadır. Başka bir kabul ise parçacıkların akış ile birlikte hareket ettikleri ve kütlelerinin olmadığıdır. Bu durumda parçacıklar ivmelendikleri esnada veya kanal dönüşlerinde üzerlerine herhangi bir kuvvet etki etmeyecektir. Aynı şekilde yer çekiminden dolayı herhangi bir kuvvet oluşmayacak ve çökme meydana gelmeyecektir. Bu yaklaşım parçacıklar küçük olduğu için ve kanal içerisinde çok uzun süre durmayacakları için geçerlidir [31]. Parçacık üzerine sadece akustik alan içerisinde akustik kuvvet ve sürüklenme kuvveti etkiyecek, böylelikle hesaplama daha basit bir hal almaktadır.

Simülasyondaki amaç parçacıkların yörüngelerini hesaplayabilmek ve kanal sonunda hangi çıkıştan çıktığını kestirebilmektir. Simülasyon yaparken daha önceden belirtildiği gibi yörüngeler teker teker hesaplanır ve parçacıkların akış ile birlikte hareket ettiği varsayılır. Parçacıkların kanal içinde bulunduğu konuma göre hız bileşenleri hesaplanır, bulunan hız bileşenlerine göre hareket mesafesi sabit olacak şekilde zaman adımı hesaplanır. Yeni hız ve zaman adımına göre parçacığın yeni konumu hesaplanır. Bu şekilde parçacık kanal içerisinde hareket ettirilir. Eğer akustik alana girilmiş ise akustik kuvvetten kaynaklanan yer değiştirme de hesaba katılarak yeni konum hesaplanır. Parçacık hareketini çıkış kanallarından birinden çıkıncaya kadar devam ettirir. Çıkış yaptığı anda ise parçacığın diğer bilgileri ile birlikte çıkış yaptığı kanal da kaydedilir.

Çizelge 3.1 Malzemelerin akustik özellikleri

	Tuzlu Su Çözeltisi	Polystrene [32]	PDMS [33]	Silikon
Yoğunluk [kg/m ³]	1005	1050	970	2329
Ses Hızı [m/s]	1500	2350	1070	8400
Sönümlenme Katsayısı @3MHz [dB/cm]	-	-	10,14	-

Zaman adımı hızlı hareket eden parçacıklar için küçük, yavaş hareket eden parçacıklar için büyük seçilmelidir. Yavaş hareket eden parçacıklar için küçük zaman adımı seçilirse parçacık çok küçük aralıklarla hareket eder ve kanalı terk etmesi için çok sayıda iterasyon yapılması gerekir. Çok sayıda iterasyon yapılması, hem hesaplama vaktini arttıracak hem de çok fazla bilgi olduğu için sonuçların işleme zamanını arttıracaktır. Hızlı hareket eden parçacıklar için büyük zaman adımı seçilir ise hassasiyet azalacak, uzun zaman adımı boyunca bazı hareketler kaçırılmış olacak ve hata oranı büyüyecektir. Kanal içerisinde hareket eden hem yüksek hızda hem de düşük hızda parçacıklar vardır hatta parçacıklar farklı bölgelerde farklı hızlarla hareket etmektedir. Bu nedenle tek bir zaman sabiti kullanılması durumunda ya doğruluktan ya da hesaplama süresinden ödün verilmesi gerekmektedir. Çözüm olarak değişken zaman sabiti kullanılmıştır. Parçanın bileşke hız vektörü hesaplandıktan sonra sabit yol (~10 μ m) alacak şekilde hız sabiti belirlenmiştir. Böylece hem doğruluk artırılmış hem de hesaplama süresi azaltılmıştır.

Parçacıkların polystrene malzemedan yapıldığı ve kanalın tuzlu su çözeltisi ile dolu olduğu kabul edilmiştir. Analizlerde kullanılan malzemelerin akustik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Simülasyon parametrelerinin hepsi tam olarak bilinemez veya deneysel olarak ölçülemez. Bunlar, parçacıkların başlangıç konumları, yarıçapları ve analitik akustik kuvvet denkleminin kullanıldığı durumda akustik enerji yoğunluğudur (E_{ac}). Deneysel olarak kullanılan parçacık boyutlarının belirli bir ortalama değeri olsa da

parçacıkların kimisi bu değerden daha büyük kimisi de daha küçüktür. Böyle ufak sapmaların sistem performansına etkisi oldukça fazladır. Bu nedenle parçacık boyutları belirli bir ortalama değeri etrafında standart sapma olacak şekilde belirlenmiştir. Aynı şekilde parçacıkların başlangıç konumları da ölçülemez ve performansı etkilemektedirler. Parçacıkların başlangıç konumları belirlenen alanlarda düzgün dağılım gösterecek şekilde belirlenmiştir. Deneylerdeki belirsizlikler bu şekilde simüle edilmiştir, bu yaklaşıma Monte-Carlo Metodu denmektedir. Bu tip bir yaklaşım kullanıldığı zaman sonucun güvenilir ve tekrarlanabilir olabilmesi için simülasyonların yüksek parçacık sayısı ile yapılması gerekmektedir. 20 adet parçacık ile yapılan simülasyonlar her seferinde çok farklı sonuçlar verebilir. Farklı sayıda parçacıkla simülasyonlar yapılmış göreceli hatanın kabul edilebilir seviyeye düştüğü aralıktaki parçacık sayıları kullanılmıştır. Belirlenen aralık 700-800 parçacıktır.

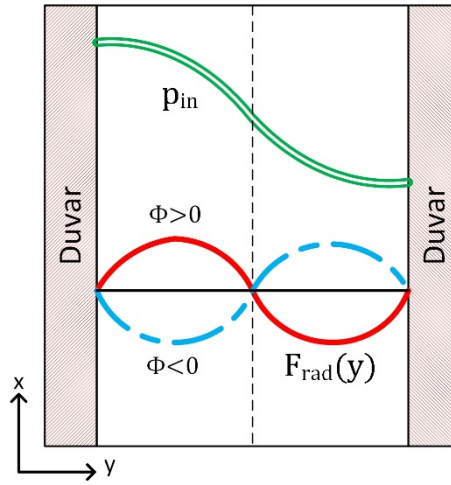
Buraya kadar yazılanlar bütün simülasyon metodlarında geçerlidir. Simülasyon metodları arasındaki farklılıklar akustik kuvvet ve akış hızlarının hesaplanması sırasında ortaya çıkmaktadır. Akustik kuvvet analitik formüllerle veya sonlu elemanlar metodu kullanılarak çözdürülebilir aynı durum akış için de geçerlidir. İlk simülasyon çalışmaları analitik formüller ile yapılarak daha sonra daha karmaşık algoritmalar yazılarak sonlu elemanlar metodu da kullanılmıştır.

3.1 Akustik Alan ve Akış Alanı için Analitik Yaklaşımlar

Akustoforezin gerçekleşmesi için kanal içerisinde akustik alan oluşturulmalıdır. Bunun için piezo malzemeler kullanılmaktadır. Çipin üstüne veya kenarlarına yerleştirilen piezo malzeme belirli bir frekansta belirli bir voltaj genliği ile titreştirilir. Bu titreşimlerin oluşturduğu dalgalar çip içerisinde üç eksen de yayılırlar. Bu dalgaların bir kısmı kanal duvarlarını titreştirerek kanal içerisinde akustik alanı oluşturur.

Bu kısımda akustik alanın nasıl ve ne şekilde oluştuğu ele alınmamıştır. Kanal içerisinde Şekil 3.1'de gözüktüğü gibi sadece kanalın enine doğru yarım akustik durağan dalga oluştuğu varsayılmıştır. Aynı kabuller yapılarak çıkartılan (2.31a) kullanılarak böyle bir akustik alanda parçacığa etkiyen akustik kuvvet büyüklüğü ve

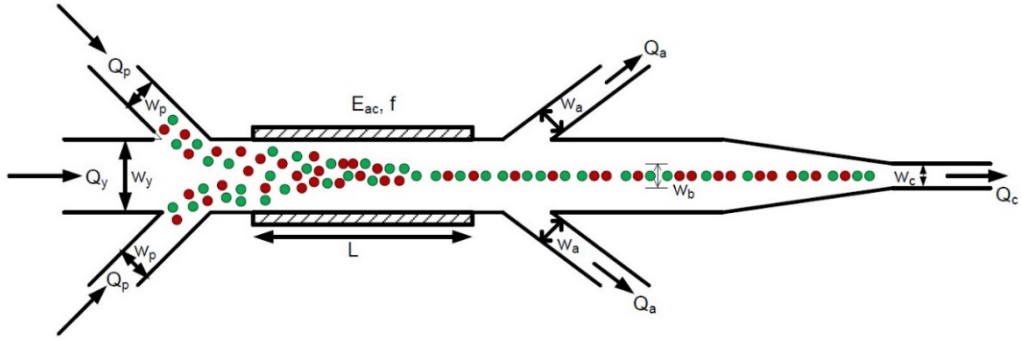
yönü Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Kırmızı çizgi akustik kontrast faktörü sıfırdan büyük parçacıklara etki eden kuvveti, kesikli mavi çizgi kontrast faktörü sıfırdan küçük parçacıklara etki eden kuvveti göstermektedir. İki çizgi arasında görülen yatay ince çizgi sıfır kuvvet noktasını gösterir. Şeklin sol altındaki koordinat sistemine göre pozitif kuvvet parçacığı sağ duvara doğru, negatif kuvvet ise parçacığı sol duvara doğru hareket ettirir. Böylece akustik kontrast faktörü sıfırdan büyük parçacıkların kanalın ortasına, küçük olanların ise kanalın dışına doğru hareket ettiği söylenebilir.



Şekil 3.1 Basınç ve kuvvet dağılımı

Parçacık yıkama işleminin simülasyonu yapılmıştır. Yıkama ünitesinin amacı parçacıkları içinde bulunduğu çözeltiden başka bir çözeltime aktarmaktır. Bu fonksiyonu gerçekleştirmek için Şekil 3.2’deki gibi bir sistem planlanmıştır. Şekilde a indisi atık sıvıyı, p indisi parçacık taşıyan sıvıyı, c indisi yıkanmış parçacıkların bulunduğu sıvıyı, y indisi de yıkayan sıvıyı temsil etmektedir. İçi taralı görülen kısım piezoyu, L ise piezo uzunluğunu göstermektedir. Burada yan giriş kanallarından parçacıkların içinde bulunduğu çözelti Q_p debisi ile akmaktadır. Orta giriş kanalından ise Q_y debisi ile yıkamada kullanılacak sıvı akmaktadır. Ana kanalın genişliği w_y ve yan kanalların ise w_p ’dir. Burada Q_y akış debisi Q_p ’den çok daha yüksektir bu sayede yıkayan sıvı kanal içerisinde daha geniş yer tutarak parçacıkları taşıyan sıvıyı duvarlara doğru iter. Duvara itilen parçacıklar kanalın orta kısmında akan temiz sıvıya geçmelidir. Parçacıkları ortaya getirmek için kanalda ultrasonik dalgalar kullanılarak bir basınç alanı oluşturulur ve bu alandan kaynaklı oluşan akustik kuvvetler

parçacıkları kanalın ortasına iter. Çıkışta ise temiz sıvı içinde parçacıklar ile birlikte kanalın ortasından, kirli sıvı ise bir kısım temiz sıvı ile birlikte içinde parçacık olmaksızın yan kanallardan alınır. Burada önemli bir çıktı parçacıkların ultrasonik alandan çıktıktan sonra merkezden olan dağılımı w_b değeridir. w_b ne kadar küçük ise parçacıklar yüksek yoğunlukta kanalın ortasına toplanmış demektir. Kanalın ortasında yıkayan sıvı olduğu için yıkamanın başarılı olduğunu gösterir. Burada hedef w_b/w_y oranı 0,1 olarak seçilmiştir. Bu oranın etkin bir yıkama için yeterli olacağı düşünülmüştür.



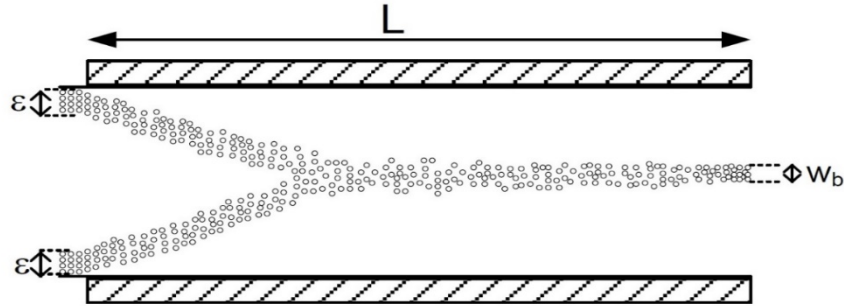
Şekil 3.2 Yıkama ünitesi

Simülasyon yapılırken sadece akustik alanın bulunduğu kısım ele alınmıştır. Akış laminar olduğu için ve sadece düz kanal kesitinde hızın hesaplanması gerektiği için Bölüm 2.4'te verilen analitik ilişkiler kullanılmıştır. Akustik kuvvet ve bu kuvvetten dolayı oluşan hareket (2.33) kullanılarak analitik yaklaşımla çözülmüştür. Parçaların akustik alana Şekil 3.3'te gösterildiği gibi duvar diplerindeki belirli bir konum aralığından (ϵ) dağılım göstererek girdiği düşünülmüş ve buna göre simülasyon yapılmıştır. Dalga sayısı (k) buna bağlı olarak frekans, seçilen genişliğe yarım dalga oturacak şekilde $k = 2\pi/\lambda$ formülüne göre belirlenir. Dalga sayısı 375 μm kanal için 8491, 750 μm kanal için 4245'tir. Yarım dalga oluşturulmasının amacı parçacıkların kanalın ortasına toplamaktır. Tam bir dalga oluşturulsaydı parçacıklar kanalın çeyrek genişliklerinde iki farklı çizgide toplanırdı. Çeyrek dalgada ise kanal duvarında toplanırlardı.

Çizelge 3.2 Nümerik simülasyon sonuçları-1($E_{ac}:40J/m^3$,Debi:0,4ml/dak.)

Kanal Genişliği	Kanal Boyu	Giriş Aralığı	Bant Genişliği (wb) (μm)	Bant/Kanal Genişliği
375 μm	5 mm	1/3	355.05	0.947
		1/5	355.55	0.948
	10 mm	1/3	345.15	0.920
		1/5	348.40	0.929
	15 mm	1/3	337.23	0.899
		1/5	340.60	0.908
750 μm	5 mm	1/3	729.57	0.973
		1/5	731.81	0.976
	10 mm	1/3	722.19	0.963
		1/5	724.08	0.965
	15 mm	1/3	718.24	0.958
		1/5	722.04	0.963

Parçacık çapları 5 μm ortalama değer etrafında %10 standart sapma olacak şekilde belirlenmiştir. İlk yapılan simülasyonlarda akustik enerji yoğunluğu E_{ac} : 20 J/m^3 , akış debisi Q_y+Q_p :0,4ml/dak. alınmıştır. Kanal genişliği, kanal boyu ve giriş aralıkları değiştirilerek alınan sonuçlar Çizelge 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.3 Akustik alan içerisinde parçacık hareketi

Bulunan değerler göstermektedir ki bu debide ve kullanılan E_{ac} değeri için parçacıklar ortaya çok az miktarda toplanmaktadır. Giriş aralığı (ϵ) sonuçları çok etkilememektedir. Çizelge 3.2’de görüldüğü üzere piezoelektrik malzemenin titreştirdiği kanal boyu uzadıkça bant genişliği (saçılım) azalmakta ve parçacıklar ortaya toplanmaktadır. Ayrıca piezodan verilen aynı enerji yoğunluğu için 750 μm ’lik

kanalda parçacıklar ortaya daha az hareket etmektedir. Bu yüzden parçacıkların ortaya hareketlendirilmesi açısından 375 µm ve 2MHz frekansı daha verimlidir. Teorik olarak da aynı basınç genlikli dalgaların yüksek frekanslarda daha yüksek kuvvet oluşturması olması beklenir.

E_{ac} değeri 40 J/m³'e çıkartılıp sabit $\epsilon=1/3$ değeri kullanılarak, farklı akış debileri, kanal boyları ve kanal genişlikleri için analizler tekrarlanmıştır. Analiz sonuçları Çizelge 3.3'te verilmektedir.

Çizelge 3.3'teki sonuçlarda görüldüğü üzere E_{ac} iki katına çıkarıldığında ve akış debisi 0.04ml/dak'ya indirildiğinde hedeflenen 0,1 bant/kanal genişliği oranına erişilmektedir. 750µm genişliğindeki kanalda ise hiç bir akış değeri için $E_{ac} = 40$ J/m³ iken istenilen 0,1 oranına erişilmemektedir. Debinin küçük olmasının avantajı kanal içerisinde parçacıkların daha yavaş hareket etmesi ve daha uzun süre boyunca akustik kuvvete maruz kalmasıdır. Böylelikle parçaların gitmeleri gereken yere ulaşmaları kolaylaşmaktadır. Dezavantajı ise sistemin birim sürede yıkayacağı parçacık sayısının düşmesidir.

Akış debisi 0,04 ml/dak.'ya sabitlenip 750 µm genişliğindeki kanal için de hedeflenen bant/kanal genişliği elde edilmeye çalışılmıştır. Farklı E_{ac} değerleri ve kanal boyları için yapılan simülasyon sonuçları Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Geniş kanal, üretim ve daha yüksek debileri geçirilebilmesi açısından daha avantajlıdır fakat geniş kanal tasarımlarında hem kanal boyu uzun olmalıdır hem de çipe daha yüksek güç verilmelidir. Bu nedenle 375 µm ve 2Mhz titreşim frekansı bu tip uygulamalar için daha uygundur. Dar kanal tasarımında da uzun kanal düşük güç veya kısa kanal yüksek güç seçenekleri vardır tasarım yapılırken bu sonuçlar göz önüne alınarak tasarım yapılabilir.

Çizelge 3.3 Nümerik simülasyon sonuçları-2($E_{ac}:40J/m^3$)

Kanal Genişliği (μm)	Debi (ml/dak)	Kanal Boyu	Bant Genişliği (wb) (μm)	Bant/Kanal Genişliği
375	0.04	5 mm	224	0.60
		10 mm	97	0.26
		15 mm	36	0.1
	0.10	5 mm	301	0.8
		10 mm	238	0.63
		15 mm	183	0.49
	0.40	5 mm	350	0.93
		10 mm	335	0.89
		15 mm	316	0.84
750	0.04	5 mm	615	0.82
		10 mm	488	0.65
		15 mm	409	0.55
	0.10	5 mm	695	0.93
		10 mm	658	0.88
		15 mm	617	0.82
	0.40	5 mm	722	0.96
		10 mm	716	0.95
		15 mm	701	0.93

Çizelge 3.4 Nümerik simülasyon sonuçları-3

Kanal Genişliği (μm)	Debi (ml/dak)	Giriş Aralığı	E_{ac} (J/m ³)	Kanal Boyu (mm)	Ortalama Band (μm)	Bant/Kanal Genişliği	STD SAP (μm)	Ortalama/STD SAP
375	0.04	1/5	43	15	35.50	0.09	3.17	11.20
			40	15	42.25	0.11	3.64	11.61
			40	10	118.00	0.31	12.40	9.52
			60	10	38.50	0.10	3.02	12.75
			55	10	59.50	0.16	3.85	15.45
			65	10	30.25	0.08	2.13	14.20
750	0.04	1/5	40	25	112.25	0.15	14.00	8.02
			40	30	81.25	0.11	6.90	11.78
			40	35	57.75	0.08	3.59	16.09
			60	15	170.75	0.23	17.80	9.59
			75	15	96.75	0.13	8.90	10.87
			80	15	72.75	0.10	8.30	8.77

Bahsedilen simülasyon yöntemi sistemin akustik performansı ile ilgili epey bilgi verse de akış parametrelerinin ve kanal geometrisinin sistem performansına etkisi bu metot ile belirlenemez.

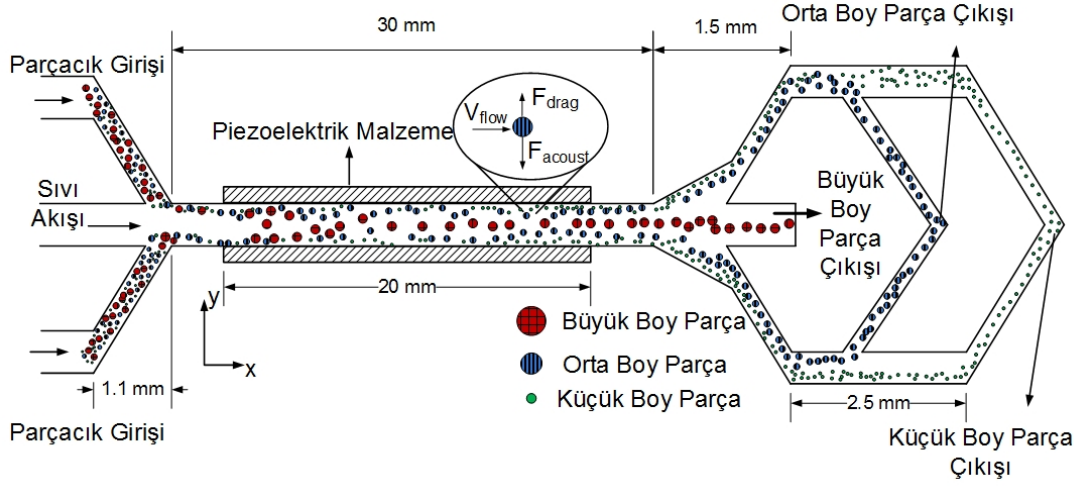
3.2 Akış Alanı için Sonlu Elemanlar Yöntemi

Akış parametrelerinin etkisinin daha ayrıntılı incelenmesi için parçacıkların yan kanallarda yaptığı hareketler ve ana kanala giriş şekli de hesaplanmalıdır. Eğimli yan kanallarda ve kanalların birleşim noktalarında akış hızları hesaplanırken analitik bağıntılar kullanılamayacağı için bu bölgelerde COMSOL programı ile sonlu elemanlar metodu kullanılarak çözüm yapılmıştır.

Akustik alanın etkidiği kanalın düz kesiminde laminar akış olduğu için bu bölgelerde hala analitik bağıntılar kullanılabilir. Bu nedenle sadece giriş ve çıkış bölgeleri için sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Simetrilere dayanarak kanalın sadece dörtte biri çözdürülmüştür. Çözüm sonuçları belirlenen çözüm ağı noktalarında alınmış ve dosya olarak kaydedilmiştir. Daha sonra bu çözüm ağı noktalarındaki değerler kullanılarak istenen koordinattaki hız, Bölüm 3.2’de verilen şekil fonksiyonları kullanılarak interpolasyon yöntemi ile hesaplanmıştır.

3.2.1 Parçacık Ayırıştırma

Akustik kuvvet çözümü için analitik, akış alanı çözümü için sonlu elemanlar metodunun kullanıldığı simülasyon metodu ile parçacık ayırıştırma işlemi simüle edilmiştir. Simülasyon parametreleri bir tanesi dışında literatürdeki deneysel bir çalışmadan [19] alınmıştır, böylelikle sonuçlar karşılaştırılabilmiştir. Literatür çalışmasında farklı boyuttaki aynı özkütleli parçacıkların ayırıştırılması ve aynı boyutta farklı özkütleli parçacıkların ayırıştırılması yapılmıştır. Bu iki durumun simülasyonları yapılmış ayrıca bazı parametreler değiştirilerek sistem performansının nasıl etkilendiği gözlemlenmiştir. Simülasyon parametreleri Çizelge 3.5’te verilmiştir. Simülasyonlar her bir durum için 750 parçacık kullanılarak yapılmıştır.



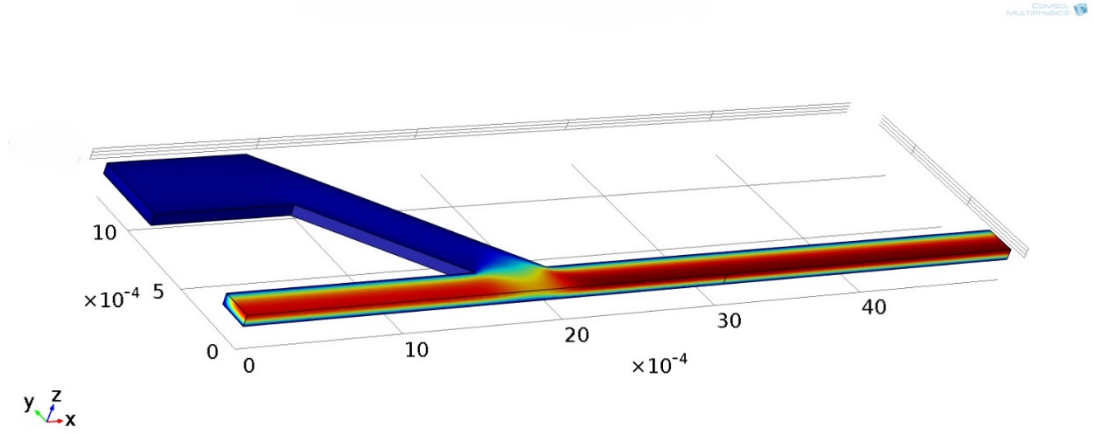
Şekil 3.4 Ayrıştırma ünitesi

3.2.1.1 Boyuta göre Ayrıştırma

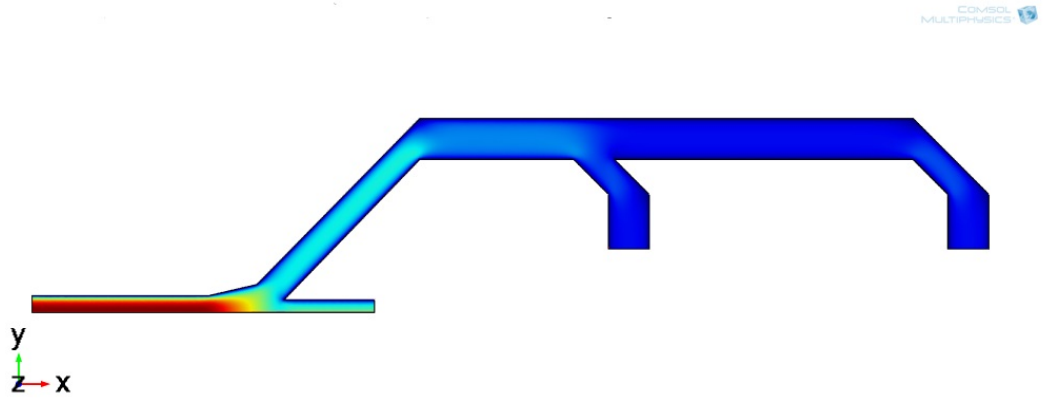
Boyuta göre ayrıştırma birbirinden farklı boyutta 3 parçacık grubunun birbirinden ayrılarak 3 farklı çıkış kanalında toplanması amaçlanmaktadır. Ayrıştırma ünitesinin çalışma biçimi Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

Sonlu eleman modeli oluşturularak giriş/çıkış kısımlarının geometrileri ve akış debileri bahsedilen literatür çalışmasından alınmıştır. Giriş kısmını oluşturan modelin hız profili Şekil 3.5'te gösterilmektedir. Modelin çözüm ağı 132166 elemandan oluşmaktadır. Kanal girişlerinde sınır koşulu olarak istenen debiyi sağlayacak ortalama hız verilmiştir. Çıkışta ise çıkış basıncı 0 Pa verilmiştir. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi parçacıkları taşıyan yan kanallardaki debi ana kanaldaki debiden oldukça düşüktür böylelikle parçacıklar kanal duvarlarına yakın bir şekilde ana kanala girerler.

Çıkış kısmını oluşturan modelin hız profili ise Şekil 3.6'da verilmiştir. Bu modelin çözüm ağında 219030 eleman bulunmaktadır. Kanal girişinde sınır koşulu olarak 0 Pa giriş basıncı verilmiş, kanal çıkışlarında ise toplam debi her bir kanaldan eşit çıkacak şekilde ortalama hız verilmiştir. Kanal duvarlarına "no-slip" sınır koşulu uygulanmıştır.



Şekil 3.5 Kanal girişindeki akış hızı profili



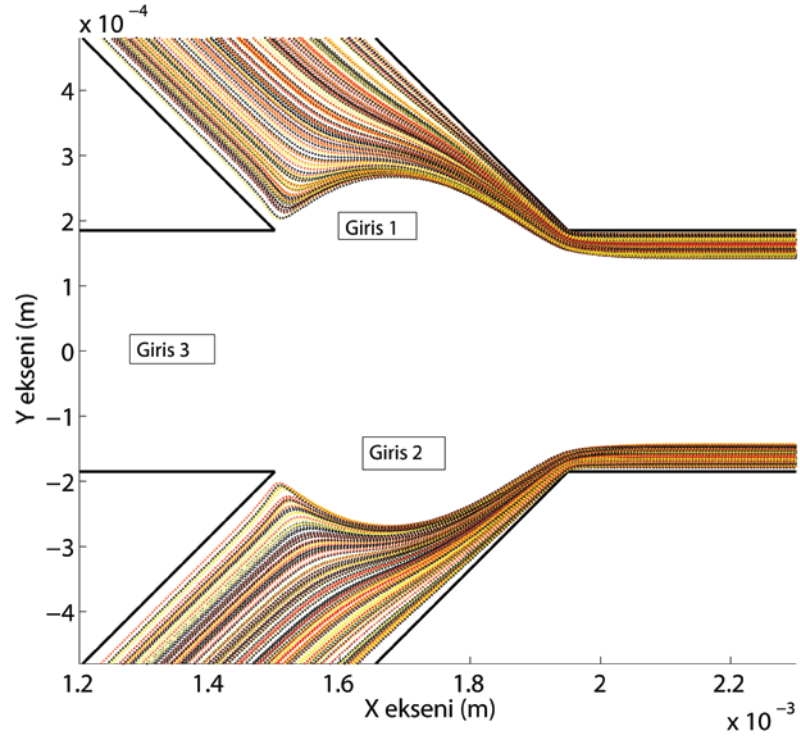
Şekil 3.6 Kanal çıkışındaki akış hızı profili

Parçacıkların simülasyon sırasında izledikleri yörüngeler ayrı ayrı kaydedilmiş daha sonra bu yörüngeler üst üste çizdirilerek parçacıkların ayrıştığı gözlemlenmiştir. Çizimler yapılırken her bir parçacık grubu farklı renklerle gösterilmiştir. Sarı parçacıklar $3 \mu\text{m}$, siyah parçacıklar $7 \mu\text{m}$, kırmızı parçacıklar ise $10 \mu\text{m}$ 'lik parçacıkları göstermektedir. Şekil 3.7'de yan ve orta kanalın birleşim noktasındaki parçacık yörüngeleri gösterilmektedir. Parçacıklar giriş 1 ve giriş 3'ten ana kanala girmektedir. Şekilde görülen balon benzeri şekil yan ve orta kanal arasındaki debi farkından oluşmaktadır. Parçacık grupları şekilde görüldüğü gibi kanala girdikleri esnada birbirleri ile karışmış vaziyettedirler. Ana kanal içerisinde ilerlerken akustik alana girdikleri anda üzerlerine boyutlarına göre kuvvet etkimeye başlar. Büyük olan parçacıklar üzerlerine yüksek kuvvet etkidiği için hızla kanalın ortasına gelirler, orta

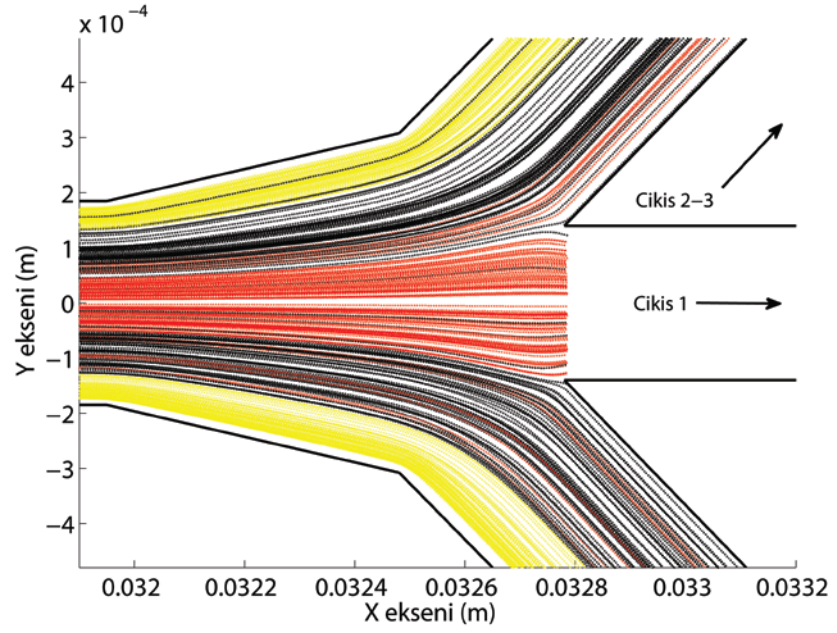
boy parçacıklar duvardan ayrılırlar fakat üzerlerine etkiyen kuvvet daha az olduğu için kanalın ortasına kadar gelemeler. Küçük boy parçacıklar ise çok az hareket ederler ve duvarın dibinden çok fazla ayrılamazlar. Parçacıklar bu şekilde çıkışa geldiğinde ise farklı akış çizgilerini takip ederek farklı kanallardan çıkış yapabilirler. Parçacıkların çıkış kanallarındaki yörüngeleri Şekil 3.8 ve 3.9’da gösterilmektedir.

Çizelge 3.5 Simülasyon parametreleri

	Boyuta göre Ayırıştırma	Özkütleye göre Ayırıştırma	Hızlı Akış ile Boyuta göre Ayırıştırma	Yavaş Akış ile Boyuta Göre Ayırıştırma	Konum Dağılımlarının Etkisi	Yarıçap Dağılımlarının Etkisi
Çap [μm]	3-7-10	3-3	3-7-10			
Çap Standart Dağılım [μm]	0,3-0,7-1	0,3-0,3	0,3-0,7-1			0,6-1,4-2
Parçacık Yoğunlukları[kg/m ³]	1050-1050-1050	1050-1220	1050-1050-1050			
Sıvı Yoğunluğu [kg/m ³]	1005	1160	1005			
Giriş Yan Kanal Debisi	0,04 [ml/dak.]					
Giriş Orta Kanal Debisi	0,36 [ml/dak.]		0,71 [ml/dak.]	0,21 [ml/dak.]	0,36 [ml/dak.]	
Çıkış Kanal Debileri [ml/dak.]	0,13-0,13-0,13	0,13-0,26	0,25-0,25-0,25	0,07-0,07-0,07	0,13-0,13-0,13	0,13-0,13-0,13
Konum Dağılımları	Var				Yok	Var



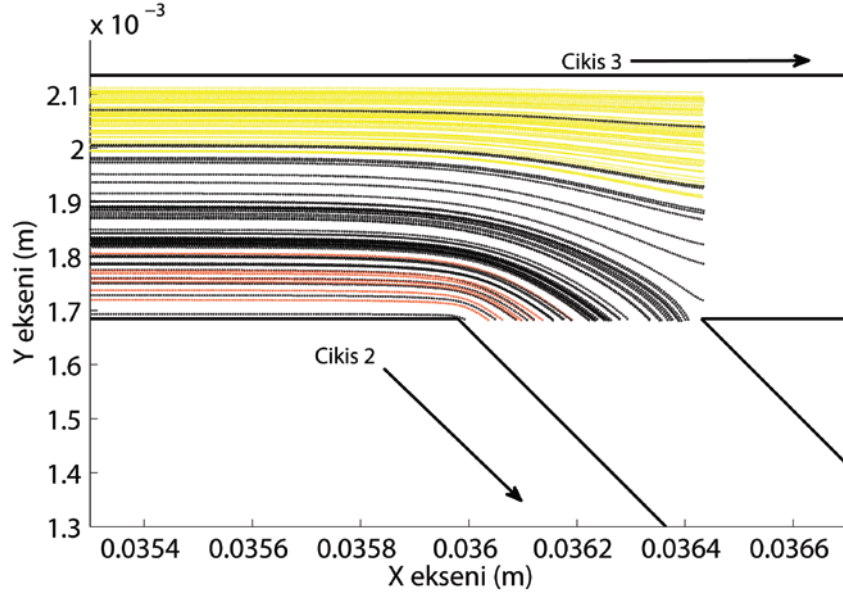
Şekil 3.7 Ana kanal girişindeki parçacık hareketi



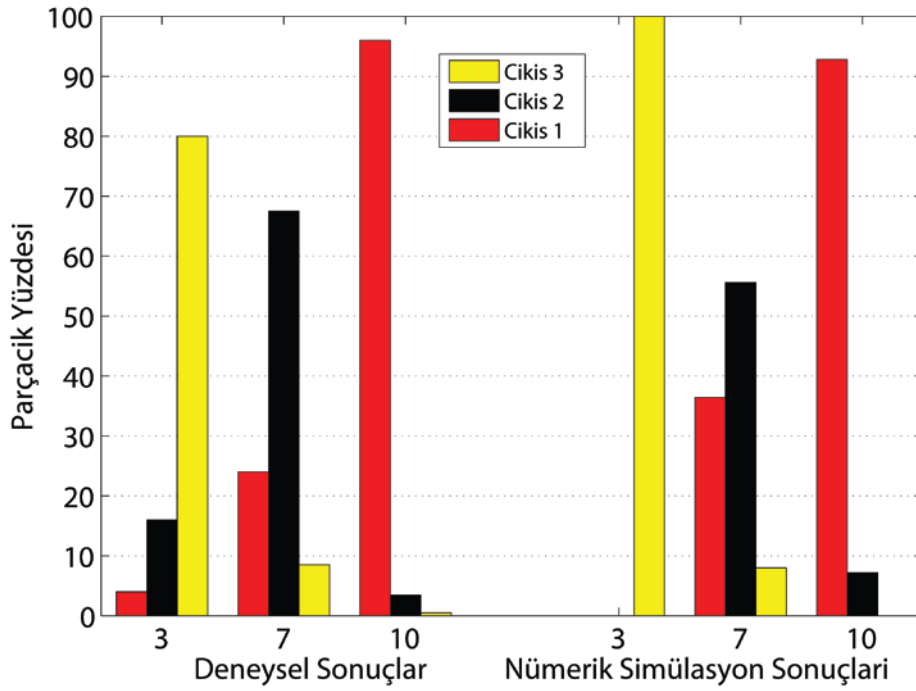
Şekil 3.8 Ana kanal sonundaki parçacık hareketi

Parametrelerin alındığı literatür çalışmasındaki deneysel sonuçlar, simülasyon metodunun doğruluğunu test etmek amacı ile simülasyon sonuçları ile karşılaştırıldı. Sonuçlar alınırken akustik kuvvet denkleminde geçen E_{ac} akustik enerji yoğunluğu değeri ölçülemediği için en iyi sonucu verecek şekilde deneme yanılma yöntemi ile bulundu. Sonuçlar Şekil 3.10'da deneysel çalışmada olduğu gibi histogram grafikleri ile ifade edildi. Bu grafiklerde her bir parçacık grubunun hangi çıkış kanalından yüzde kaçının çıktığı gösterilmektedir.

Şekil 3.10'a bakılarak sonuçların uyumlu olduğu söylenebilir, en verimli ayrılan parçacık grupları 3 ve 10 μm gruplarıdır. Nümerik sonuçlar 7 μm parçacıkların %55'inin hedeflendiği gibi çıkış 2'den çıktığını, deneysel sonuçlar ise aynı grubun %64'ünün çıkış 2'den çıktığını göstermektedir. 10 μm parçacıkların ayrışma performansı nümerik ve deneysel sonuçlarda birbirine oldukça yakındır. Sonuçlardaki en büyük sapma 3 μm grubundaki parçacıkların ayrıştırılmasında görülmüştür. Nümerik sonuçlarda 3 μm parçacıkların hepsinin hedeflenen çıkış 3'ten çıktığı görülmekte fakat deneysel sonuçlarda bu gruptaki parçacıkların sadece %80'i çıkış 3'ten çıkmaktadır. Sonuçtaki farklılığın akustik kuvvetin olması gerekenden düşük hesaplanmasından kaynaklandığı düşünülmemektedir, çünkü bu durumda diğer parçacık grupları için de hata oranının yüksek olması beklenirdi. Petersson ve arkadaşlarının çalışmasında [18] yıkama işleminde parçacık hızı arttıkça sistem veriminin düştüğünden bahsediliyor. Bunun bir nedeninin parçacıklar çok hızlı hareket ettikleri için kirli sıvıdan temiz sıvıya geçerken arkalarında bir kısım kirli sıvıyı da taşımaları olabileceği belirtiliyor. Aynı şekilde ayırma işleminde de küçük parçacıkların daha büyük parçacıklar tarafından kanalın ortasına doğru taşınma ihtimali vardır. Fakat önceden de belirtildiği gibi simülasyonlar yapılırken çarpışmalar ihmal edildiği için böyle bir olayın simülasyonlar ile doğrulanma ihtimali yoktur. 3 μm 'lik gruptaki %20 hataya rağmen, deney parametrelerindeki belirsizlikler de göz önüne alınarak sonuçların geneli düşünüldüğünde nümerik ve deneysel sonuçların örtüştüğü söylenebilir.



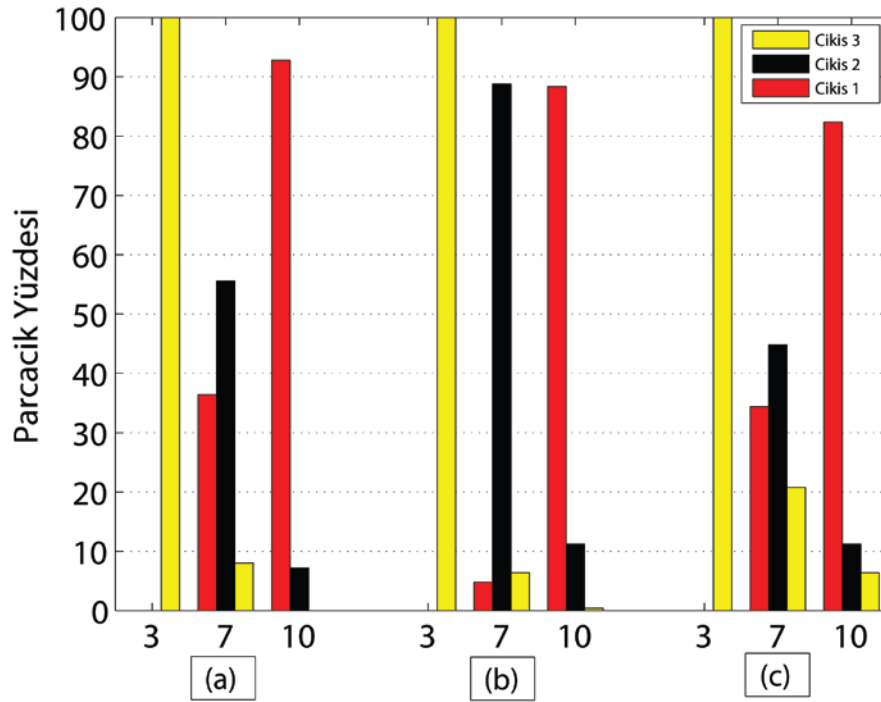
Şekil 3.9 Yan çıkış kanallarında parçacık hareketi



Şekil 3.10 Deneysel sonuçların ve nümerik simülasyon sonuçlarının histogram grafikleri

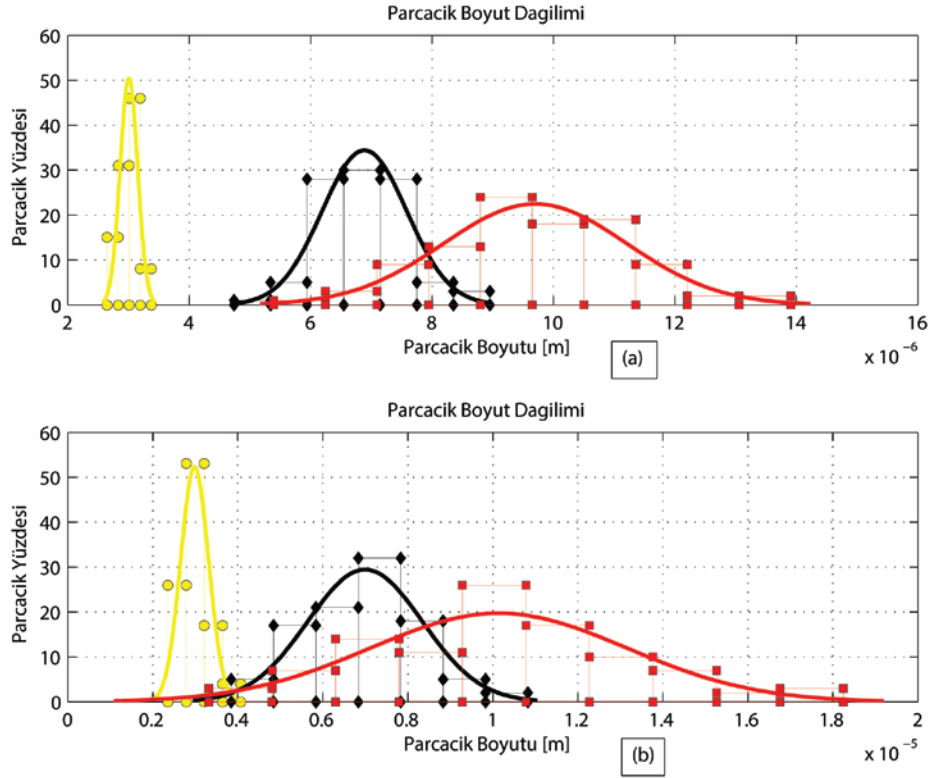
Nümerik simülasyon metodolojisinin parçacık ve akış hareketlerini incelemede yeterli olduğu görüldü. Bu nedenle simülasyonlar Çizelge 3.5'te verilen parametreler ile tekrarlanmış akış debisi, parçacık başlangıç konum dağılımı ve parçacık boyut dağılımı gibi parametrelerin sistem performansına etkisi gözlemlenmiştir.

Bazı belirsizlikleri modellemek için başlangıç konum dağılımları ve parçacık boyut dağılımları kullanıldı. Başlangıç konumları hem y hem de z ekseninde dağılım göstermekte yani parçacıklar bir alan içerisinde dağınık olarak kanala girmekte aynı şekilde parçacıkların yarıçapları da bir ortalama değer etrafında dağılım göstermektedir. Başlangıç konum dağılımları kaldırılarak sistem performansındaki değişim gözlemlendi. Dağılım kaldırıldığında bütün parçacıklar yan kanalın ortasından yani aynı noktadan giriş yapar. Bu durumun ayırıştırma performansını arttıracığı düşünülmüştür. 7 μm 'lik bir parçacığın akustik alana kanal duvarı dibinden girdiği, başka bir 7 μm 'lik bir parçacığın ise kanal ortasına daha yakın bir noktadan girdiği düşünüldüğünde, kanala ortadan giren parçacık çıkış 1'den çıkarken duvara yakın giren parçacık çıkış 2'den çıkabilir. Başlangıç konumlarındaki dağılımın kaldırılması ile bu tip durumlar ortadan kalkacaktır. Şekil 3.11b'de verilen sonuçlar da bu düşünceyi doğrulamaktadır. Sonuçlara bakıldığında 3 μm grubunun ayırıştırılmasının her durumda başarılı olduğu ve dağılımlardan etkilenmediği gözüküyor. 10 μm grubundaki parçacıkların ayırıştırma performansında az bir düşüş görülmektedir fakat bu gruptaki parçacıkları için başlangıç konumlarının sistem performansını çok fazla etkilediği söylenemez. Başlangıç konum dağılımından en çok etkilenen parçacık grubunun 7 μm grubu olduğu söylenebilir. Şekil 11b'de görüldüğü gibi konum dağılımı olmadan 7 μm grubunun ayırıştırılmasında %~30 iyileşme vardır. Sonuçlara bakılarak parçacıklar ayırıştırma ünitesine girmeden önce bir başka bir ünite kullanılarak sıralanırsa, ayırıştırma sisteminin performansı artacaktır denebilir.



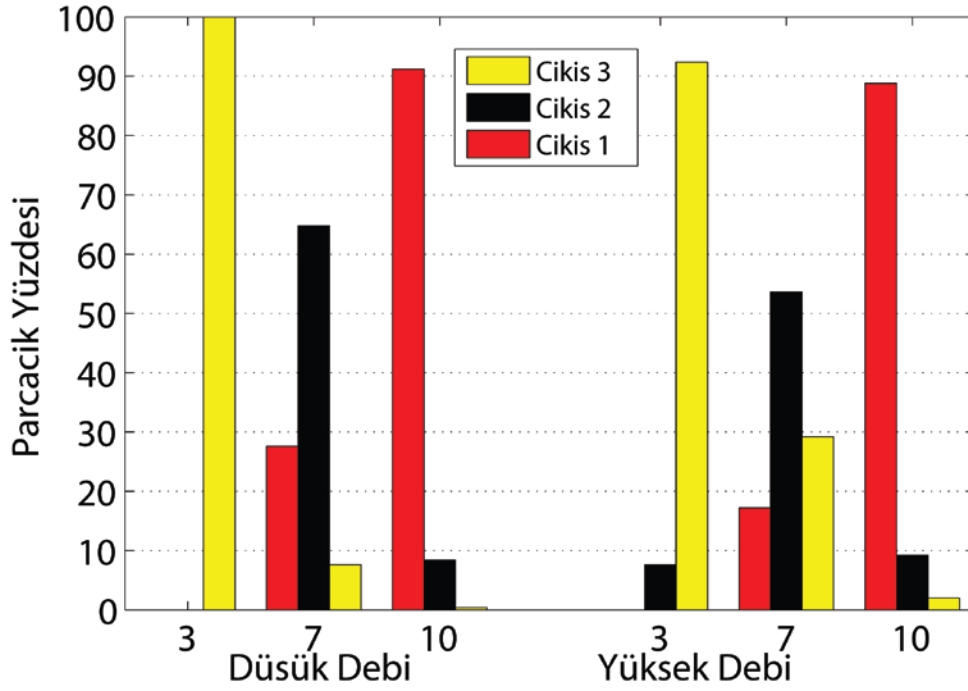
Şekil 3.11 Nümerik simülasyon sonuçları histogram grafikleri-1 a) Deneysel parametreler ile alınan nümerik sonuçlar b) Başlangıç konum dağılımı olmadan alınan sonuçlar c) Boyut dağılımı 2 katına çıkarıldığında alınan sonuçlar

Deneysel ve simülasyonlarda kullanılan mikro-parçacıkların boyutlarındaki standart sapma değeri laboratuvarlarda üretildikleri için küçüktür(%~10). Hâlbuki biyolojik sistemlerde hücreler veya farklı molekül grupları için aynı durum söz konusu değildir. Bu durumun ayrıştırma performansına etkisini görmek için parçacık boyutlarındaki standart sapma iki katına çıkartılmıştır. Şekil 3.12’de parçacık grubu bazında yüzde olarak boyut dağılımları gösterilmektedir. Boyut standart sapması iki katına çıkarılarak yapılan simülasyon sonuçları Şekil 3.11.c’de gösterilmektedir. Sonuçlara bakarak, ayrıştırma performansının 7 ve 10 μm parçacık grupları için %~10 oranında düştüğü görülmektedir. Fakat 3 μm parçacıklar için hala akustik kuvvet ortaya doğru hareketi sağlamak için yeterli değildir. Biyolojik parçalarda boyut standart sapması simülasyonda kullanılanlardan bile fazla olabilir. Bu nedenle biyolojik parçalarda çok daha kötü ayrıştırma performansı görülebilir. Yine de tasarım öncesinde simülasyonlar yapılarak optimum performans alınabilir.



Şekil 3.12 Nümerik simülasyon sonuçları histogram grafikleri-2 a) %10 Parçacık boyut dağılımı b) %20 Parçacık boyut dağılımı

Akış hızlarının etkisini incelemek için, yüksek ve alçak debili iki model, önceki simülasyonlarda kullanılan akış modelinin sınır koşulları değiştirilerek oluşturulmuştur. Farklı akış hızları bu iki modelin çözülmesi ile elde edilmiştir. Simülasyonlar ayırma performansını maksimum yapan E_{ac} değeri elde edilene kadar tekrarlanmıştır. Yüksek debilerde parçacıklar kanal içerisinde daha kısa süre kaldığı için daha yüksek E_{ac} değerleri kullanılmıştır. Şekil 3.13'te yüksek ve düşük debilerle yapılan simülasyon sonuçları görülmektedir. Yüksek debilerde 7 μm grubundaki parçacıkların ayrıştırılmasında %10'a yakın performans düşüşü görülüyor. Çok daha yüksek E_{ac} değeri kullanılmasına rağmen performans düşüşü 3 ve 10 μm grubundaki parçacıklar için de geçerlidir. Debiler düştükçe hem daha yüksek performans elde ediliyor hem de düşük E_{ac} değeri sayesinde daha düşük güç tüketimi yapılıyor.

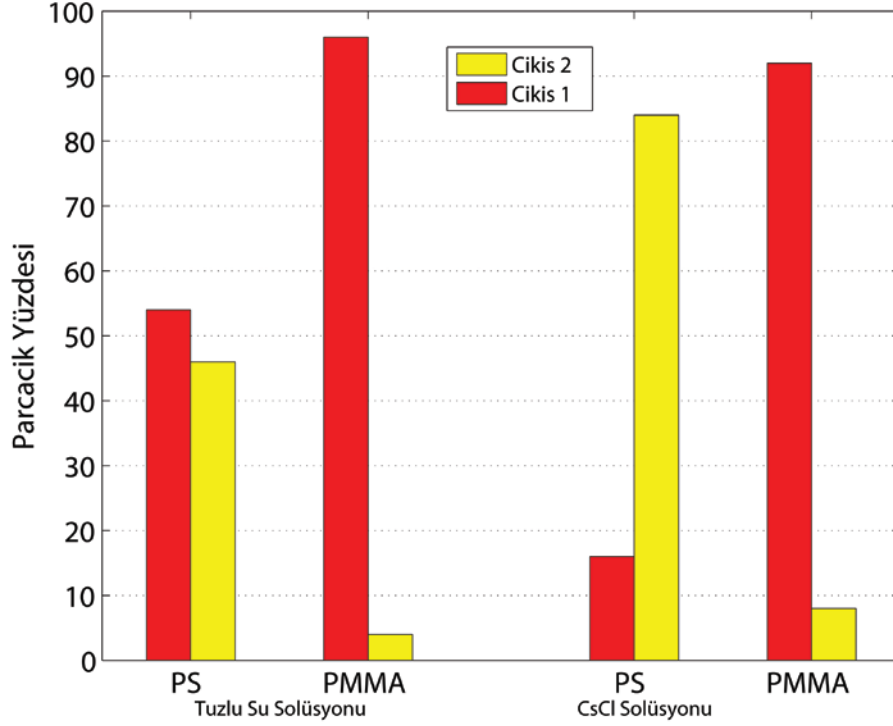


Şekil 3.13 Farklı hız debileri için nümerik sonuçlar

3.2.1.2 Özkütleyle göre Ayrıştırma

Aynı boyutta fakat farklı özkütleyle sahip parçacıkların ayrıştırma simülasyonu da yapıldı. Boyuta göre ayrıştırma kısmında bahsedilen çalışmadaki [19] özkütleyle göre ayrıştırma deney parametreleri kullanıldı. Bahsedilen çalışmada boyutu 3 μm ve özkütlesi 1,05 g/cm^3 olan Polystrene parçacıklar ile boyutu 3 μm ve özkütlesi 1,22 g/cm^3 olan PMMA parçacıklar akustik kuvvetler ile ayrıştırılmaya çalışılmıştır. Deneysel çalışmada taşıyıcı sıvı olarak yoğunluğu 1,05 g/cm^3 olan tuzlu su çözeltisi kullanıldığı zaman Polystrene ve PMMA parçacıkların birbirinden ayrılamadıkları görülmüştür. Bu durum simülasyon ile de test edilmiştir. Simülasyon farklı E_{ac} değerleri için tekrarlanmış, en iyi sonucu veren E_{ac} değeri kullanılmıştır. Şekil 3.14'te verilen simülasyon sonuçlarında da deneydeki gibi tuzlu su çözeltisi ile en iyi E_{ac} değeri aranmış ancak ayrıştırmanın yapılamadığı görülmüştür. Bu durumun nedeni olarak (2.20b)'de verilen akustik kontrast faktörünün Polystrene ve PMMA'den yapılan malzemeler için tuzlu su çözeltisi içerisinde birbirlerine yakın olmasıdır. (2.31a)'da verilen akustik kuvvet denkleminde görüleceği gibi aynı kanal içerisindeki iki farklı gruba etki edecek kuvvet büyüklüğü parçacıkların boyutuna ve akustik

kontrast faktörüne bağlıdır. Boyutu aynı olan parçacıkların akustik kontrast faktörü de birbirine yakın ise ayrışmaları beklenemez. Bu nedenle deneyde ortam yoğunluğu 1.16 g/cm³'e gelene kadar sezyum klorid (CsCl) eklenmiştir [19]. Böylece akustik kontrast faktörleri arasında farklılık oluşması amaçlanmıştır. Simülasyonlar bu şekilde tekrarlanmış ve Şekil 3.14'te görüldüğü gibi parçacıkların birbirinden ayrıldığı görülmüştür. Ortam yoğunluğu değiştirildikten sonra, PMMA parçacıkların %~93'ünün çıkış 1'den çıktığı Polystrene parçacıkların %~85'inin ise çıkış 2'den çıktığı görülüyor. Tuzlu su çözeltisindeki duruma göre oldukça ayrıştırma performansı oldukça artmıştır.



Şekil 3.14 Eş boyutlu parçacıkların farklı ortamlarda ayrıştırma sonuçları

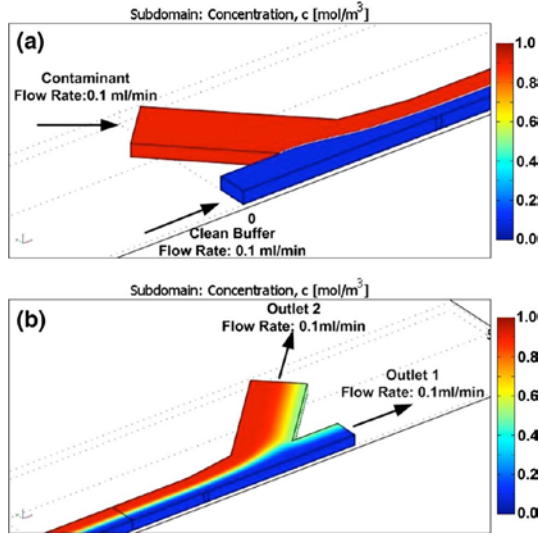
Aynı şekilde deneysel çalışmada da [19] ortam sıvısına sezyum klorid eklendikten sonra ayrıştırmanın başarılı olduğu bildirilmiştir. Bahsedilen deneysel çalışmada PMMA parçacıkların %96'sının çıkış 1'den, Polystrene parçacıkların %88'inin çıkış 2'den çıktığı söylenmiştir. Bu sonuçlar yapılan simülasyon sonuçları ile karşılaştırıldığında simülasyonun deneysel sonuçları oldukça doğru kestirdiği söylenebilir.

3.2.2 Parçacık Yıkama

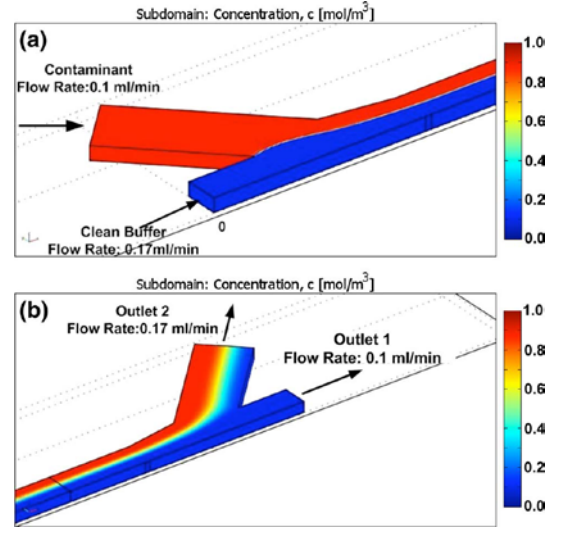
Bu kısımda parçacık yıkama işleminin simülasyonu yapılmıştır. Ayırıştırma kısmında olduğu gibi akustik kuvvet analitik bağıntılarla, akış alanı ise sonlu elemanlar metodu ile çözülmüştür. Yıkama işleminin amacı parçacıkları kirli tabir edilen sıvıdan alıp temiz sıvıya geçirmektir. Şekil 3.2’de de gözüktüğü gibi parçacıkları taşıyan sıvı yan kanallardan, temiz sıvı ise orta kanaldan ana kanala girerler. Parçacıklara akustik kuvvet etki ettiğinde ise, parçacıklar kanal diplerinde akan kirli sıvıdan orta kısımdaki temiz sıvıya geçerler. Burada önemli nokta kirli sıvının parçacıkların geçeceği temiz sıvının çıktığı çıkıştan çıkmamasıdır. Akış düşük Reynold sayıları ile gerçekleştiği için iki sıvı arasında karışma sadece difüzyona bağlı olarak gerçekleşmektedir. Bu konseptin uygunluğu Petersson tarafından denenmiştir[12], simülasyon modeli de bu çalışma baz alınarak yapılmıştır. Parçacık yıkama modelinde akustik ve akış alanlarına ek olarak difüzyon problemi de COMSOL sonlu elemanlar programı ile çözülmüştür. Deneyde, parçacık ayırıştırma işleminde kullanılan geometriye benzer bir geometri kullanılmıştır. İki geometri arasındaki fark çıkış kanal sayılarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Ayırıştırma için 3 çıkış kanalı mevcutken yıkama işlemi için iki çıkış kanalı kullanılmıştır. Difüzyon ve akış alanı çözümünde simetrilere yararlanılarak kanalın sadece çeyreklik kısmı modellenmiştir.

Simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırılabilmesi için deneysel çalışma ile aynı geometri ve aynı akış debileri [12] kullanıldı. Difüzyon analizi sonuçları ve akış debileri Şekil 3.15 ve 3.16’da gösterilmiştir. Konsantrasyon değerleri renkler ile ifade edilmiştir. Kirli sıvının konsantrasyonu 1 verilmiş yani kırmızı renk ile ifade edilmiş, temiz sıvının konsantrasyonu ise 0 verilmiş yani mavi renk ile ifade edilmiştir. Şekil 3.15.a’da giriş kanallarındaki konsantrasyon, Şekil 3.15.b’de ise çıkış kanallarındaki konsantrasyon görülmektedir. Şekil 3.15.b’de görüleceği gibi kirli sıvının bir kısmı temiz sıvının toplandığı kanaldan çıkmaktadır, bu istenmeyen bir durumdur. Aynı parametreler ile deneysel çalışmada da aynı durumun gözlemlendiği bildirilmiş, bu durum orta giriş kanalı ve yan çıkış kanallarındaki debinin artırılması ile aşmaya çalışılmıştır [12]. Debilerde yapılan değişimlerden sonraki analiz sonuçları Şekil 3.16’da gösterilmiştir. Şekil 3.16.b’de görüldüğü gibi orta çıkış

kanalından sadece temiz sıvı çıkmaktadır. Baz alınan deneysel çalışmada da debiler değiştirildikten sonra orta çıkış kanalından sadece temiz sıvının çıkış yaptığı gözlemlenmiştir [12]. Deney ve analiz sonuçlarının iki durum için de benzer çıkması analiz sonuçlarının doğruluğunu göstermektedir.

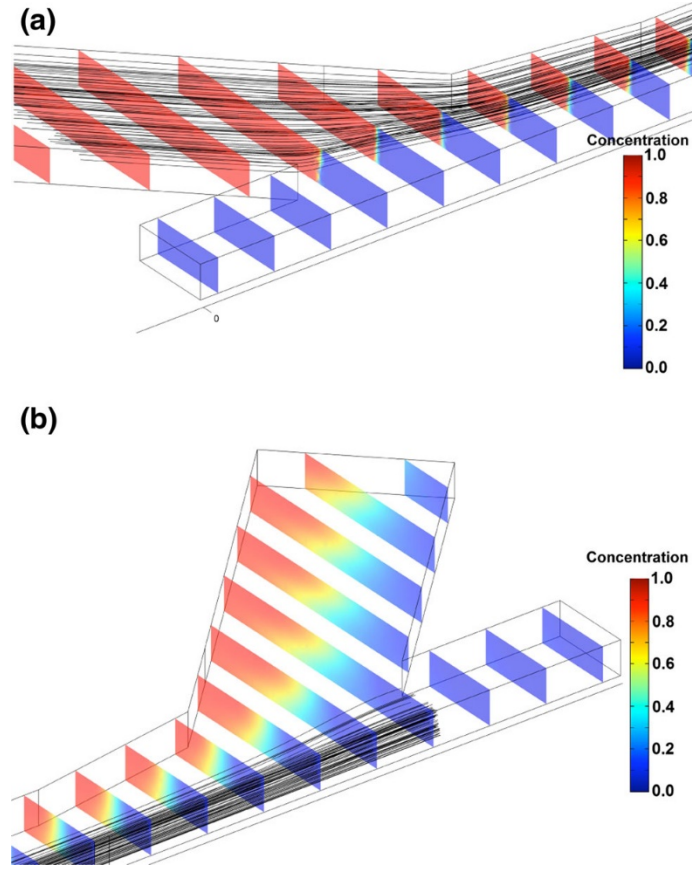


Şekil 3.15 Difüzyon analizi sonuçları (Debi:0,2ml/dak.) a) Kanal girişi b) Kanal çıkışı



Şekil 3.16 Difüzyon analizi sonuçları (Debi:0,27ml/dak.) a) Kanal girişi b) Kanal çıkışı

Başka bir önemli nokta ise parçacıkların temiz sıvıya taşınabilmesi yani yan çıkış kanallarından çok fazla parçacık kaybedilmemesidir. Akış debilerinin arttırıldığı ikinci analizde bu durum daha da önemli hale gelmektedir çünkü parçacıklar ortaya gelemeden kanaldan çıkma ihtimalleri akış hızlı iken daha yüksektir. Parçacık yörünge simülasyonları ikinci analizdeki akış debileri ile yapıldı. Analizde çapında %10 standart sapma olan 5 μm çaplı parçacıklar kullanıldı. Şekil 3.17'de yörünge simülasyon sonuçları ile difüzyon analizi sonuçlarının birleşimi görülmektedir. Kesit kesit görülen renkler konsantrasyonu, siyah çizgiler ise parçacık yörüngelerini göstermektedir. Yörüngelerin görünebilir olması için şekil çizdirilirken az sayıda parçacık kullanılmıştır. Şekil 3.17a'da parçacıkların kirli sıvı içerisinde ana kanala girişleri görülmekte. Şekil 3.17b'de ise akustik kuvvetin etkisi ile kanalın ortasına gelen parçacıkların orta çıkış kanalından çıkışı görülmekte. Şekilde görüldüğü gibi yan çıkış kanalından çıkan parçacık gözlemlenmedi.



Şekil 3.17 Yıkama işlemi parçacık yörüngeleri ve sıvı konsantrasyonları a) Kanal girişi
b) Kanal çıkışı

Grafiklere veya deney fotoğraflarına bakılarak yıkama işleminin başarılı olup olmadığı anlaşılabilir. Petersson yıkama işleminin verimini sayısal olarak ifade edecek ortam değişim verimi⁴ adında bir parametre geliştirmiştir[12]. Bu parametre yan giriş ve çıkış kanallarındaki kirli sıvı oranını ifade eder. Ortam değişim veriminin hesaplanması için birin zamanda yan giriş kanalından giren kirli sıvı konsantrasyonu ve birim zamanda yan çıkış kanalından çıkan kirli sıvı konsantrasyonu hesaplanıp birbirine bölünür. Oran bir ise yıkama ünitesi bütün kirli sıvıyı yan çıkış kanallarından atmaktadır. Model üzerinde ortalama konsantrasyon hesaplanırken Şekil 3.15 ve 3.16'daki modellerin hacim integrali alınmıştır. Hesaplanan ve deneysel olarak bulunan sonuçlar Çizelge 3.6'da verilmiştir.

⁴ İng Medium Exchange Efficiency

Çizelge 3.6 Ortam değişim verimi değerleri

	Deney Sonucu [12] (%)	Simülasyon Sonucu (%)
Ortam Değişim Verimi 1 (Debi:0,2ml/dak.)	81	83
Ortam Değişim Verimi 2 (Debi:0,27ml/dak..)	89	93

Baz alınan deney çalışmasında piezoya uygulanan voltaj genlikleri arttıkça parçacıkların çok hızlı bir şekilde kanalın ortasına hareket ettiği, hızlı hareket sırasında parçacıkların bir miktar kirli sıvıyı da peşlerinden sürükledikleri ifade edilmiş, bu durumun ise ortam değişim verimini düşürdüğünü söylenmiştir [12]. Sonlu elemanlar modelinde parçacıkların hareketinden dolayı oluşan sıvı taşınımı modellenmemektedir. Bu nedenle Çizelge 3.6’da simülasyon sonuçları düşük voltaj ile yapılan deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ortam değişim verimi, simülasyon sonuçlarında, deney sonuçlarına göre biraz daha yüksek çıkmaktadır. Bunun nedeni bahsedildiği gibi parçacıkların hareket sırasında arkalarında bir miktar sıvı taşınmaları olabilir. Sonuçlar arasındaki ufak farklara rağmen sonuçların örtüştüğü ve simülasyon metodunun yıkama ünitesi tasarımı ve optimizasyonu için kullanılabileceği söylenebilir.

3.3 Akustik ve Akış için Sonlu Elemanlar Yaklaşımı

Bölüm 3.1’in başında akustik dalga oluşumu için kullanılan piezo malzemenin çip içerisine 3 ekseninde de dalga yaydığı belirtilmişti. Bundan önce dalgaların sadece bir ekseninde oluştuğu kabulü yapılmış ve bu sayede analitik bağıntılar kullanılarak simülasyonlar yapılmıştı. Simülasyonlar literatürdeki deneysel çalışmaların parametreleri kullanılarak yapılmış böylece sonuçlar karşılaştırabilmişti. Sonuçların literatür çalışmaları ile uyumlu olduğu görülmüş böylece literatürdeki çalışmalardaki çiplere benzer bir tasarım simülasyon sonuçlarına göre optimize edilerek üretilmiştir. Fakat çip malzemesi olarak literatür çalışmalarından farklı olarak silikon değil PDMS seçilmiştir. PDMS çip ile yapılan deneylerde istenilen performans elde edilememiştir. Bu nedenle tekrar literatür araştırması yapılmış ve çip malzemesi olarak polimer bir

malzeme kullanıldığı durumun silikon kullanıldığı durumdan çok farklı olduğu anlaşılmıştır. Lenshof'un çalışmasında [25], bu durumun PDMS ve silikon arasındaki akustik özellik farkından kaynaklandığı söylenmiştir. PDMS ve silikonun akustik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Silikon ile kanal içerisindeki suyun genel akustik empedansı arasındaki fark çok yüksek olduğu için su içerisindeki dalga kanal duvarına çarptığı anda yansımakta bu şekilde durağan akustik dalga kanal içerisinde oluşmaktadır. Fakat PDMS ve suyun genel akustik empedansı birbirlerine yakın olduğu için akustik dalga sudan PDMS'e çok küçük bir yansıma ile geçebilmektedir bu nedenle durağan dalga oluşumu silikonda olduğu şekilde kanal içerisinde oluşturulamamaktadır. Kanal içerisinde durağan dalga oluşturulabilmesi için bütün çip genişliğince durağan dalga oluşturulması gerekmektedir. Çip boyunca dalga oluşturulabilmesi için bütün çipi kapsayan bir simülasyon metodu geliştirilmesine gerek duyuldu. Analitik bağıntılar dalga oluştuktan sonra parçacıkların hareketi ile ilgili bilgi verirken, dalganın en verimli ve istenen şekilde nasıl oluşacağı konusunda herhangi bir bilgi vermemektedir. Bu nedenle akustik alanın da sonlu elemanlar metodu ile çözüldüğü simülasyon yöntemi geliştirildi.

Simülasyonlarda kullanılan akustik model, çip malzemesi, çip malzemesi içerisindeki oyuk kanal, kanal yalıtımını sağlayan cam ve akustik dalgayı oluşturan piezo malzemelerden kuruldu. İlk kurulan modellerde akustik dalga yayılımı piezo malzeme yerine düzlemsel dalga sınır koşulu ile oluşturuldu böylece piezo malzemenin dalga oluşumuna etkisi incelendi. Çip genişliği kanalın ortasında basınç düğüm noktası oluşacak şekilde (2.37)'de verilen genişlik formülüne göre, kanal genişliği de yarım dalga boyu olacak şekilde belirlendi. Piezo konfigürasyonu da değiştirildi. Silikon çipte piezo malzeme mecburi olarak çipin üstüne yapıştırılmaktadır çünkü silikon çipler çok ince silikon levhalar kullanılarak yapılır ve piezo koyulabilecek tek kısım çipin üst veya alt kısmıdır. PDMS çip ise döküm yapılarak üretildiği için piezolar çipin yan tarafına yapıştırılabilir bu sayede piezo kalınlık modunda titreştirilirken dalgaların direk olarak istenen yönde kanala girmesi sağlanır. Akustik model geometrisi oluşturulurken tüm çipin sadece piezoların bulunduğu kısmı kullanıldı. Böylece çözüm ağı oluşturulması kolaylaştırıldı ve işlem yükü azaltıldı.

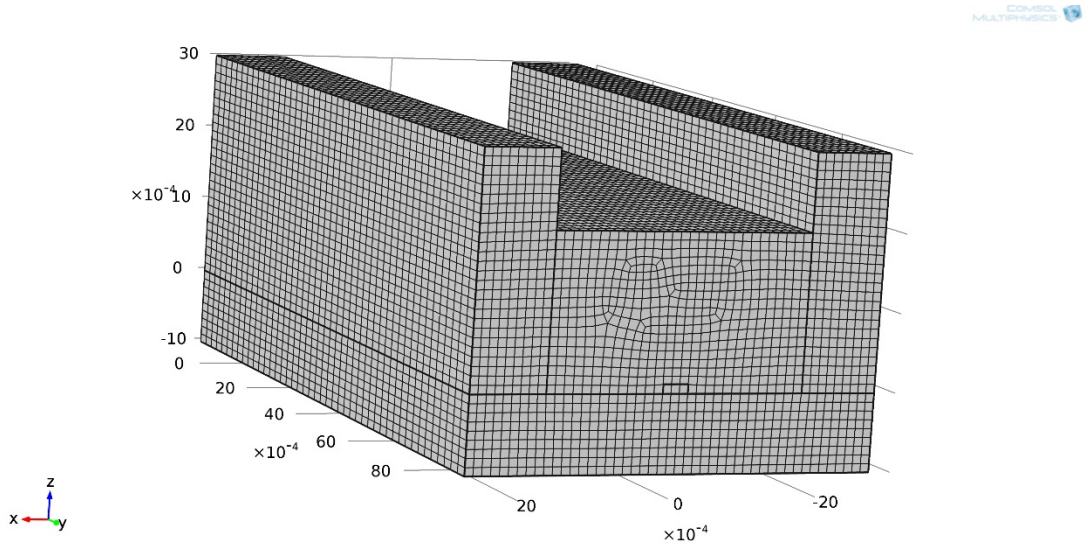
Malzeme özellikleri COMSOL programı içerisindeki malzeme kütüphanesinden alındı. Piezo malzemesi olarak literatür deneylerinde ve tez çalışması kapsamındaki deneylerde kullanılan Ferroperm PZ-26 piezoya en yakın özelliklerdeki PZT-4 seçilmiştir.

Akustik model kullanılarak PDMS bir çip içerisinde durağan akustik dalgayı maksimum genlik ile ve dalganın basınç düğüm noktası kanalın ortasında olacak şekilde nasıl oluşturulabileceği incelendi. Deneyde kullanılan çip boyutlarına yakın boyutlarda kurulan modellerin mevcut bilgisayarlar ile çözülememesi nedeni ile daha küçük modeller kullanıldı fakat genişlik formülüne sadık kalındı. Akustik modelin amacı PDMS çip içerisinde durağan dalga oluşumunu etkileyen parametrelerin tespiti olduğu için model boyutlarının deneydeki boyutlardan küçük olması önemli bir değişikliğe sebep olmayacağı düşünüldü.

En iyi durağan dalgayı oluşturabilmek için iki piezo ve bir piezo bir yansıtıcı tasarım konfigürasyonları arasından iki piezo konfigürasyonu seçildi. Durağan dalga ilerleyen ve yansıyan dalgaların üst üste binmesi ile ortaya çıkar. Durağan dalganın mükemmel olabilmesi için ilerleyen ve yansıyan dalganın eşit genlikte olması gerekmektedir. PDMS'in akustik sönümünün yüksek olması nedeni ile yansıtıcı kullanıldığı durumda bir kaynaktan yayılan dalganın yansıyıp dönene kadar önemli ölçüde sönümleneceği düşünülmüş ve bu durum sonlu elemanlar modeli kullanılarak doğrulanmıştır. İki piezo konfigürasyonu ile sönüm olsa bile durağan dalga şeklinin iyileştiği ve genliklerin arttığı görülmüştür. Bu konfigürasyonda piezolar polarite yönleri dikkate alınarak birbirlerine zıt fazda titreştirilmiştir. Böylece basınç düğüm noktalarından birinin çipin tam ortasında bulunan kanalın orta noktasında oluşturulması sağlanmıştır.

Piezo içermeyen akustik model sadece akustik alanı içermektedir bu yüzden sadece akustik sınır koşulları uygulanmış kalan kısımlara hava empedansı sınır koşulu verilmiştir. Çipin yan duvarlarına durağan dalga sınır koşulu verilmiştir. Piezo içeren akustik model elektrik, akustik ve yapısal alanlarını kapsadığı için sınır koşulları bu üç alanda da verildi. Elektrik sınır koşulları piezo malzemeler üzerinde elektrik potansiyeli, toprak ve sıfır yükten oluşmaktadır. İnce dikdörtgen piezonun geniş yüzeylerinden birine 5V elektrik potansiyeli, onun karşıtı yüzeye toprak geri kalan

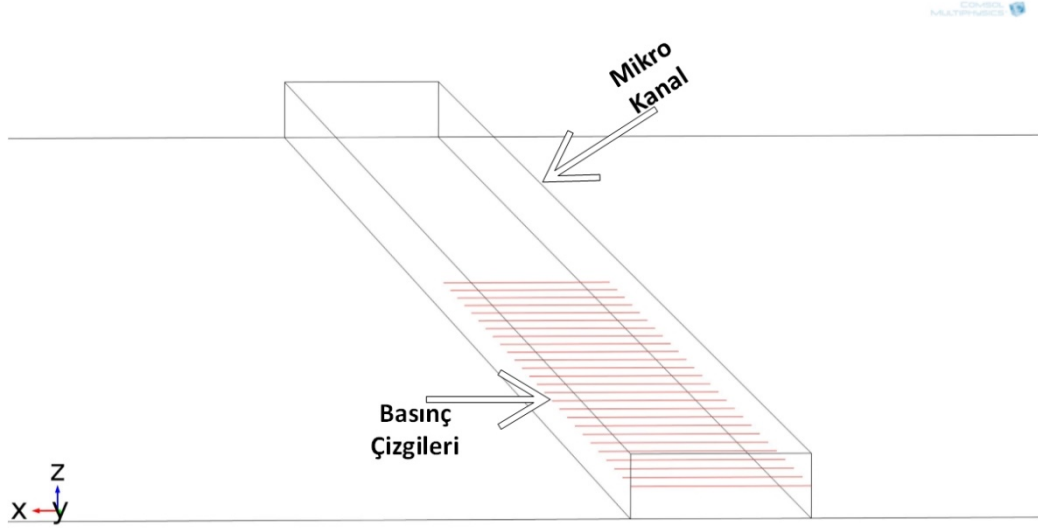
yüzeyle ise sıfır yük sınır koşulu uygulandı. Burada önemli bir nokta piezonun polarite yönünün doğru tanımlanması aksi takdirde sonuçlar yanlış çıkmaktadır. Akustik sınır koşulu olarak bütün yüzeyle hava empedansı sınır koşulu uygulandı. Yapısal olarak ise piezonun çipe temas etmediği yüzeyle serbestlik sınır koşulu verildi. Piezonun çip ile temas ettiği kısımlar otomatik olarak akustik-yapı sınır koşulu olarak belirlendi.



Şekil 3.18 Akustik model ve çözüm ağı görünümü

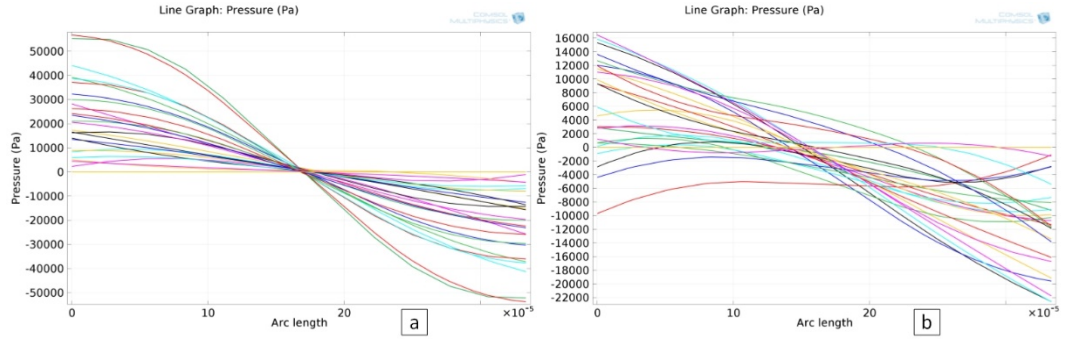
En iyi çözümü almak için farklı çözüm ağı parametreleri denendi. Denenen tüm çözüm ağları parametreleri, sonuçları ile birlikte tablo olarak kaydedildi ve en iyi çözüm ağı parametreleri bu sonuçlar yardımı ile seçildi. Çözüm ağı, bir yüzeyde quad-mesh oluşturulması ardından yüzeydeki ağın çip derinliği boyunca süpürülmesi ile oluşturuldu. Çözüm ağı için Tetrahedral eleman ağı da denendi fakat sonuçların eleman yoğunluğuna göre epey değiştiği ve doğru sonuç almak için çok sıkı ağı kullanılması gerektiği görüldü. Quad-mesh oluşturulurken farklı malzemelere farklı eleman büyüklüğü atandı böylece dalga boyu yüksek olan cam ve piezoda daha büyük eleman, dalga boyu küçük olan su ve PDMS'te daha küçük eleman kullanılmış böylece çözüm yükü azaltılmaya çalışıldı fakat bu şekilde yapılan çözümlerin sonucu hatalı verdiği görüldü. Bu nedenle tüm yüzeyde aynı boyutta eleman kullanıldı. Quad-mesh maksimum eleman büyüklüğü PDMS'teki dalga sayısının dörtte biri yani yaklaşık 120µm, swept-mesh maksimum eleman büyüklüğü ise sudaki dalga boyunun üçte biri

yani yaklaşık 220 μm seçildi. İşlem yükünü azaltmak için sonucun çok önemli olmadığı kanal derinliği yönünde (swept-mesh) eleman boyutu büyütüldü. Örnek bir model çözüm ağı ile birlikte Şekil 3.18’de gösterilmiştir.



Şekil 3.19 Kanal içerisindeki basınç çizgileri

Çözüm yapılan frekanslar PZ-26 piezonun kalınlık modundaki rezonansı olan 2,25MHz etrafında seçilmiştir. Bu değer deneysel olarak ölçülmüştür. İstenen frekanslarda çözüm yapıldıktan sonra ilk etapta kanal ve çip içerisindeki Şekil 3.19’da görülen çizgiler üzerindeki basınç dağılımı incelenmiştir. Çizgi boyunca oluşan basınç dağılımına, bu basınç dağılımlarının kanal boyunca değişimine, basınç düğüm noktalarının konumuna ve basınç genliklerine bakılarak kanal içerisinde ilerleyen parçacıkların nasıl bir hareket yapacakları, kanalın ortasına mı yoksa duvarına mı hareket edecekleri kestirilebilir. İki farklı model için basınç dağılım grafikleri Şekil 3.20’de gösterilmektedir. Şekil 3.20a’da düğüm noktaları kanalın ortasında oluşmuştur. Kuvvetin büyüklüğü kanal boyunca değişse de parçacıklar her daim kanalın ortasına doğru sürükleneceklerdir. Şekil 3.20b’de ise basınç düğüm noktaları kanal boyunca farklı konumlarda oluşmaktadır ve basınç genlikleri düşüktür. Bu durumda parçacıklar üzerine etkiyen kuvvet düşüktür ve parçacıklar kanal içerisinde salınım hareketi yaparlar.



Şekil 3.20 Basınç dağılım grafiği a) İstenen simetrik dağılım b) İstenmeyen asimetrik dağılım

Basınç dağılım grafiklerine bakılarak parçacık hareketi hakkında fikir yürütülebilse de sadece basınç dağılımlarına bakarak parçacıkların kanal içerisindeki hareketi hakkında veya sistemin performansı hakkında kesin bilgi sahibi olunamaz. Bu nedenle bazı durumlarda akustik analiz sonuçları kullanılarak parçacık yörüngelerini hesaplayan nümerik simülasyonlar da yapılmıştır. Bu bölümde Bölüm 3.1’de olduğu gibi sadece düz bir kanaldaki parçacık hareketi simüle edilmiş 0,3 mm/s ortalama akış hızı yani yaklaşık 0,7µl/dak. debi ile 10 mm kanal içerisinde parçacıklar hareket ettirilmiş, simülasyon metodundaki farklılık akustik kuvvetin hesaplanma yöntemidir. Parçacıkların akustik alanı bozmadığı kabulü geçerlidir bu nedenle analizler boş kanalda yapılmıştır. Analiz sonucunda kanal içerisindeki basınç ve üç eksendeki hız değerleri akış alanının çözümünde olduğu gibi çözüm ağı noktalarında kaydedilmektedir. Daha sonra bu veriler işlenerek üç boyutlu interpolasyona uygun hale getirilir. Kuvveti hesaplamak için Bölüm 3.1 ve 3.2’de kullanılan (2.31a) yerine bu denklemin daha genel hali olan (2.27) kullanılmıştır. (2.27)’de ihtiyaç duyulan ortalama basınç ve hız değerlerinin türevi istenilen noktanın komşuluğundaki iki noktanın değeri kullanılarak merkezi farklar yöntemi ile hesaplanır. İşlenen veriler yardımı ile kanal içerisinde herhangi bir noktadaki parçacığa etki eden kuvvet kullanılarak üç eksen için de ayrı ayrı hesaplanabilir. Kuvvetler hesaplandıktan sonra parçacıkların hızları hesaplanıp, belirlenen zaman adımlarına göre hareket ettirilerek yörüngeleri hesaplanır.

En iyi performansı göstereceği düşünülen referans model oluşturuldu. Referans model üzerinden parametreler kontrollü bir şekilde değiştirilerek simülasyonlar tekrarlandı

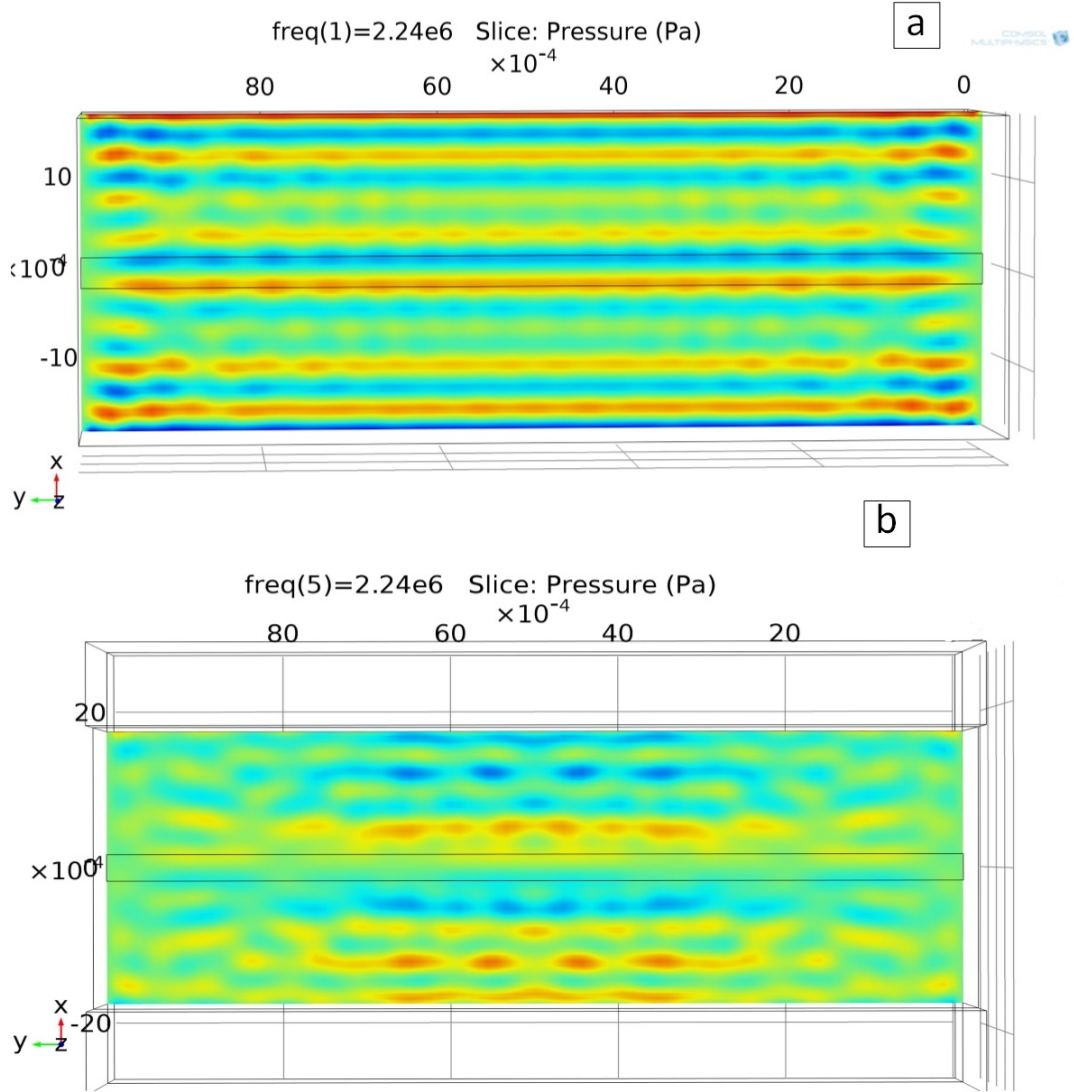
böylece hangi parametrenin sistem performansını ne kadar etkilediği gözlemlendi. Ayrıca çiplerin üretimi sırasında oluşan ve simetriyi bozan hataların bulunduğu model sonuçları da incelendi.

3.3.1 Piezoların Etkisi

İşlevi akustik dalga oluşturmak olan piezo malzemenin dalga oluşumunda nasıl bir etki oluşturduğunu anlamak için referans model ile piezo olmayan model karşılaştırıldı. Piezo olmayan modelde piezoların temas ettiği kısımlara 0,51 ve -0,51 MPa genlikli düzlemsel dalga sınır koşulu verildi. Dalganın genliği, referans modelde piezonun temas ettiği yüzeydeki ortalama basınç hesaplanarak bulundu. Piezo olmayan model ile referans modelin çip içerisinde alınan bir kesit üzerindeki eşit ölçekli basınç grafikleri Şekil 3.21’de karşılaştırılmıştır.

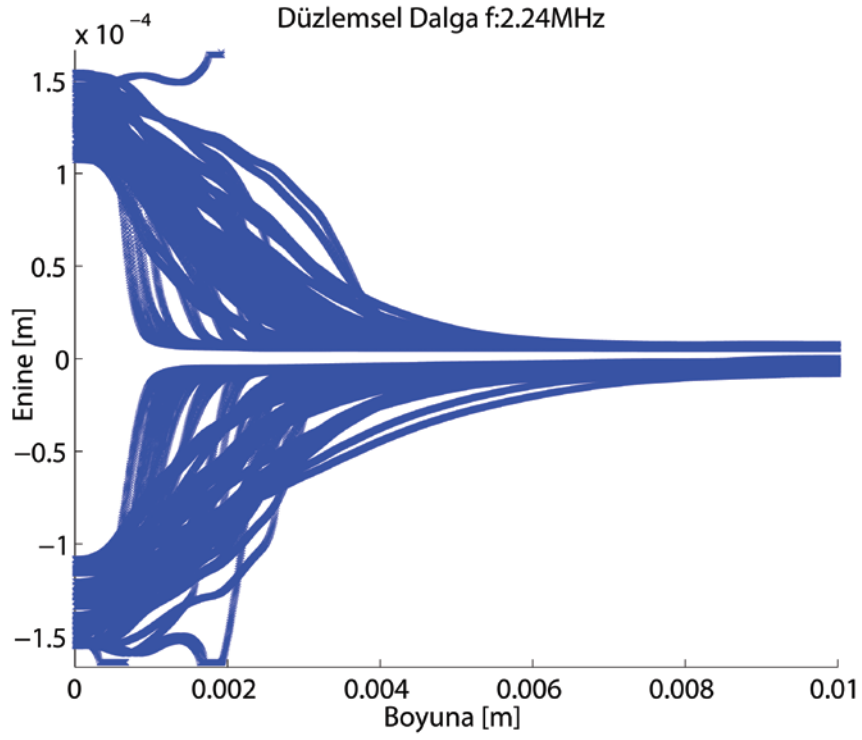
Şekil 3.21’e bakarak düzlemsel dalga verildiği durumda basınç dağılımının çok daha düzgün olduğu hatta neredeyse sadece x ekseninde dalga oluştuğu söylenebilir. Basınç genlikleri de bu durumda daha yüksek çıkmaktadır. Referans modelin sonucuna bakılırsa daha karmaşık ve daha verimsiz gözükken bir dağılım görülür. Fakat her iki grafikte de dalgaların simetrik olduğu görülmekte, bu durum modeller ve sınır koşulları simetrik olduğu için beklenen bir durumdur. Dalgaların kanalın ortasından geçen z-y düzlemine göre simetrik olduğu durumda basınç düğüm noktaları bu düzlemin üzerinde oluşur böylece parçacıklara etkiyen kuvvet parçacıkları her zaman kanalın ortasına doğru götürür. Parçacıklar iki durumda da ortaya hareket etse de referans modelde basınç genlikleri daha düşük olduğu için etkiyen kuvvet daha küçük olacaktır.

Grafikler arasındaki fark piezo malzemelerin titreşim modlarından ve sınır koşullarından kaynaklanmaktadır. Piezo malzemelerin akustik alan oluştururken sadece basit düzlemsel dalgalar oluşturmadığı, 3 ekseninde de yayılan akustik dalgalar oluşturduğu söylenebilir. Bu durum simülasyon sonuçlarını etkilediği nümerik simülasyonlarla da görülmüştür. Parçacıkların hareketlerini kanalın üstünden gösteren grafikler Şekil 3.22 ve 3.23’te görülmektedir.

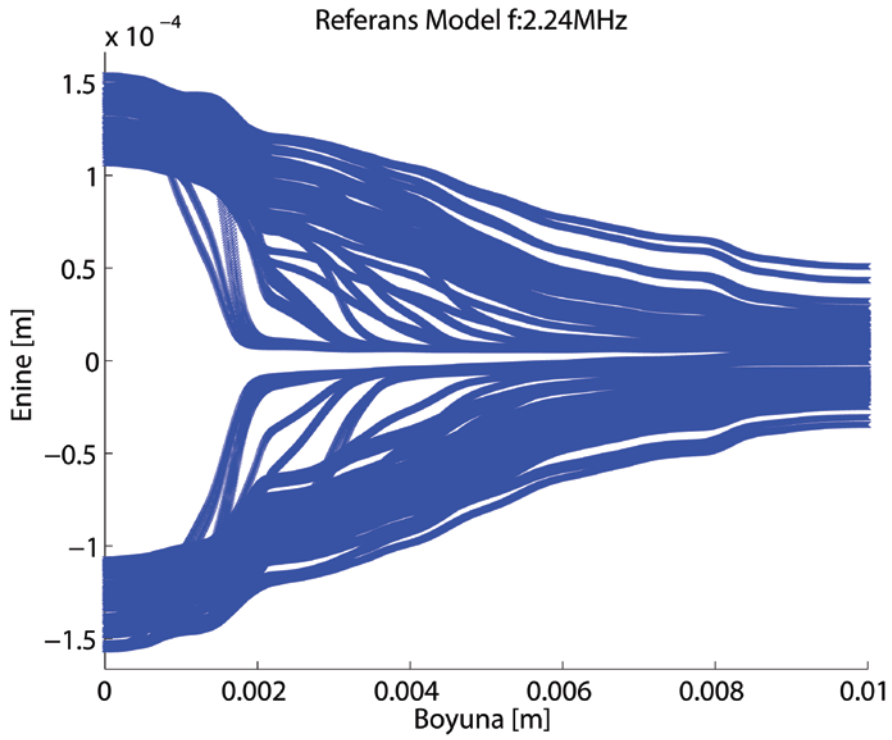


Şekil 3.21 Kanal kesitindeki basınç alanları a) Düzlemsel dalga b) Referans model

Şekil 21’de iki modelin de parçacıkları ortaya getirdiği fakat düzlemsel dalga kullanılan modelde kuvvetlerin daha yüksek olduğu görülmüştür yani piezonun modele alınması sonuçları etkilemektedir. Bu nedenle gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmesi için piezo malzeme akustik modellerine eklenmiştir.



Şekil 3.22 Düzlemsel dalga parçacık yörüngeleri



Şekil 3.23 Referans model parçacık yörüngeleri

3.3.2 Model Geometrisinin Etkisi

Çipler üretilirken çeşitli sebeplerle istenen ölçülerde üretilemeyebilir. Bu bölümde kanal ve çip boyutlarındaki değişimlerin ve hataların sistem performansını nasıl etkilediği incelenmiştir. Akustik modellerin farklı frekanslardaki cevabı da alınmıştır. Bütün simülasyon sonuçlarını grafik olarak incelemek çok zor olduğu için parçacık yörünge koordinatları kullanılarak bazı parametreler türetilmiş ve bu parametreler ile sonuçlar yorumlanmıştır. Bu parametreler; “Normalize Edilmiş Ortalama Konum Değeri”, “Normalize Edilmiş Konum Değeri Standart Sapma”, “Normalize Edilmiş Salınım”, “Normalize Edilmiş Ortalama Yer Değiştirme Değeri” ve “Takılı Kalanlar” parametreleridir. Parçacıklar akustik alana Şekil 3.22 ve 3.23’te gözüktüğü iki grup olarak girmektedir. İki grup birbirinden farklı yörüngeler izleyebileceği için sonuç parametreleri iki grup için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Normalize edilmiş ortalama konum değeri, parçacıkların akustik alandan çıktığı anda kanalın ortası referans alınarak belirlenen ortalama konumunun kanal genişliğinin yarısına bölünerek elde edilen değerdir. Yani parçacıkların büyük çoğunluğunun kanalın merkezine ne kadar uzakta olduğu bu parametre ile anlaşılabilir. Parametrenin sıfıra yakın olması parçacıkların kanalın merkezine yakın olduğunu göstermektedir. Normalize edilmiş konum değeri standart sapma parçacıkların hesaplanan ortalama konum etrafındaki yüzde saçılımını göstermektedir. Bu parametrenin düşük olması parçacıkların dar bir bantta toplandığını, yüksek olması ise geniş bir bantta toplandığını gösterir. Normalize edilmiş salınım değeri parçacıkların ilk konumlarından son konumlarına nasıl gittiklerini gösterir. Parçacığın y eksenindeki toplam yer değiştirmesinin ilk ve son konumu arasındaki en kısa yola bölünmesi ile bulunur. Bu değer yüksek ise parçacıklar kanal içerisinde zikzaklar çizerek hareket ediyor, düşük ise düz bir hattı takip ediyorlar demektir. Parçacığın z ekseninde hareket ettirilmesi veya herhangi bir bölgeye toplanması amaçlanmamaktadır fakat bu eksen de hareket oluşabilir. Parçacıkların z eksenindeki hareketini tanımlamak için normalize yer değiştirme değeri kullanıldı. Normalize edilmiş ortalama yer değiştirme değeri parçacıkların ortalama olarak hareket ettiği mesafeyi göstermektedir. Bu parametreler x ve z eksenleri için farklı hesaplanmaktadır. Fakat asıl olarak ayrıştırmanın yapıldığı x eksen yönündeki parametreler kullanılmıştır, z eksen parametreleri fikir oluşturması açısından yardımcı

parametrelerdir. İsimlendirmedeki normalize edilmiş kelimesi normalize edilmiş salınım değeri hariç sonuçların kanal boyutlarına göre normalize edildiğini göstermektedir, y eksen parametreleri kanal genişliğinin yarısına bölünürken, z eksen parametreleri kanal yüksekliğine bölünmüştür. Akustik kuvvetin parçacıkları kanalın duvarına doğru ittiği durumlarda parçacıklar çok yavaş hareket edebilirler, bu parçacıkların hareketini tamamlaması hesaplanamayacak kadar çok uzun zaman aldığı için bu parçacıkların takılı kaldığı kabul edilir. Bu parametreyi de takılı kalanlar ifade etmektedir.

Bu bölümde elde edilen sonuçlar toplu olarak Çizelge 3.7’de verilmiştir. Sonuçlar elde edilirken her bir simülasyonda 800 adet parçacık kullanılmıştır.

Çizelge 3.7 Model geometrisi değiştirilerek alınan sonuçlar

		Referans Model			Çip Genişliği formülü değişti			Kanal Yüksekliği Arttırıldı			Genişlik 2MHz'e göre ayarlandı		
Frekans (MHz)		2.24	2.25	2.26	2.24	2.25	2.26	2.24	2.25	2.26	2.24	2.25	2.26
x Eksen	1. Grup Normalize Edilmiş Ortalama Konum Değeri (%)	8.1	10.4	6.9	6.1	4.2	3.9	15.4	27.0	14.3	62.7	32.6	-3.4
	2. Grup Normalize Edilmiş Ortalama Konum Değeri (%)	-7.3	-7.9	-7.9	-6.6	-5.3	-4.8	-10.5	-22.0	-13.9	-54.5	-19.0	-4.8
	1. Grup Normalize Edilmiş Konum Değeri Standart Sapma (%)	4.8	6.5	5.4	4.0	2.0	2.4	9.1	24.5	9.1	41.0	38.2	3.0
	2. Grup Normalize Edilmiş Konum Değeri Standart Sapma (%)	6.9	8.6	4.3	3.9	5.3	2.7	13.1	17.1	10.4	38.9	23.9	0.5
	1. Grup Normalize Edilmiş Salınım (%)	0.4	0.4	1.6	0.0	1.9	3.5	0.7	52.4	1.4	549.0	441.5	19.5
	2. Grup Normalize Edilmiş Salınım (%)	0.0	0.2	2.6	0.0	6.4	2.4	0.5	4.4	1.2	525.4	307.8	13.1
z Eksen	1. Grup Normalize Edilmiş Ortalama Yer Değiştirme Değeri (%)	17.5	18.4	18.4	19.4	38.6	48.2	4.3	32.9	10.6	61.2	58.1	53.0
	2. Grup Normalize Edilmiş Ortalama Yer Değiştirme Değeri (%)	16.1	17.6	18.3	19.9	38.4	45.1	4.7	17.6	11.7	58.6	43.1	47.5
	1. Grup Normalize Edilmiş Konum Değeri Standart Sapma (%)	25.0	26.9	24.3	23.0	13.4	11.8	32.7	26.7	26.7	8.3	6.6	7.0
	2. Grup Normalize Edilmiş Konum Değeri Standart Sapma (%)	26.3	28.4	24.6	23.2	14.4	11.5	33.4	25.5	26.1	8.7	5.4	6.1
Takılı Kalanlar		0	0	0	0	5	24	0	46	8	65	105	80

3.3.2.1 Çip Genişliğinin Etkisi

Önceden de belirtildiği gibi çip genişliği (2.37)'ye göre hesaplanmaktaydı. Çip genişliğini formül ile belirlemenin amacı maksimum genlikli durağan dalgayı elde etmektir. Bu formül girdi olarak dalga boylarını kullanmaktadır, dalga boylarının da frekansa bağlı olarak değiştiği düşünülürse bir tasarım frekansı olması gerekir. Tasarım frekansına göre dalga boyları hesaplanarak çip genişlikleri hesaplanabilir. Kanal genişliği tek bir yarım dalga boyunda olmalıdır böylece parçacıklar kanal içerisinde sadece tek bir çizgiye toplanabilir. Kanal ile piezo malzeme arasındaki mesafe ise çip malzemesi içindeki dalga boyunun $(2n+1)/4$ katlarından biri olmalıdır. Buradaki n sayısı tasarım yapan kişinin belirleyeceği bir sayıdır, çip üretilebilir ölçülerde olacak şekilde belirlenmesi gerekir. Referans modelde n sayısı 6, frekans 2,25MHz iken çip genişliği ise 3,4244 mm'dir. Kanal genişliği n sayısından bağımsız olarak 333µm'dir.

Çip genişliği formülü değiştirilerek simülasyonlar tekrarlandı. Kanal ile piezo malzeme arasındaki mesafenin çip malzemesi içindeki dalga boyunun $n/2$ katlarından biri olduğu durum incelendi. Karşılaştırılan modelde de n sayısı 6 verildi, yeni formüle göre çip genişliği 3,1867 mm hesaplandı. Yani iki çip arasındaki genişlik farkı 0,2357 mm iken sonuçlar karşılaştırıldı.

Çizelge 3.7'deki sonuçlara bakarak, çip genişliğinin arttırıldığı durumda standart sapmanın bütün frekanslarda iki grup için de azaldığı görülmektedir. Standart sapmanın az olması kuvvetin parçacıkların çoğunu kanaldan çıkmadan önce bir düğüm çizgisi yakınına getirebilecek kadar yüksek olduğunu göstermektedir. Kuvvetin yüksek olması ortalama konum değerinin referans model değerinden daha iyi olmasına neden olmuş olabilir. Fakat salınım tasarım frekansında referans modele göre çok yüksektir. Değiştirilen modelde z eksenindeki yer değiştirmenin yüksek, standart sapmanın düşük olması parçacıkların z ekseninde de kuvvete maruz kaldığını göstermektedir. Referans modelde hiç parçacık takılı kalmaz iken değiştirilen modelde frekans arttıkça takılan parçacık sayısı artmıştır. Bu nedenle değiştirilen modelde daha yüksek kuvvetler elde edilse de daha kararlı ve dengeli olduğu için referans model tercih edilmiştir. Sonuç olarak ortalama konum değerleri göz önünde

bulundurulduğunda çip genişliğinin sistem performansını çok fazla etkilemediği hatta iyileştirdiği düşünülse de sistemin kararlı çalışması için çip genişliğinin mümkün olduğunca formüle uyması gerekmektedir.

3.3.2.2 Kanal Yüksekliğinin Etkisi

Bu bölümde referans modele göre sadece kanal yüksekliği artırıldı. 120 µm olan kanal yüksekliği kanal genişliği ile aynı ölçüye yani 330 µm'ye getirildi. Kanal yüksekliğinin artırılması kanal içerisindeki ortalama hızı değiştirmeden daha yüksek debilerin geçirilmesine olanak sağlamaktadır bu şekilde sistem verimi artırılabilir. Silikon çiplerin üretim tekniğinden dolayı derin kanallar açılmamaktadır fakat PDMS çipler döküm yapılarak elde edildiği için istenen yükseklikte çip üretilebilir.

Çizelge 3.7'deki ilgili sonuçlara bakılırsa kanal yüksekliğinin artırılması sonuçları özellikle tasarım frekansında kötü etkilemiştir. Standart sapmanın z ekseninde yüksek olması kuvvetin z ekseninde düşük olduğunu, salınımın yüksek olması ise parçacıkların kararsız hareket ettiğini göstermektedir. Bir diğer nokta ise 2,25 ve 2,26MHz'de parçacıkların z eksenindeki yer değiştirmelerinin yüksek olmasına rağmen z eksenindeki konum standart sapmalarının çok yüksek olmaması. Bu durum z ekseninde oluşan kuvvetin bütün parçacıklara aynı şekilde etki etmesi ile açıklanabilir ki kanal yüksekliğinin yarım dalga boyunda olması z eksenindeki kuvvetin bu şekilde oluşmasına neden olabilir. Değiştirilen modelde takılı kalan parçacıklar da bulunmaktadır. Bu nedenle yüksekliği az olan (~100-150 µm) kanallar tercih edilmiştir.

3.3.2.3 Kanal Genişliği ve Frekans Uyumu Etkisi

Önceki bölümlerde akustik model çözümü tasarım frekansına yakın frekanslarda incelenmişti. Bu bölümde çip tasarımı 2MHz frekansı için yapıldı, sistemin 2,25MHz frekansındaki cevabı incelenmiştir. Tasarım frekansı değiştiği için hem çip hem de kanal genişliği değişecektir, daha düşük frekanslarda dalga boyu artacağı için çip ve kanal genişliği de artmıştır. Kanal genişliği 333 µm'den 375 µm'ye, çip genişliği ise aynı n sayısı ile 3,4244 mm'den 3,585 mm'ye çıkmıştır.

Çizelge 3.7'deki sonuçlar incelendiğinde tasarım frekansından uzaklaşıldığında sistem performansının oldukça düştüğü görülmektedir. Özellikle 2,24MHz'de parçacıklar bir çizgide toplanmak yerine kanalın her yerine dağılmıştır. Toplanmanın en iyi olduğu 2,26MHz'de bile takılı kalan 80 parçacık bulunmaktadır. Bu durumun nedeni duvara yakın yerlerde oluşan basınç düğüm noktaları olabilir. 2,25MHz'de yarım dalga boyu 333 μm iken kanal 375 μm genişliğindedir yani basınç düğüm noktalarından biri kanalın tam ortasında oluşsa dahi kanalın iki yanında 20 μm 'lik kısımlardaki parçacıklar diğer basınç düğüm noktalarına hareket edeceklerdir. Diğer basınç düğüm noktalarına hareket eden parçacıklar düğüm noktasına ulaşmadan duvara yapışacak ve hareketleri oldukça yavaşlayacaktır ve takılı kalacaklardır. Bu nedenle en önemli kriterin kanal genişliği ve frekans uyumu olduğu söylenebilir.

3.3.3 Piezoların Simetrisinin Etkisi

Akustik kuvvet etki ettiğinde parçacıkların üzerine hareket ettiği basınç düğüm çizgisinin kanalın ortasında oluşabilmesi için çip simetrisinin önemli olduğundan bahsedildi. Bu bölümde piezo malzemelerden kaynaklanan simetri bozulmalarının sistem performansına etkileri incelenmiştir. Simülasyon sonuçları bir önceki bölümde olduğu gibi kolay karşılaştırma yapılabilmesi için toplu olarak Tablo 7'de verilmiştir.

3.3.3.1 Piezoların Kanala Eşit Mesafede Olmaması

Referans modele göre kanal 50 μm kaydırıldı. Böylece kanal bir piezoya diğer piezodan 100 μm daha hale yakın geldi. Bu durum çip üretilirken piezo malzemenin yanlış montaj edildiği durumu simüle etmektedir.

Çizelge 3.8'deki sonuçlara bakılırsa simetrisinin bozulması sistem performansını oldukça düşürmektedir. Hem ortalama konum değerleri hem de konum standart sapma değerleri referans model değerlerinden oldukça uzaktır. Burada dikkat çeken bir husus ise birinci grup ve ikinci grup değerlerinin birbirinden uzaklaşmasıdır. İki grup değerleri arasındaki fark simetrisinin bozulması ile açıklanabilir. Simetrisinin bozulması basınç düğüm çizgilerinin istenmeyen bölgelerde oluşmasına sebep olacaktır.

Çizelge 3.8 Piezo simetrisi değiştirilerek alınan sonuçlar

		Referans Model			Piezo Mesafeleri Farklı			Bir piezo 0.5 mm büyük			Bir piezo 0.1 mm büyük			Bir piezo 0.1 mm büyük ve mesafeler farklı		
Frekans (MHz)		2.24	2.25	2.26	2.24	2.25	2.26	2.24	2.25	2.26	2.24	2.25	2.26	2.24	2.25	2.26
x Eksenli	1. Grup Normalize Edilmiş Ortalama Konum Değeri (%)	8.1	10.4	6.9	37.0	37.0	36.6	46.7	61.8	30.8	4.0	-5.2	-41.4	36.5	15.3	-1.3
	2. Grup Normalize Edilmiş Ortalama Konum Değeri (%)	-7.3	-7.9	-7.9	7.8	-1.5	22.7	NaN	-82.4	-59.9	-20.5	-36.2	-57.1	4.3	-2.5	-16.7
	1. Grup Normalize Edilmiş Konum Değeri Standart Sapma (%)	4.8	6.5	5.4	2.8	3.6	2.6	5.1	6.6	27.6	14.5	34.2	25.1	5.6	13.9	10.2
	2. Grup Normalize Edilmiş Konum Değeri Standart Sapma (%)	6.9	8.6	4.3	31.6	29.0	16.1	NaN	16.2	19.6	5.7	8.0	5.9	21.4	10.8	4.6
	1. Grup Normalize Edilmiş Salınım (%)	0.4	0.4	1.6	4.4	8.3	34.0	387.9	2224.9	220.5	52.8	184.6	77.1	62.7	163.8	41.2
	2. Grup Normalize Edilmiş Salınım (%)	0.0	0.2	2.6	28.0	21.1	25.1	NaN	1505.1	1985.3	69.8	222.2	941.0	43.5	117.0	79.5
z Eksenli	1. Grup Normalize Edilmiş Ortalama Yer Değiştirme Değeri (%)	17.5	18.4	18.4	10.4	9.4	12.3	45.0	31.8	55.8	43.9	111.2	75.8	29.9	92.4	60.0
	2. Grup Normalize Edilmiş Ortalama Yer Değiştirme Değeri (%)	16.1	17.6	18.3	39.6	45.8	38.4	NaN	98.4	52.0	39.0	49.6	40.8	37.0	49.9	46.2
	1. Grup Normalize Edilmiş Konum Değeri Standart Sapma (%)	25.0	26.9	24.3	28.9	30.8	32.6	29.6	35.1	28.4	22.6	26.7	25.4	17.2	8.0	19.7
	2. Grup Normalize Edilmiş Konum Değeri Standart Sapma (%)	26.3	28.4	24.6	28.5	28.3	37.2	NaN	30.8	29.3	18.1	26.9	15.7	21.8	20.6	14.4
Takılı Kalanlar		0	0	0	237	134	50	400	283	232	0	43	16	0	0	0

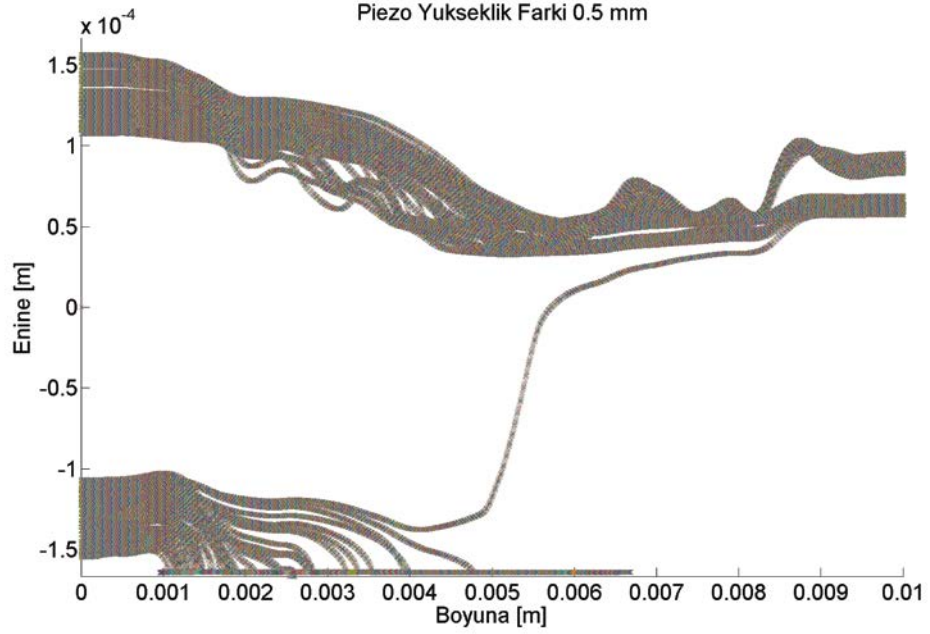
Frekans 2,24MHz iken birinci grubun ortalama konum değeri kötü, standart sapması iyi çıkmış, ikinci grubun ise ortalama konum değeri iyi, standart sapması oldukça kötü çıkmıştır. Bu durum 1. gruptaki parçacıkların toplu bir şekilde kanalın ortasından uzak bir çizgide toplandığını, ikinci grup parçacıkların ise çok dağınık bir şekilde kanalın ortasına doğru toplandığını göstermektedir. Sistemin farklı frekanslarda da çok farklı tepkiler vermesi, sistemin oldukça kararsız olduğunu göstermektedir. Ayrıca takılı kalan parçacık sayısı da oldukça fazladır. Takılı kalan parçacıkların sebebi önceden de belirtildiği gibi kanal duvarlarına yakın oluşan basınç düğüm çizgileridir. Bu sonuçlardan çip tasarlanırken ve üretilirken piezo konumlandırmasının ve simetrisinin sağlanmasının ne kadar önemli olduğu görülmektedir.

3.3.3.2 Piezo Boyutlarının Etkisi

Bu bölümde iki piezo boyutu arasındaki farkın sistem performansını nasıl etkilediği incelenmiştir. Önceki modellerde kullanılan çözüm ağının tekrar kullanılabilmesi için piezo boyutu sadece yükseklik yönünde değiştirilmiştir. Piezo kalınlığı değiştirilemez bir parametredir ve piezonun rezonans frekansını belirler.

İki piezo yüksekliği arasındaki fark ilk etapta 0,5 mm'ye çıkarılmış ardından 0,1 mm fark ile tekrar simülasyon yapılmıştır. Çizelge 3.8'deki sonuçlardan 0,5 mm yükseklik farkının sonuçları epey kötüleştirdiği görülmektedir. Özellikle 2,24MHz'de ikinci grup parçacıkların hepsi duvara takılı kalmıştır bu nedenle ikinci grup parametreleri hesaplanamamıştır. Önceki sonuçlara göre önemli bir değişiklik ise salınımların aşırı artışıdır. Bu iki durum parçacık yörüngelerini gösteren Şekil 3.24'te görülmektedir. Sağ tarafta başlayan parçacıkların hepsi kanal duvarlarına yapışmıştır. Aynı grafik 3 boyutlu olarak incelendiğinde takılı kalan parçacıkların hepsinin kanalın üst duvarına doğru hareket ettiği, sadece kanalın alt tarafından ilerleyen bir parçacığın diğer gruba katılabildiği görüldü. Birinci grubun ise çıkışa iki küme olarak geldiği, dış tarafta oluşan ikinci kümeyi kanalın üst duvarına yapışan parçacıkların oluşturduğu gözlenmiştir. Birinci kümeyi oluşturan parçacıkların ise kanalın yüksekliği boyunca eşit şekilde dağıldığı görülmüştür. Buradan z yönünde hareket eden parçacıkların

takılma olasılığının arttığı görülmüştür. Parçacık salınımları da birinci grup tarafında açıkça görülebilmektedir.



Şekil 3.24 Piezo boyut farkı 0,5 mm iken parçacık yörüngeleri

Piezo yükseklik farkı düşürülerek simülasyonlar tekrarlandı böylece piezo boyutuna olan hassasiyet hakkında fikir sahibi olundu. Çizelge 3.8’de piezo yükseklik farkı 0,1 mm iken sistem performansının bir önceki duruma göre oldukça arttığı özellikle 2,24MHz’de parametrelerin neredeyse referans sistem sonuçlarına eşit çıktığı görülmektedir. Birinci grup standart sapma ve ikinci grup ortalama konum değerleri dışında sonuç istenene yakın çıkmaktadır. Burada dikkat edilecek bir husus salınımın referans sisteme göre yüksek fakat bir önceki modele göre düşük olmasıdır. Buradan piezo boyut simetrisi bozuldukça salınımların artacağı sonucu çıkartılabilir. Diğer bir nokta ise referans sistem frekansa bağımlı değil iken simetrisi bozuk olan sistemin frekansa bağımlı olması, farklı frekanslarda hem iyi hem kötü sonuçlar verebilmesidir. Frekans 2,26MHz iken ortalama konum değerleri oldukça yüksek çıkmaktadır. Bu verilere dayanarak eğer çipte simetri bozulması var ise sistemin frekansa hassaslaştığı ve düzgün çalıştığı frekans bandının daraldığı söylenebilir. Simetride bozukluk az ise sistem frekans taraması yapılarak istenene yakın performansta çalıştırılabilir fakat bozulma bir düzeyi aştığında bu durumu değiştirmektedir. Simülasyonlar yapılırken

sadece 3 frekans değerine bakılmakta, bu nedenle piezo yükseklik farkının 0,5 mm olduğu modelin de dözgün çalışacağı bir frekans bandı bulunabilir. Fakat bu bant daraldıkça sistemin çalışacağı uygun frekansını bulmak oldukça zorlaşacaktır. Sonuç olarak piezo boyutlarının mümkün olduğunca birbirine yakın olması, sistemin çalıştığı frekans bandını genişleteceği için piezo boyut simetrisine dikkat edilmesi gerekir.

3.3.3.3 Piezo Boyutlarının ve Konumlarının Etkisi

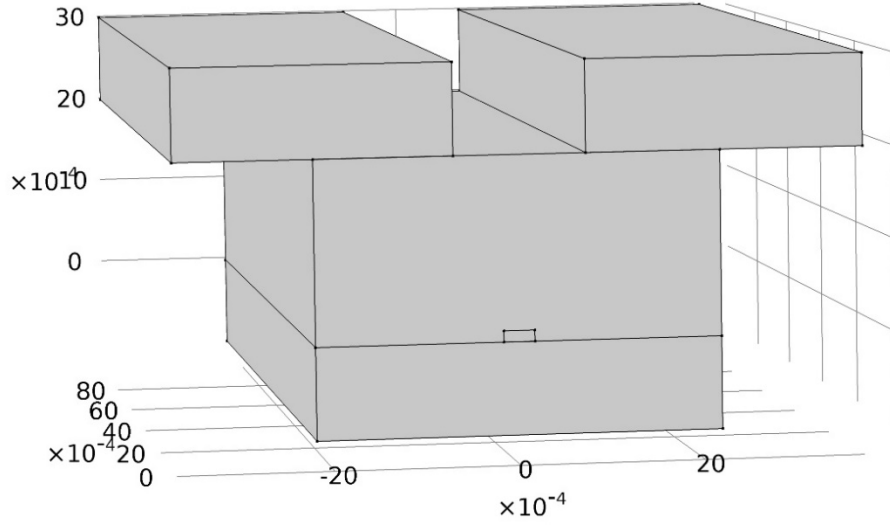
Hem piezo boyutunun farkının 0,1 mm olduğu hem de piezoların kanala eşit mesafede olmadığı durumun simülasyonu yapılarak sonuçlar referans modelin sonuçları ile karşılaştırıldı.

Simülasyonlar sonuçları izelge 3.8’de görüleceği gibi iki asimetric durumun ayrı ayrı elde edilen sonuçlarından daha iyi sonuç vermektedir. İki parçacık grubunun sonuç parametreleri simetride çok küçük bir bozukluk varmış gibi birbirlerine yakındırlar. Ortalama konum değerleri ve ortalama konum standart sapma değerleri 2,24MHz hariç oldukça yeterlidir. Bazı frekanslarda z ekseninde de toplanmalar olsa da hiçbir parçacık takılı kalmamıştır yani basınç düğüm çizgisi istendiği gibi kanalın ortasına yakın bir yerde oluşmuştur. Bu durum iki asimetricinin birbirinin etkisi snmlemiş olması ile açıklanabilir.

3.3.4 Piezo Konfigürasyonun Etkisi

Bu kısımda piezo konfigürasyonu değiştirilerek daha verimli bir sistem elde edilmeye çalışılmıştır. Piezolar çipin st tarafına alınmıştır, yeni piezo konfigürasyonu Şekil 3.25’te gösterilmiştir. Piezoların üstte olması üretim açısından kolaylık sağlamaktadır. Piezoların yanda olduğu konfigürasyonda piezolar kalıba PDMS dökümü öncesinde yerleştiriliyor. Fırınlama sonrasında ip kalıptan çıkartılırken piezoların ipten ayrılma olasılığı bulunuyor. Piezo stten yapıştırıldığında bu olasılık ortadan kalkıyor.

Piezo malzeme çipin stende iken simetric durum ve asimetric durumlar için simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyon sonuçları toplu olarak izelge 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.25 Piezonun üstte olduğu model görünümü

Çizelge 3.9 Piezo konfigürasyonu değiştirilerek alınan sonuçlar

		Piezo Üstte Simetrik			Piezo Boyutu Simetrik Konumu Asimetrik			Piezo Boyutu ve Konumu Asimetrik		
Frekans (MHz)		2.24	2.25	2.26	2.24	2.25	2.26	2.24	2.25	2.26
x Eksenli	1. Grup Normalize Edilmiş Ortalama Konum Değeri (%)	69.5	72.9	70.4	77.5	72.5	72.1	-58.4	2.6	60.9
	2. Grup Normalize Edilmiş Ortalama Konum Değeri (%)	-68.5	-72.7	-71.8	-71.3	-71.7	-69.3	-91.4	-82.6	-64.8
	1. Grup Normalize Edilmiş Konum Değeri Standart Sapma (%)	15.6	12.6	10.4	13.5	12.0	9.7	52.5	65.4	40.0
	2. Grup Normalize Edilmiş Konum Değeri Standart Sapma (%)	16.2	12.2	11.1	12.4	11.8	9.4	9.0	6.0	4.7
	1. Grup Normalize Edilmiş Salınım (%)	197.9	1344.4	538.8	160.8	1911.8	355.7	20.7	1119.9	1422.1
	2. Grup Normalize Edilmiş Salınım (%)	193.3	121.7	201.2	154.4	280.1	294.1	909.4	7491.4	87.7
z Eksenli	1. Grup Normalize Edilmiş Ortalama Yer Değiştirme Değeri (%)	39.4	50.0	28.2	59.2	56.0	34.5	39.3	31.2	26.2
	2. Grup Normalize Edilmiş Ortalama Yer Değiştirme Değeri (%)	40.5	45.6	34.4	55.5	56.1	35.9	40.9	32.9	32.5
	1. Grup Normalize Edilmiş Konum Değeri Standart Sapma (%)	16.5	18.0	14.5	24.9	20.2	19.1	27.4	37.2	36.5
	2. Grup Normalize Edilmiş Konum Değeri Standart Sapma (%)	17.5	16.3	16.1	23.6	21.2	21.0	16.4	23.1	25.4
Takılı Kalanlar		0	0	0	0	0	0	0	0	0

3.3.4.1 Simetrik Durum

Piezo ve kanalın simetrik olduğu durumun Çizelge 3.9'daki sonuçlarına bakılarak sistem performansının düşük olduğu söylenebilir. Ortalama konum değeri yüksek iken standart sapmanın düşük olması ise tüm parçacıklara aşağı yukarı eşit kuvvet etkiğini fakat kuvvetin yetersiz geldiğini göstermektedir. 2 parçacık grubu parametrelerinin birbirine yakın olması kuvvet dağılımında da simetri olduğunu gösterir. Salınım değerinin referans değere göre arttığı görülmektedir. Diğer konfigürasyonlarda z ekseninde standart sapma azaldıkça takılı kalan parçacık sayısı artmakta idi fakat bu konfigürasyonda ortalama yer değiştirme z ekseninde artıp z eksenindeki konum standart sapmasını değiştirse de hiçbir parçacık takılı kalmamıştır. Bu konfigürasyonun tek dezavantajı kuvvet genliğinin düşük oluşudur.

3.3.4.2 Piezo Konumu Asimetrik

Çipin üzerindeki piezolardan birisi 50 µm kaydırıldı böylelikle çip üretilirken oluşabilecek montaj hatası simüle edildi. Çizelge 3.9'daki simetrik olan durum sonuçları ile piezo konumlarının asimetrik olduğu durum sonuçları karşılaştırılırsa hiçbir parametrede sonucun belirgin bir şekilde değiştiği söylenemez. Aynı asimetrinin bulunduğu ve önceki piezo konfigürasyonu ile yapılan simülasyon sonuçları ile karşılaştırıldığında ise kuvvetin yeterli olmamasından kaynaklı olarak performansın düşük olduğu söylenebilir. Ortalama konum değerleri önceki konfigürasyonda daha düşük çıkmaktadır fakat yeni piezo konfigürasyonunda takılan parçacık bulunmamaktadır. Bu durumda piezoların çipin üstünde bulunduğu konfigürasyonun piezo konumundan kaynaklanan asimetrilere karşı daha az hassas olduğu söylenebilir.

3.3.4.3 Piezo Konumu ve Boyutu Asimetrik

Bu kısımda hem piezo konumunun hem de piezo boyutunun asimetrik olduğu durum incelendi. Piezo simetrisi piezolardan birisinin 50 µm kaydırılması, piezo boyutu ise piezolardan birinin boyutunun 0,5 mm artırılması ile bozuldu. Çizelge 3.9'daki sonuçlar karşılaştırıldığında piezo boyutunun iki grup parametreleri arasında farka neden olduğu görülmektedir. Ortalama konum değerleri frekansa göre çok fazla

değişim göstermektedir yani sistem frekansa bağımlı hale gelmiştir. Salınımlar diğer modellere göre artış göstermiştir fakat hiçbir frekansta takılı kalan parçacık yoktur. Sonuçlara bakarak piezonun üstte olduğu konfigürasyonun daha kararlı olduğu fakat oluşturduğu kuvvet genliğinin oldukça küçük olduğu söylenebilir.

3.3.5 Çip Malzemesinin Etkisi

Bu bölümde çip malzemesi olarak PDMS yerine literatürde sıkça kullanılan silikon kullanılmıştır. Bölüm 3.3'ün girişinde belirtildiği gibi bu iki çip malzemesinde piezo konfigürasyonlarının farklı olması gerektiğinden bahsedilmişti. Deneme amaçlı olarak iki piezo konfigürasyonu ile de simülasyonlar yapıldı. Ardından iyi olan konfigürasyon ile simetri bozularak simülasyon tekrar edildi. Bu bölümün simülasyon sonuçları toplu olarak Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.10 Çip malzemesi değiştirilerek alınan sonuçlar

		Silikon Simetrik Piezo Yanda			Silikon Simetrik Piezo Üstte			Silikon Asimetrik Piezo Yanda		
		2.24	2.25	2.26	2.24	2.25	2.26	2.24	2.25	2.26
x Eksenli	Frekans (MHz)									
	1. Grup Normalize Edilmiş Ortalama Konum Değeri (%)	34.6	43.6	32.5	74.5	71.5	63.0	45.8	92.3	40.5
	2. Grup Normalize Edilmiş Ortalama Konum Değeri (%)	-35.4	-41.6	-31.7	-74.8	-71.4	-63.0	-72.5	-85.0	-60.3
	1. Grup Normalize Edilmiş Konum Değeri Standart Sapma (%)	18.2	17.6	16.4	8.6	7.8	8.9	72.0	7.9	46.3
	2. Grup Normalize Edilmiş Konum Değeri Standart Sapma (%)	17.6	18.3	16.7	8.4	7.5	8.5	3.9	14.0	16.8
	1. Grup Normalize Edilmiş Salınım (%)	0.0	0.0	0.0	8.9	2.5	0.0	9.8	609.3	1103.9
2. Grup Normalize Edilmiş Salınım (%)	0.0	0.0	0.0	11.2	2.7	0.0	1328.1	525.6	3258.0	
z Eksenli	1. Grup Normalize Edilmiş Ortalama Yer Değiştirme Değeri (%)	5.6	5.2	6.3	6.4	6.2	8.8	29.5	50.4	86.6
	2. Grup Normalize Edilmiş Ortalama Yer Değiştirme Değeri (%)	5.3	5.3	6.4	6.7	6.3	9.7	22.8	41.5	39.4
	1. Grup Normalize Edilmiş Konum Değeri Standart Sapma (%)	30.3	28.3	28.5	22.3	23.1	26.0	43.9	38.2	36.5
	2. Grup Normalize Edilmiş Konum Değeri Standart Sapma (%)	29.7	29.3	29.7	21.5	22.0	26.4	36.2	21.1	20.2
Takılı Kalanlar		0	0	0	0	0	0	0	413	536

3.3.5.1 Piezolar Yan Tarafda Simetrik

Bu kısımda referans modelin çip malzemesi değiştirilerek simülasyonlar yapıldı. Çip malzemesi değiştiği için dalga boyları değişti bu yüzden çip genişliği de değişti. Genişlik formülündeki n sayısı 6'dan 1'e indirildiğinde çip genişliği 3,4244'ten 5,93 mm'ye yükseldi. Bu fark PDMS ile silikon arasındaki akustik özellik farkını göstermektedir. Çip boyutları artsa da hesaplama yükü artmamıştır çünkü dalga boyu da arttığı için daha büyük elemanlar içeren sıkı olmayan bir çözüm ağı kullanılması yeterli olmuştur. Çizelge 10'da ki sonuçları referans model sonuçları ile karşılaştırılırsa silikon performansının PDMS kadar yüksek olmadığı görülür. Referans model sonuçlarında ortalama konum ve standart sapma değerleri silikona göre oldukça düşüktür. Bu fark kuvvet genliklerinin düşük olduğunu gösterir. Fakat performans farkı voltaj artırılarak kolayca kapatılabilecek bir seviyededir. Kuvvetin daha düşük çıkması kullanılan piezo konfigürasyonunun silikon çip için uygun olmamasından kaynaklanabilir. Çip tasarımı piezonun yanda olduğu konfigürasyonda dalganın doğrudan kanaldan geçeceği varsayımı ile yapılmaktadır fakat silikon ve su arasındaki empedans farkı kanal duvarlarında yansımalara neden olmaktadır. Sonuçlarda dikkat çeken bir nokta ise silikon modelde salınımların neredeyse sıfır olması. Salınım olmadığı zaman parçacık başlangıç ve bitiş konumlarının arasında düz bir çizgi izliyor demektir. Bu durum basınç düğüm çizgisinin de düz olduğunu kanal boyunca ilerledikçe kırılmalar göstermediğini ifade eder, düz bir basınç düğüm çizgisi kararlılık açısından istenen bir durumdur. Referans modelde olduğu gibi bu modelde de takılan parçacık bulunmamaktadır.

3.3.5.2 Piezolar Üst Tarafda Simetrik

Piezolar Şekil 3.25'te gösterildiği gibi çipin üst tarafına alınarak simülasyonlar tekrarlandı. Literatürde silikon çipe tek piezo takılmaktadır. PDMS çipe üsten takılan tek piezo ile parçacıkları ortaya getiren frekans elde edilemediği için piezoların üstte olduğu konfigürasyonda da çift piezo kullanıldı. PDMS ve silikon çiplerin sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için de aynı piezo konfigürasyonları kullanıldı. Piezolar üstte iken elde edilen simülasyon sonuçları aynı konfigürasyona sahip PDMS çip sonuçlarına oldukça benzemektedir. Ortalama konum değerleri ve konum standart

sapma değerleri oldukça yakın çıkmaktadır fakat silikon çipte parçacıklar hiç salınım yapmıyor ve z ekseninde de diğer modele göre daha az hareket ediyorlar. Bu sonuca bakılarak üstten iki piezo kullanıldığı durumda ip malzemesinin silikon veya PDMS olmasının önemli olmadığı söylenebilir fakat tam simetrik modeller çoğu zaman gerçek sistemin davranışını verememektedirler. Simülasyon sonuçları daha iyi çıktığı için piezoların yanda olduğu modele asimetri uygulanarak simülasyon tekrarlanmıştır.

3.3.5.3 Piezolar Yanda Asimetrik

Piezoların yanda olduğu konfigürasyonda asimetri oluşturulduğu zaman sistem performansı oldukça düşmüştür. Hem ortalama konum hem de takılan parçacık sayıları oldukça artmıştır. Ayrıca sistemin frekans hassasiyeti oldukça artmıştır. Bu sonuçlardan silikonun yandan piezo konfigürasyonu için uygun olmadığı görülmektedir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez çalışması kapsamında deneysel çalışmalar da yapılmıştır. Deneysel çalışmalar çip tasarımı, çip üretimi, deney düzeneğinin kurulması ve deneyin yapılma aşamalarını içermektedir. Simülasyon çalışmalarında olduğu gibi deney çalışmaları da zaman içerisinde geliştirilerek son halini almıştır. Simülasyon çalışmaları ve deney çalışmaları birbirini takip eden, doğrulayan ve birbirlerine yön verecek şekilde yapılmıştır. Çip tasarımları simülasyon sonuçlarına göre değiştirilmiş ve son şeklini almıştır. Deneysel çalışmalar çip üretimi, deney düzeneği ve metodu, çip tasarımları ve deney sonuçları adlı 3 alt başlıkta anlatılmıştır.

4.1 Çip Üretimi

Öncelikle uygun kanal geometrisi için kalıp tasarlandı. Kalıp Bilkent Üni. Mikro Sistem Tasarım ve Üretim Merkezi imkânları kullanılarak yüksek hassasiyetli talaşlı imalat teknikleri ile üretildi. Kalıbın teknik resmi Ek 1’de verilmiştir. Çipler kalıp kullanılarak PDMS’ten döküm yöntemi ile üretildi. Kalıp üretimi yapıldıktan sonra kanal genişliği ölçüldü 330 μm olarak tasarlanan kanal genişliğinin 350 μm ’ye yakın bir değerde üretilebildiği görüldü. Üretim aşamaları aşağıda verilmiştir;

- Kalıp ilk kullanımdan önce ultrasonik temizleyici ile temizlenir.
- Kalıp içerisinde kurumuş PDMS parçası veya toz varsa aseton ve su ile temizlenir.
- PDMS ve kür malzemesi 10:1 oranında homojen hale gelene kadar karıştırılır.
- PDMS ve kür malzemesi içerisindeki hava kabarcığı bitene kadar vakumda tutulur.
- Kalıp içerisine piezo malzeme yerleştirilecek ise dökümden önce yerleştirilir.
- PDMS kalıba dökülür.
- PDMS, döküm esnasında giren hava kabarcıklarının çıkarılması için tekrar vakumlanır.
- Kalıp 80 °C fırında PDMS’in kür olmasına bağlı olarak 30 ila 45 dakika arası pişirilir.
- PDMS kalıptan çıkarılır.
- PDMS ile cam, plazma yapıştırma yöntemi ile yapıştırılır.
- Yapışmanın tam olduğu ve içerisinde hava kalıp kalmadığı kontrol edilir.

- Çip içerisinde gömülü piezo var ise piezo ile PDMS temas yüzeylerinde de hava kabarcığı kontrol edilir. Küçük yüzeysel hava kabarcıkları önemli değildir fakat büyük tüm piezoya yayılan kabarcıklar varsa çip tekrar üretilmelidir.
- Çipte piezo yoksa piezo yapıştırılır ve piezo lehimleri yapılır.
- Rezervuar boşlukları açılır.

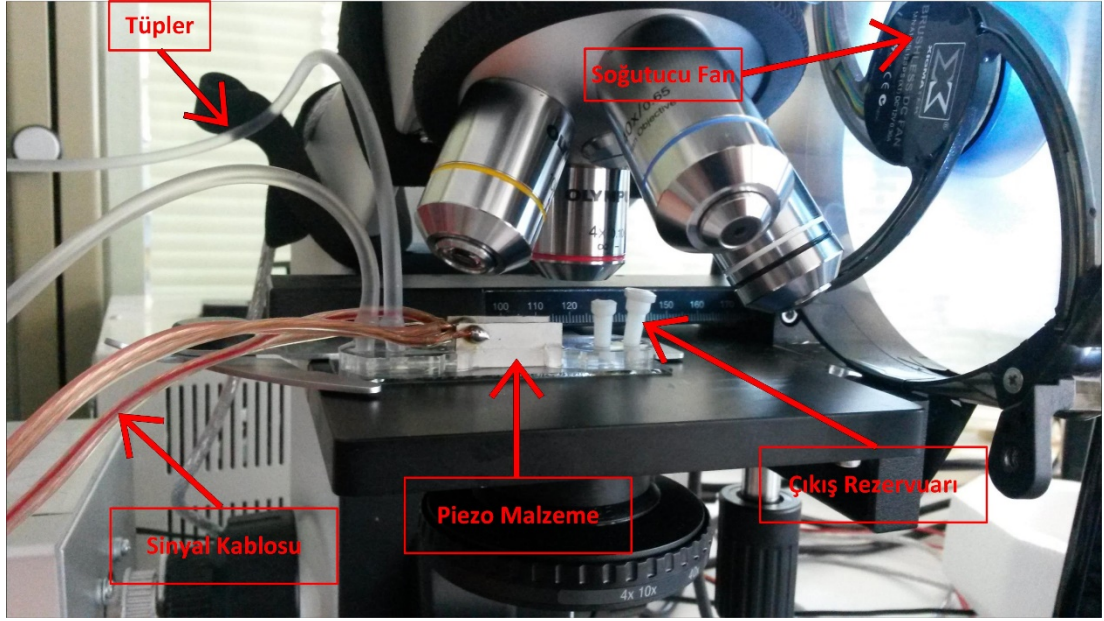
İki piezo içeren çip üretimi esnasında piezoların kesilmesi ve lehimlenmesi ayrı bir önem arz etmektedir. Piezolar izotropik malzemeler değildir yani farklı yönlerde farklı fiziksel özellik gösterirler. Çip tasarımı piezoların ters fazda titreştiği düşünülerek yapılmaktadır yani sistem sadece piezolar ters fazda titreştiğinde düzgün çalışmaktadır. Bunu yapabilmek için piezo malzemelerin polarite yönleri bilinmelidir. Polarite yönü verilen sinyalin piezoyu kalınlık yönünde uzatacağını ya da kısaltacağını belirler. Ters bağlanan iki piezoya aynı sinyal verildiğinde ters fazda çalışır yani birisi uzarken diğeri kısılır. Polarite yönleri piezoların kesilmesi esnasında kaybolduğu için piezoların kesilmeden önce polarite yönlerinin işaretlenmesi gerekmektedir aksi takdirde piezolar kullanılamaz veya polarite yönünün belirlenmesi için teste tabi tutulur. Piezolar kesildikten sonra kalıba ne şekilde konulduğu önemli değildir fakat lehim yapılırken polarite yönleri dikkate alınmalıdır. Çip piezo lehimleri yapıldıktan sonra kullanıma hazır hale gelir.

4.2 Deney Düzenegi ve Metodu

Deney düzenegi, şırınga pompa, şırınga, serum hortumu, sinyal jeneratörü, güç amfisi, mikroskop kamera, güç kaynağı, soğutucu fanlar ve osiloskoptan oluşmaktadır. Deney, bağlantıların yapılması, kanal içerisindeki havanın alınması ve akışın dengelenmesi ile başlar. Deney düzenegi Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

Hazırlanan parçacık solüsyonu 1 ml’lik insülin şırıngalarına çekildikten sonra havası alınarak çipin giriş rezervuarına bağlanır. Kanalın içine bir miktar sıvı basıldıktan sonra kanal içerisinde kalan hava çeşitli yöntemler ile kanaldan çıkartılır. Kullanılan düzenekte New Era NE-300 marka şırınga pompa kullanılarak kanalın içerisine parçacık solüsyonu veya saf su basıldı. Kullanılan ekipmanların veri föyleri ekte verilmiştir. Çok düşük debilerde veya uzun süre kullanılan şırıngalarda kuru

sürtünmeden dolayı akış düzensizlik gösterip nabız atışı şeklinde akabilir bu duruma dikkat edilmelidir. Akış dengeye ulaşana kadar beklenmelidir. Akış kontrol edildikten sonra kanal içerisinde akışı bozabilecek herhangi bir tıkanıklık, daralma veya yabancı cisim olup olmadığı mikroskop ile kontrol edilir. Parçacıkların bulunduğu düzleme odaklandıktan sonra akustik alan oluşturulur.



Şekil 4.1 Denei düzeneği fotoğrafı

Akustik alan piezoların ters fazda titreştirilmesi ile oluşturulur. Sistemin başarılı çalıştığı titreşim frekansının 2,2MHz olduğu deneysel olarak bulundu. Piezoya gidecek sinyal jeneratörü ile oluşturulur ve oluşturulan sinyal amfi ile yükseltilek ters fazda bağlanmış piezolarla gönderilir. Yükseltilek sinyal voltajı paralel olarak osiloskop yardımı ile okunur. Deneilerde Agilent 33250A model sinyal jeneratörü, Falco Systems WMA-300 model voltaj amfisi ve Ferroperm PZ-26 model piezo kullanıldı. Görüntüler AIV Labs. K3Dİ™ 3D Microscope Converter System ile kaydedildi.

Piezolarla giden sinyal yüksek frekans ve yüksek voltajda olduğundan çekilen güç de yüksektir. Çekilen güç nedeni ile piezolar bir süre sonra ısınmaya başlar. Piezoların açığa çıkan ısı çip içerisinde geçerek kanala ulaşır ve kanaldaki suyu ısıtmaya başlar. Isınan suda çözülmüş haldeki gazlar açığa çıkar ve akışı bozarak parçacık geçişini

engeller. Gaz açığa çıkmaya bile çipin ısınması çip malzemesinin ve kanal içerisindeki suyun akustik özelliklerini ve dalga boylarını değiştirir. Çip ve kanal genişlikleri belirli bir frekanstaki dalga boylarına göre belirlenip üretildiği için, optimum dalga boyundan uzaklaşılması sistemin performansını düşürmekte, durağan dalga basınç düğüm çizgilerini kaydırarak parçacıkların duvarda toplanmasına neden olmaktadır. Bu durum deney sırasında da gözlemlenmiştir. Akış durdurulduktan sonra piezolara sinyal verildiğinde parçacıkların bir çizgi haline geldiği ve bu çizginin çip ısındıkça yer değiştirdiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle sistemin istenen şekilde çalışması ve tekrar edilebilir sonuçlar elde edilebilmesi için sıcaklığın düşük ve sabit tutulması gerekmektedir. Bu nedenle çipin etrafına 14 cm çaplı fan yerleştirildi ve güç kaynağı ile beslendi. Daha düşük sıcaklıklara inebilmek için ortam sıcaklığı klima yardımı düşürüldü.

Sıcaklık kontrol altına alındıktan sonra parçacıkların kanal çıkışındaki hareketleri mikroskop ile gözlenir. Sistemin durağan hale gelmesi beklenir ve çıkış kanallarının ayrıldığı kısımlardaki sonuçlar kaydedilir.

4.3 Çip Tasarımları

4.3.1 Tasarım Kriterleri

Çip tasarımı buna bağlı olarak kalıp tasarımı çip genişliği, çip boyu, çip yüksekliği, kanal geometrisi gibi parametreleri kapsamaktadır. Bu parametreler yapısal parametreler, akış parametreleri ve akustik parametreler olmak üzere üçe ayrılabilir.

Yapısal parametreler çipin görevini yerine getirebilecek şekilde dayanım göstermesini sağlayan parametrelerdir. Çipin yapısal görevleri sızdırmazlık ve piezoya destek olmaktır. Yalıtım çipin cam üzerine yapıştırılması ile sağlanmaktadır. Tasarım yapılırken özellikle giriş ve çıkış rezervuarlarının arasındaki mesafe bu durum düşünülerek belirlenmelidir. İki rezervuar arası veya iki kanal arası yeterli mesafe bırakılmadığı durumlarda çip ile cam arasında sızdırmazlık sağlanamamakta ve iki haznedeki sıvılar birbirine karışabilmektedir. Aynı şekilde rezervuar veya kanalın çip duvarlarına yakın olması da sıvının çipin dışına akmasına sebep olabilir. Çipin diğer görevi de piezoya destek olmaktır. Piezonun yanda olduğu konfigürasyonda çip

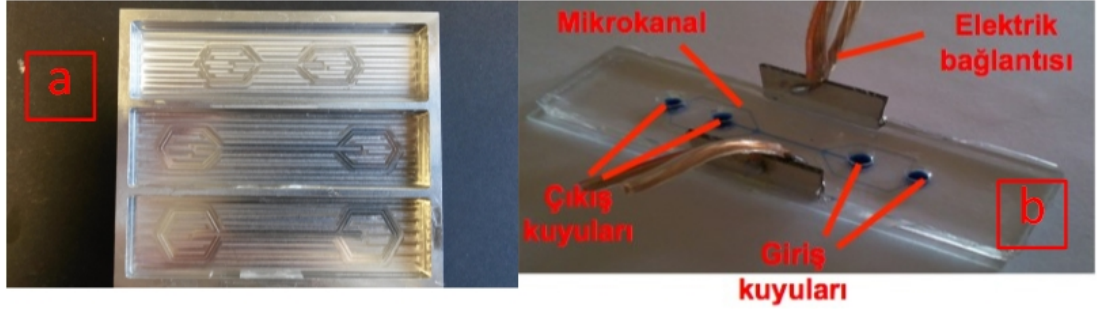
üretimi kısmında belirtildiği gibi piezolar dökümden önce kalıba yerleştiriliyor ve fırınlanıyor. Fırınlama sırasında piezolar çipe yapışıyor. Eğer çip yeteri kadar yüksek olmazsa kalıptan çıkarken piezo ayrılabilir. Bu nedenle çip yüksekliği de önemli bir yapısal parametredir.

Kanal içerisindeki akış sistem performansını oldukça etkilemektedir. Giriş kanallarındaki debi oranları, parçacık dağılımını, ana kanaldaki hız profilleri, parçacıkların akustik kuvvete maruz kalma sürelerini, çıkış kanallarındaki debi oranları ise parçacıkların hangi çıkış kanalından çıkacağını belirler. Bu nedenle akış parametreleri doğru belirlenmelidir. Giriş ve çıkış kanallarındaki debiler bu kanalların uzunluğuna, kesit alanlarına ve ana kanala bağlanma açılarına bağlıdır. Ana kanaldaki hız profilleri ise ana kanalın kesit alanına bağlıdır.

Akustik parametreler, çip ve kanal içerisinde oluşturulan akustik dalganın şeklini ve genliğini belirler. Akustik parametreler piezo yüksekliği, uzunluğu, piezo-kanal mesafesi ve kanal genişliğidir. Çip ve kanal genişliği önceki kısımlarda belirtildiği gibi (2.37)'de verilen formüle göre hesaplanmaktadır. Piezo mümkün olduğunca uzun tutulmaya çalışılmıştır. Böylece daha düşük voltajlarda daha az ısınarak çalıştırılması hedeflenmiştir fakat piezo boyunun ana kanal boyunu geçmemesine dikkat edilmiştir çünkü akustik kuvvetin yan giriş kanallarındaki parçacıklara etkimesi istenmemektedir. Ana kanala girmeden akustik kuvvetin etkimesi parçacıkların kanala simetrik bir şekilde girmesini engellemekte hatta parçacıkları durdurarak yan kanallardan birinin parçacık akışını kesebilmektedir.

4.3.2 Çip Tasarımları ve Deney Sonuçları

Çip tasarımları ve tasarım kriterleri simülasyonlarla birlikte gelişmiştir. İlk yapılan tasarımlar literatür çalışmalarından esinlenerek, piezonun üstte olduğu konfigürasyon için yapıldı. Bu tasarımlarda farklı ana kanal genişlikleri ve farklı yan kanal açıları kullanılarak kalıplar tasarlandı ve üretildi. Piezo malzeme çipin üstüne yapıştırılarak 2,0MHz etrafında titreştirildi. Bu deneylerde parçacık hareketi gözlemlenmedi. Aynı kalıpların çip yükseklikleri 4 mm'den 1 mm'ye düşürüldü fakat parçacıklar yine de harekete geçmedi.



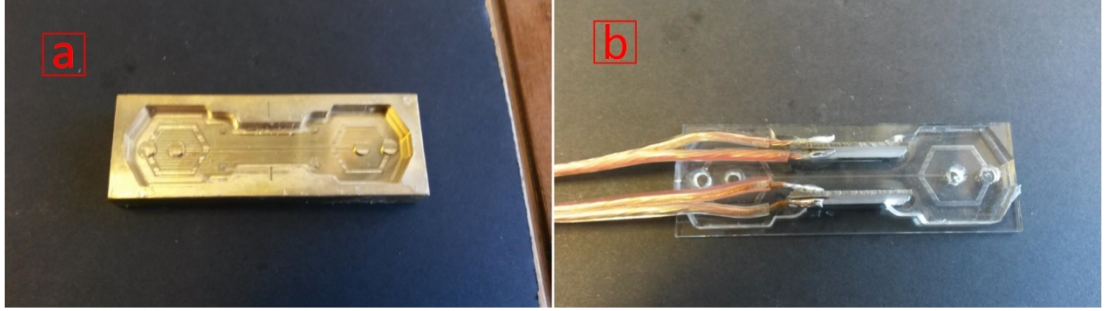
Şekil 4.2 İlk tasarlanan kalıbın ve çipin fotoğrafları

Literatür araştırmaları sonucu piezo konfigürasyonu değiştirildi ve iki piezo kullanılmaya başlandı. Piezolar çipin yan duvarlarına yerleştirildi ve titreşim frekansı 2MHz'den deneysel olarak bulunan rezonans frekansı 2,25MHz'e çıkartıldı. Tasarlanan kalıp ve çip fotoğrafları Şekil 4.2'de verilmiştir. Konfigürasyon ve frekans değişikliği sonrası parçacıkların hareket etmeye başladığı görüldü fakat parçacıklar kanal ortasına toplanamadı. Aksine parçacıkların yoğun bir şekilde kanal duvarı diplerine toplandığı ve takılı kaldığı görüldü. Bu durumun sebebi akustik parametrelerin uygun olmamasıdır. Kalıptaki kanal genişliği 2MHz'e göre tasarlandığı için 2,25MHz etrafında titreştirildiğinde parçacıkların duvar dibinde toplanma ihtimali yüksektir. Ayrıca çip genişliği belirlenirken akustik dalga oluşumu da hesaba katılmamıştı. Diğer bir nokta ise çipler üretilirken piezoların simetrisine ve polarite yönüne dikkat edilmemesi idi. Bütün bu etmenler bir araya geldiğinde parçacıklar istenen şekilde manipüle edilemedi. Bu sonuçlardan sonra Bölüm 3.3'te anlatılan sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak akustik analizler ve bu analiz sonuçlarını kullanan simülasyonlar yapıldı. Böylece akustik kuvvetin ne şekilde oluştuğu ve hangi parametrelere bağlı olduğu anlaşıldı.

Parçacıkların duvara yapıştığı durum simülasyon sonuçlarında da görülmektedir. Çizelge 3.7'de genişliğin 2MHz'e göre ayarlanıp, piezonun 2,25MHz'de titreştirildiği durumda duvara giden parçacıklar bulunmaktadır. Piezo simetrisinin de bozuk olduğu düşünülür ise Çizelge 3.8'deki sonuçlar deney sonuçları ile örtüşmektedir.

Simülasyon sonuçlarından yola çıkarak yeni kalıp tasarlandı. Tasarım frekansı 2,25MHz seçildi buna bağlı olarak çip genişliği 9,8 mm, kanal genişliği 333 μm oldu.

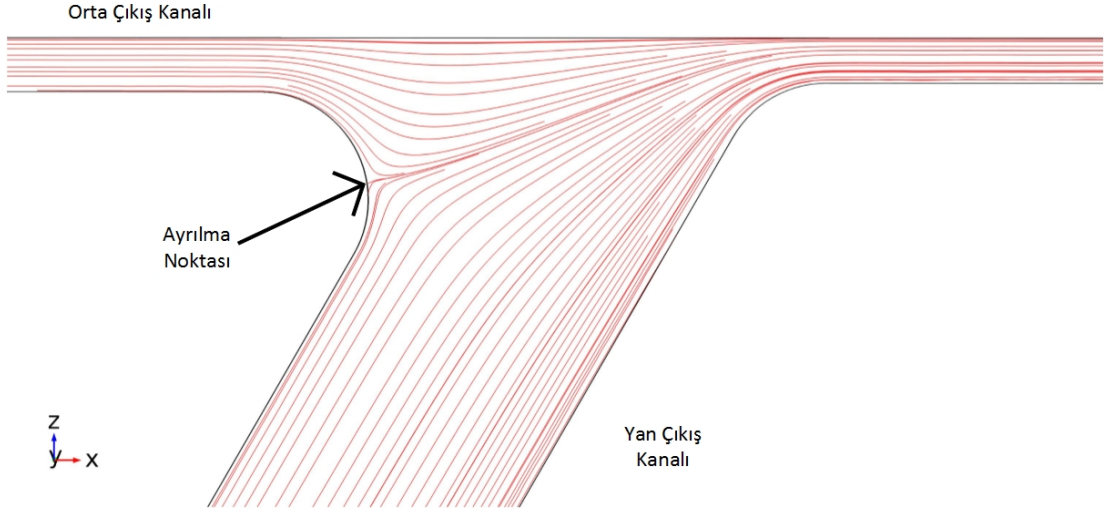
Piezolar kanala yaklaştırılarak sönümün azalması sağlandı. Akustik dalgaların simetrik oluşması için piezoların yerleştirileceği çentikler eklendi böylece piezo konumlarında kayma oluşması engellendi. Çip üretimi esnasında piezoların eşit boyda kesilmesine dikkat edildi ve piezolar dökümden önce yerlerine takılıp çıkarılarak uyumu kontrol edildi. Son tasarlanan kalıp ve çip fotoğrafı Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Son tasarlanan kalıbın ve çipin fotoğrafları

Çıkış kanallarındaki akış debileri akustik analizlerden yararlanılarak belirlendi. Kanal genişlikleri değiştirilerek oluşturulan 4 modelin akış çizgileri incelendi. Parçacıklar akış çizgilerini takip edeceği için akış çizgilerine bakılarak parçacıkların orta çıkış kanalından çıkmaları için kanalın ortasına ne kadar yaklaşmaları gerektiği söylenebilir. Şekil 4.4'te seçilen modelin akış çizgileri görölmektedir. Akışın ayrıldığı noktanın üstünde kalan parçacıklar orta çıkış kanalından, altında kalan parçacıklar ise yan çıkış kanalından çıkmaktadır. Ayrılma noktasına denk gelen akış çizgisi kanalın içerisine kadar takip edildiğinde parçacıkların orta çıkış kanalından çıkabilmesi için toplanması gereken aralık görölebilir. Model geometrisi gerçek geometrinin dörtte biri kullanılarak oluşturuldu ve iki yüzeye simetri sınır koşulu uygulandı. Giriş kanalı yüzeyine 75 mm/s ortalama hız sınır koşulu uygulandı. Çıkış yüzeyi kesitlerine ise sıfır basınç sınır koşulu uygulandı. Kalan kanal duvarlarına ise no-slip sınır koşulu verildi. Debiler kanal kesitlerinde hızın integral alınması ile elde edildi. Sonuçlar elde edildikten sonra giriş ve çıkış debilerinin hata oranına bakıldı. Hata oranı %1'in altına düşene kadar çözüm ağı eleman sayısı arttırıldı ve on milyon tetrahedral eleman civarında istenen sonuç elde edildi. Model parametreleri ve sonuçlar Çizelge 4.1'de verilmiştir. Model 3'ün akış çizgileri uygun bulunmuştur.

Streamline: Velocity field



Şekil 4.4 Sonlu elemanlar modeli akış çizgileri

Çizelge 4.1 Akış modeli debileri ve hata oranları

	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
Yan Kanal Genişliği (mm)	0.75	1	1	1.5
Orta Kanal Genişliği (mm)	0.25	0.25	0.2	0.2
Yan çıkış Debisi (m ³ /s)	4.79E-13	5.49E-13	6.12E-13	6.91E-13
Orta Çıkış Debisi (m ³ /s)	4.70E-13	3.97E-13	3.35E-13	2.54E-13
Giriş Debisi (m ³ /s)	9.38E-13	9.38E-13	9.38E-13	9.38E-13
Çıkış Debileri Toplamı	9.49E-13	9.47E-13	9.47E-13	9.45E-13
Yüzde Hata	1.227	0.954	0.999	0.819
Çıkış/Giriş Oranı	1.021	1.383	1.827	2.722

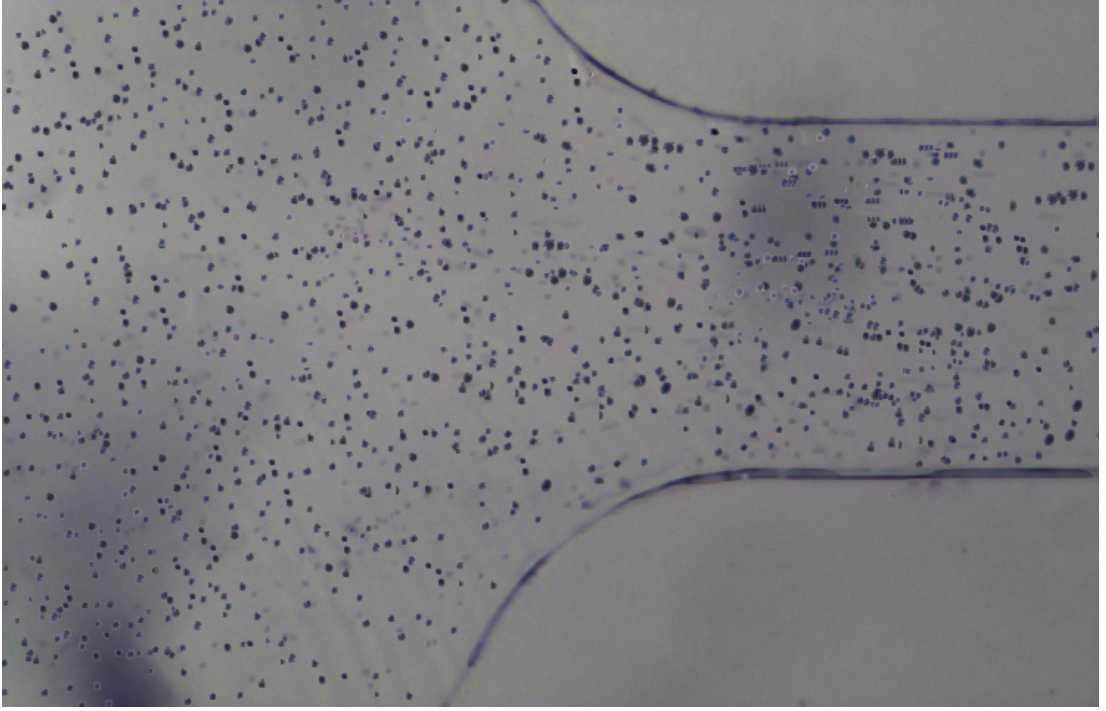
Konsantrasyon işlemi deney sonuçları Şekil 4.5, 4.6 ve 4.7’de gösterilmiştir. Sonuçlar farklı fotoğraf karelerinin üst üste eklenmesi ile oluşturulmuş böylece parçacık yörüngeleri Şekil 3.8’dekine benzer bir şekilde gösterilmiştir. Şekil 4.8, 4.9, 4.10’da ise yıkama işlemi deney sonuçları gösterilmiştir. Çizelge 4.2’de ise deney parametreleri verilmiştir.

Çizelge 4.2 Deney parametreleri

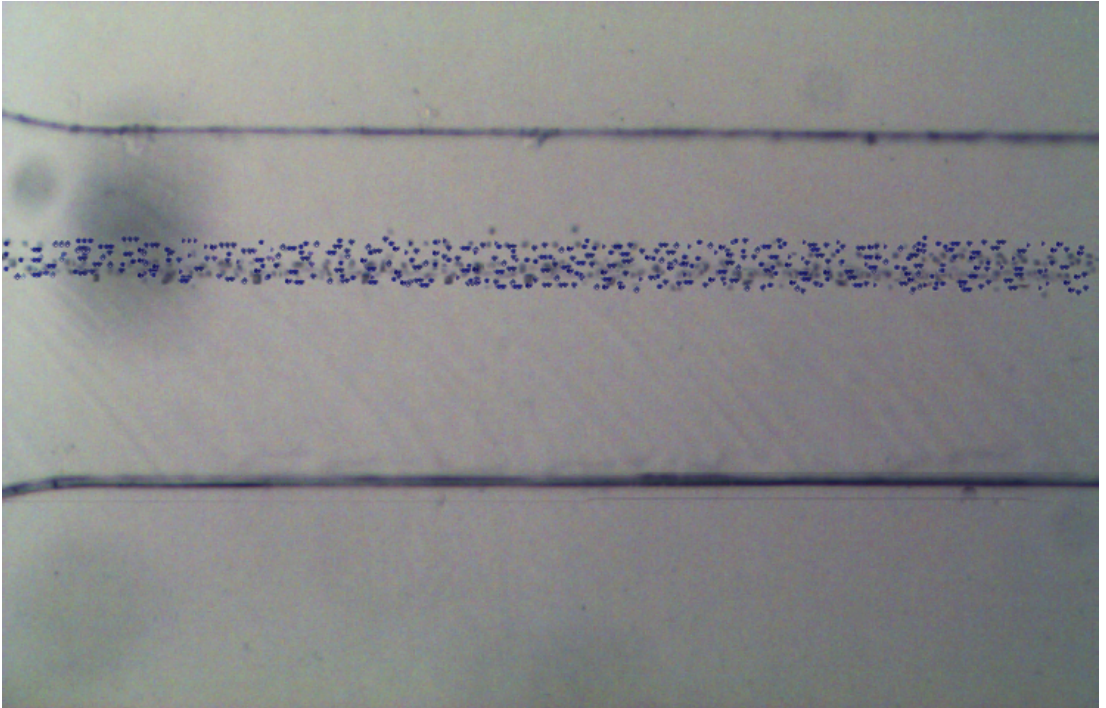
	Konsantrasyon			Yıkama		
	Şekil 4.5	Şekil 4.6	Şekil 4.7	Şekil 4.8	Şekil 4.9	Şekil 4.10
Frekans (MHz)	2.2					
Voltaj (V)	0	14	14	0	0	14
Debi (µl/dak.)	4	3	8	2-4	2-4	2-4

Tek giriş iki çıkış kanalı ile yapılan konsantrasyon işleminde ultrasonik alan açık ve kapalı iken incelenmiş, akustik alanın parçacıkları ortaya topladığı görülmüştür. Farklı debileri ile konsantrasyon işlemi tekrarlanarak debinin veya parçacık hızlarının sistem performansına etkisi görülmüştür. Şekil 4.6 ve 4.7’de ve nümerik simülasyonlarda görüleceği gibi debi arttıkça parçacık dağılımı artmıştır.

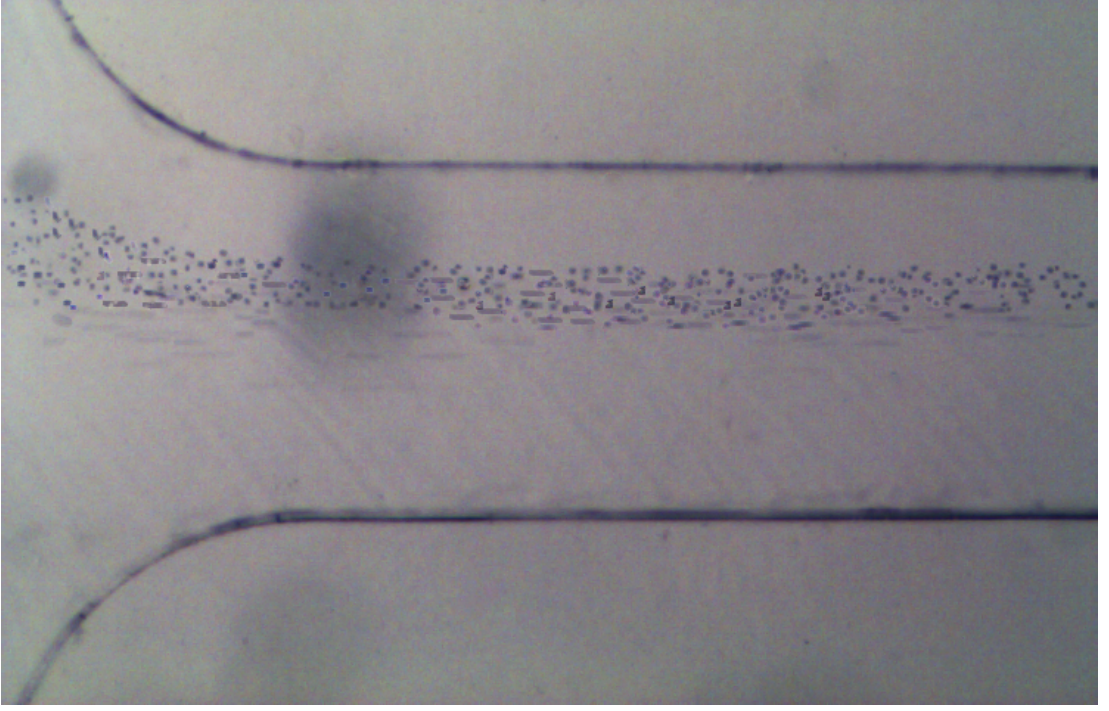
Yıkama işleminde iki giriş kanalı kullanılmıştır. Parçacıklar yan giriş kanallarından girerken temiz sıvı orta kanaldan verildi. Bu durumda parçacıklar Şekil 4.8’de görüldüğü gibi duvar diplerinden kanala girdiler. Akustik alan kapalı olduğunda parçacıklar Şekil 4.9’da görüldüğü gibi yan çıkış kanallarına yönelmektedirler. Akustik alan açıldığında ise Şekil 4.10’da görüldüğü gibi başarılı bir şekilde kanalın ortasına toplanmışlardır.



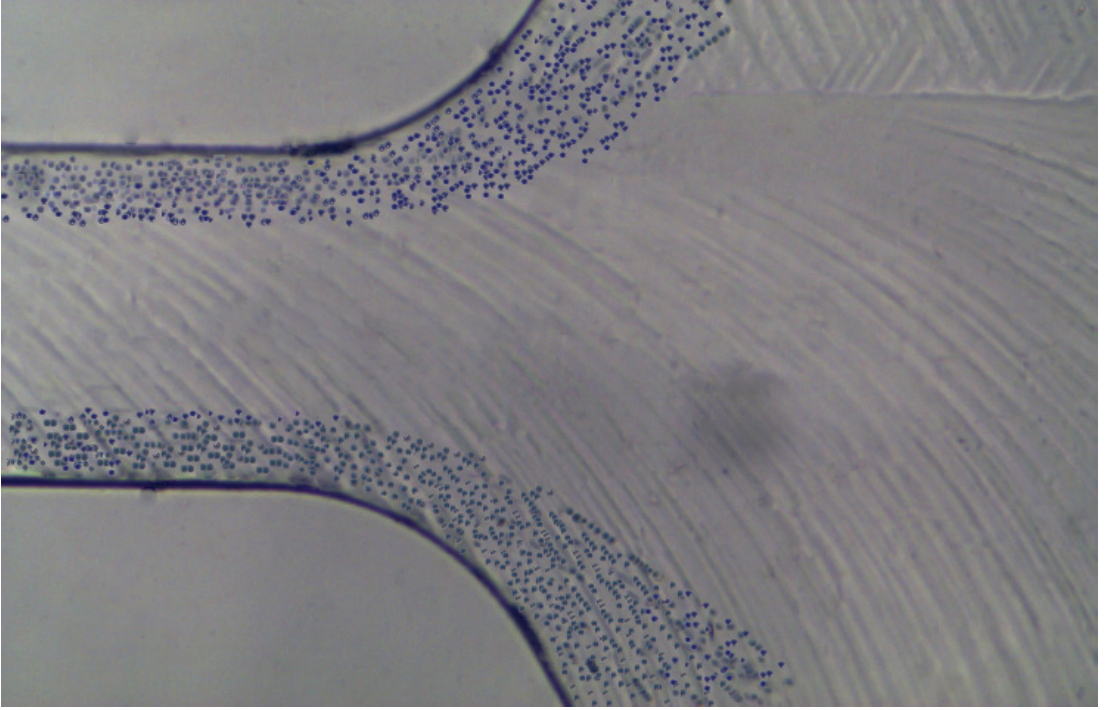
Şekil 4.5 Akustik alan kapalı iken parçacık hareketi



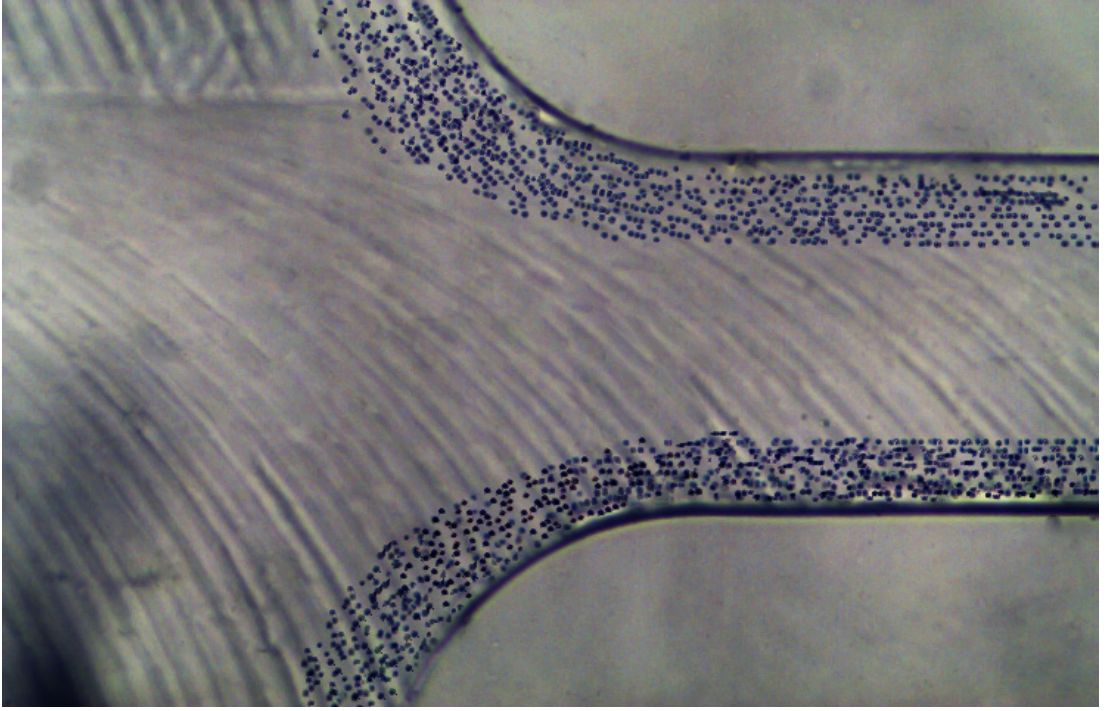
Şekil 4.6 Akustik alan açık ve debi düşük iken parçacık hareketi



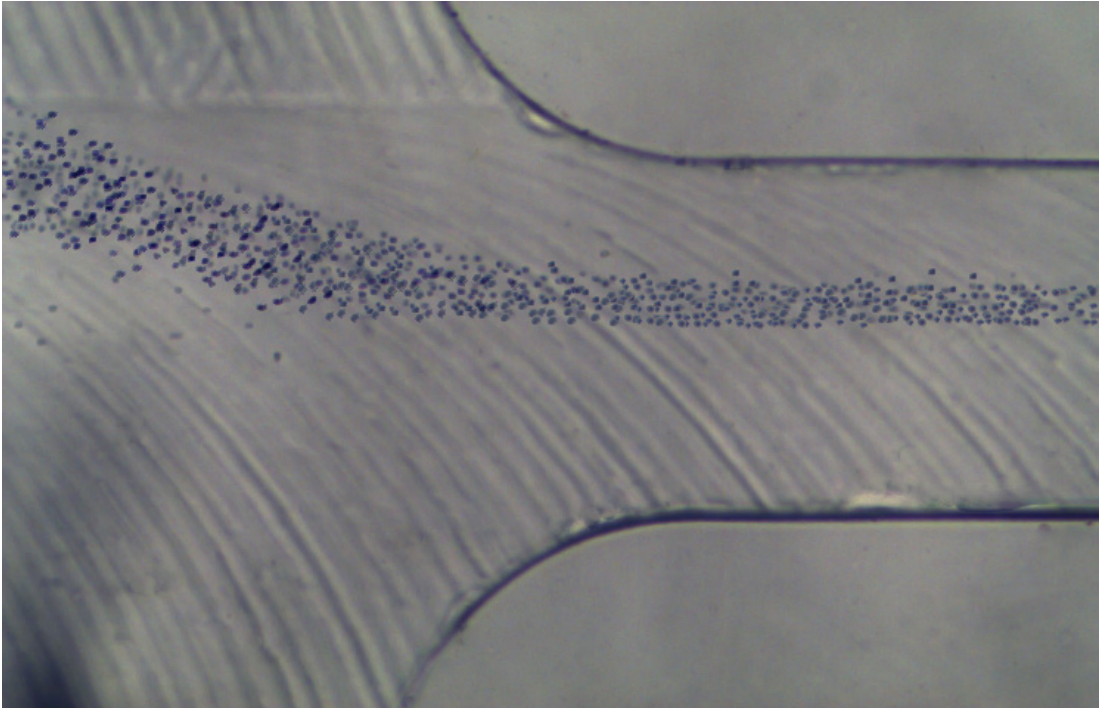
Şekil 4.7 Akustik alan açık ve debi yüksek iken parçacık hareketi



Şekil 4.8 Ana kanal girişindeki parçacık hareketi



Şekil 4.9 Ultrasonik alan kapalı iken ana kanal çıkışı



Şekil 4.10 Ultrasonik alan açık iken ana kanal çıkışı

5. SONUÇLAR

Mikro kanallarda akustoforez ile parçacık manipülasyonu işlemi simüle edildi. Parçacık yörüngelerinin akış alanı ve akustik alan kullanılarak hesaplandığı nümerik simülasyon metodunun doğruluğu farklı deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak test edildi. Simülasyon ve test sonuçlarının ayırma ve yıkama işlemleri için birbirlerine oldukça yakın olduğu gözlemlendi. Sonuçların yakın çıkması simülasyon metodolojisinin yapılan kabullere rağmen yeterince doğru olduğunu göstermektedir. Simülasyon metodunun doğru sonuçlar vermesinde değişken zaman adımı kullanılması ve Monte-Carlo yaklaşımının benimsenmesi oldukça büyük rol oynamaktadır. Değişken zaman adımı kullanılarak parçacık hareketi parçacık hızından bağımsız olarak yüksek hassasiyette hesaplanabilmektedir. Monte-Carlo yaklaşımı ise ölçülemeyen veya hesaplanamayan deney parametrelerinin simüle edilmesi için kullanılmıştır. Bu yaklaşımda ne kadar çok sayıda parçacık kullanılırsa sonuçlar o kadar tekrar edilebilir ve doğru çıkmaktadır. Bu nedenle simülasyonlarda yüksek sayıda parçacık kullanılmıştır. Simülasyon ve deney sonuçlarının yakınlığı, simülasyon metodunun oluşturulabilmesi için yapılan kabullerin de yeterince doğru olduğunu göstermektedir. Bu kabuller parçacık etkileşiminin olmaması, parçacıkların akustik alanı bozmadıkları ve parçacıkların kütlelerinin olmaması idi.

Bölüm 3.1’de simülasyon işlemi analitik bağıntılarla simüle edildi. Simülasyon sonuçlarına göre kanal uzunluğu, akustik enerji yoğunluğu, akış debisi ve titreşim frekansı gibi parametrelerin sistem performansına etkisi incelendi. Aynı enerji yoğunluğu için yüksek frekansın daha yüksek genlikli kuvvet oluşturduğu görüldü. Parçacıkları ortaya toplama performansının, enerji yoğunluğu ve kanal uzunluğu ile doğru, akış debisi ile ters orantılı olduğu görüldü.

Bölüm 3.2’de akış alanı sonlu elemanlar metodu ile çözdürüldü böylece parçacıkların ana kanala giriş ve çıkışları daha gerçekçi simüle edildi. Bu yöntem ile parçacıkların başlangıç konumları ve parçacık boyut dağılımlarının ayırıştırma performansına etkisi incelendi. Parçacık başlangıç konumlarındaki dağılımın performansı düşürdüğü,

parçacıklar tek bir çizgi üzerinden kanala girdikleri durumda performansın arttığı görüldü. Başlangıç konumlarında dağılım olduğunda parçacıkların ortalama hızları yani kanalda kalma süreleri farklılık gösterir. Buldukları konuma göre ortaya gelmesi gereken parçacık kanalda kısa süre kalarak ortaya gelmeden kanaldan çıkabilir. Kenarda kalması gereken parçacık için de tam tersi olabilir. Performansı arttırmak için parçacıkların boyut dağılımı, parçacıkların ayrıştırma ünitesinden önce konsantrasyon ünitesine sokulması ile azaltılabilir.

Bölüm 3.1 ve 3.2'deki analizlerde akustik alan analitik metotlar ile çözüldü. Analitik bağıntıların kullanılabilmesi için kanal içerisinde tek eksenle akustik dalga oluştuğu varsayımı yapıldı. Bölüm 3.1 ve 3.2'deki simülasyon sonuçlarına göre tasarlanan PDMS çipin istenen şekilde çalışmaması, akustik dalga oluştuğu varsayımının PDMS çipte yapılamayacağını gösterdi. Çip ve kanal içerisinde dalganın ne şekilde oluştuğunun parçacık hareketlerini etkilediği görüldü. Bu nedenle Bölüm 3.3'te anlatıldığı gibi bu etkileri de içine alan sonlu elemanlar modelleri kuruldu. Bu modeller ile farklı parametrelerin dalga oluşumuna etkisi incelendi. İki piezo konfigürasyonunda simetrinin hem çip geometrisinde, hem de piezo boyut ve konumlarında sağlanması gerektiği görüldü. PDMS için piezoların yanda olduğu konfigürasyonda kuvvet genliklerinin daha yüksek çıktığı, piezoların üstte olduğu konfigürasyonda ise sistemin daha kararlı ve daha az takılan parçacık ile çalıştığı görüldü. PDMS'teki sönümün sonucu etkilemediği, piezonun üstte olduğu konfigürasyonda silikon ile benzer sonuçlar verdiği fakat akustik dalga boyunun çok kısa olması sebebi ile çip ölçülerine hassas olduğu ve daha yüksek salınımlarla çalıştığı görüldü.

Simülasyon sonuçlarından yola çıkarak yeni bir kalıp tasarlandı. Bu kalıp kullanılarak üretilen çipler ile deneyler yapıldı. Çip üretim aşamalarının da çipin performansını etkilediği görüldü. Çip ile piezo arasına giren havanın dalga oluşumunu etkilediği görüldü bu nedenle Bölüm 4.1'de yazan üretim aşamaları takip edilmiştir.

Deneyin doğru bir şekilde yapılabilmesi için kanal akışının düzgün ve devamlı olması gerektiği görüldü. Bu nedenle akışı bozabilecek hava kabarcıkları deney düzeneği hazırlama aşamasında kanallardan uzaklaştırıldı.

Deney yapıldığı aşamada ise çipin istenen şekilde çalışması için çip sıcaklığının 25°C'nin altında ve sabit tutulması gerektiği aksi takdirde çip ve kanal içerisindeki dalga boylarının değişimine bağlı olarak sistemin kararsız çalıştığı görüldü.

Parçacık ayrıştırma ve konsantrasyon işlemlerinin yapıldığı deney sonuçları Bölüm 4.3'te gösterildiği gibi başarılı çıkmıştır. Deney sonuçlarında göz önüne alındığında akustik özellikleri kötü olan PDMS'in akustoforez için kullanılan mikroçiplerde kullanılabilir olduğu söylenebilir. Fakat çip malzemesi olarak PDMS kullanıldığı durumda, çip tasarımı ve üretiminin bu tezde belirtilen konulara dikkat edilerek yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Changqing Yi, Cheuk-Wing Li, Shenglin Ji, Mengsu Yang, Microfluidics technology for manipulation and analysis of biological cells, *Analytica Chimica Acta*, 60(1-2), 1-23, 2006.
- [2] Lenshof, Andreas and Laurell, Thomas, Continuous separation of cells and particles in microfluidic systems, *Chem. Soc. Rev.*, 39(3), 1203-1217, 2010.
- [3] Lenshof A., Magnusson C., Laurell T., Acoustofluidics 8: applications of acoustophoresis in continuous flow microsystems, *Lab Chip*, 12(7), 1210-1223, 2012.
- [4] Neild A, Oberti S, Dual J, Design, modeling and characterization of microfluidic devices for ultrasonic manipulation, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 121(2), 452-461, 2007.
- [5] Townsend RJ, Hill M, Harris NR, White NM, Modeling of particle paths passing through an ultrasonic standing wave, *Ultrasonics*, 42(1-9), 319-324, 2004.
- [6] Haake A, Neild A, Kim D, Ihm J, Sun Y, Dual J, Ju B, Manipulation of cells using an ultrasonic pressure field, *Ultrasound Med Biol*, 31(6), 857-864, 2005.
- [7] Limaye S, Coakley WT, Clarification of small volume microbial suspensions in an ultrasonic standing wave, *J Appl Microbiol*, 84(6), 1035-1042, 1998.
- [8] Hawkes JJ, Barrow D, Coakley WT, Micro-particle manipulation in millimetre scale ultrasonic standing wave chambers, *Ultrasonics* 36(9), 925-931, 1998.
- [9] Dron O, Ratier C, Hoyos M, Aider J-L, Parametric study of acoustic focusing of particles in a micro-channel in the perspective to improve micro-PIV measurements, *Microfluid Nanofluid*, 7(6), 857-867, 2009.
- [10] Nam J, Lee Y, Shin S, Size-dependent microparticles separation through standing surface acoustic waves, *Microfluid Nanofluid*, 11(3), 317-326, 2011.
- [11] Hawkes JJ, Barber RW, Emerson DR, Coakley WT, Continuous cell washing and mixing driven by an ultrasound standing wave within a microfluidic channel, *Lab Chip*, 4(5), 446-452, 2004.
- [12] Petersson F, Nilsson A, Jonsson H, Laurell T, Carrier medium exchange through ultrasonic particle switching in microfluidic channels, *Anal Chem*, 77(5), 1216-1221, 2005b.
- [13] Evander M, Johansson L, Lilliehorn T, Piskur J, Lindvall M, Johansson S, Almqvist M, Laurell T, Nilsson J, Noninvasive acoustic cell trapping in a microfluidic perfusion system for online bioassays, *Anal Chem*, 79(7), 2984-2991, 2007.

- [14] Bazou D, Castro A, Hoyos M, Controlled cell aggregation in a pulsed acoustic field, *Ultrasonics* 52(7), 842–850, 2012.
- [15] Adams JD, Soh HT, Tunable acoustophoretic band-pass particle sorter, *Appl Phys Lett*, 97(6), 2010
- [16] Shi J, Huang H, Stratton Z, Huang Y, Huang TJ, Continuous particle separation in a microfluidic channel via standing surface acoustic waves (SSAW), *Lab Chip*, 9(23), 3354–3359, 2009
- [17] Kumar M, Feke DL, Belovich JM, Fractionation of cell mixtures using acoustic and laminar flow fields, *Biotechnol Bioeng*, 89(2), 129-137, 2005.
- [18] Petersson F, Nilsson A, Holm C, Jnsson H, Laurell T, Continuous separation of lipid particles from erythrocytes by means of laminar flow and acoustic standing wave forces, *Lab Chip*, 5(1), 20–22, 2005a.
- [19] Petersson F, Berg LA, Sward-Nilsson A, Laurell T, Free flow acoustophoresis: microfluidic-based mode of particle and cell separation, *Anal Chem*, 79(14), 5117–5123, 2007.
- [20] Glynne-Jones P, Mishra PP, Boltryk RJ, Hill M (2013) Efficient finite element modeling of radiation forces on elastic particles of arbitrary size and geometry. *J Acoust Soc Am* 133:1885–1893.
- [21] Tripp G, Ventikos Y, Taggart DP, Coussios C-C, CFD modeling of an ultrasonic separator for the removal of lipid particles from pericardial suction blood, *IEEE Trans Biomed Eng*, 58(2), 282–290, 2011.
- [22] Johnson DA, Feke DL, Methodology for fractionating suspended particles using ultrasonic standing wave and divided flow fields, *Separ Technol*, 5(4), 251–258, 1995.
- [23] Neild A, Oberti S, Haake A, Dual J, Finite element modeling of a micro-particle manipulator, *Ultrasonics*, 44, 455–460, 2006.
- [24] Gralinski I, Alan T, Neild A, Non-contact acoustic trapping in circular cross-section glass capillaries: a numerical study, *J Acoust Soc Am*, 132(5), 2978–2987, 2012.
- [25] Lenshof A, Evander M, Laurell T, Nilsson J, Acoustofluidics 5: Building microfluidic acoustic resonators, *Lab Chip*, 12(4), 684-695, 2012.
- [26] Yosioka K, Kawasima Y, Acoustic radiation pressure on a compressible sphere, *Acoustica*, 5, 167–173, 1955.
- [27] Gorkov LP, On the forces acting on a small particle in an acoustic field in an ideal fluid, *Sov Phys Doklady* 6, 773–776, 1962.

- [28] "Microfluidics and Ultrasound Acoustophoresis" erişim adresi: http://web-files.ait.dtu.dk/bruus/TMF/publications/books/CISM_lectures_Bruus_2010_07_05.pdf, erişimtarihi: 10 ekim 2014.
- [29] "Advanced Finite Element Methods: Chapter 11" erişim adresi: <http://www.colorado.edu/engineering/CAS/courses.d/AFEM.d/AFEM.Ch11.d/AFEM.Ch11.pdf>, erişimtarihi: 10 ekim 2014.
- [30] "Introduction to Finite Element Methods: Chapter 11" erişim adresi: <http://www.colorado.edu/engineering/CAS/courses.d/IFEM.d/IFEM.Ch11.d/IFEM.Ch11.pdf>, erişimtarihi: 10 ekim 2014.
- [31] Martinez-Duarte R, Gorkin RA III, Abi-Samra K, Madou MJ, The integration of 3D carbone-electrode dielectrophoresis on a CD-like centrifugal microfluidic platform, Lab Chip, 10, 1030–1043, 2010.
- [32] Smith DM, Wiggins TA, Sound speeds and laser induced damage in polystyrene, Appl Optics, 11(11), 2680-2683, 1972.
- [33] Tsou JK, Liu J, Barakat AI, Insana MF, Role of ultrasonic shear rate estimation errors in assessing inflammatory response and vascular risk, Ultrasound Med Biol, 34(6), 963-972, 2008

EKLER

Bu çalışmada bahsi geçen tüm dosyalar Cd içerisinde aşağıdaki adreslerde bulunmaktadır.

EK 1. CD\EKLER

Kalıp Teknik Resmi.pdf

EK 2. CD\EKLER

Amplifier_wma-300_manual.pdf

EK 3. CD\EKLER

Ferroperm_product_parameters.pdf

EK 4. CD\EKLER

agilent_33250A.pdf

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Büyükkoçak, Süleyman
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 18.06.1989 Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (505) 2513629
e-mail : suleyman.bk@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	TOBB ETÜ Makine Müh.	2012
Y. Lisans	TOBB ETÜ Makine Müh.	2014

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012-2014	TOBB ETÜ	Burslu Y. Lisans Öğrencisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Büyükkoçak, S., Özer, B., Çetin, B. (2014). "Numerical modeling of acoustophoretic particle separation for microfluidics", Microfluid Nanofluid (available online) DOI: [10.1007/s10404-014-1398-7](https://doi.org/10.1007/s10404-014-1398-7)
2. Zeinali, S., Cetin, B., Büyükkoçak, S., Özer, B. (2014). "Fabrication of microfluidic devices for dielectrophoretic and acoustophoretic applications using high-precision machining", 16th Int. Conference on Machine Design and Production (UMTIK-2014), Paper No: 43, June 30 - July 3, Izmir, Turkey
3. Büyükkoçak, S., Özer, B., Çetin, B. (2014). "Finite element modeling of micro-particle manipulation using ultrasonic standing waves", ASME 12th International

Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, August 3-7, Chicago, IL, USA

4. Çetin, B., Büyükkoçak, S., Zeinali, S., Özer, B. (2013). "Simulation of an integrated microfluidic device for bioparticle wash, separation and concentration", Proc. ASME 2013 4th Microscale/Nanoscale Heat & Mass Transfer International Conference, December 11-14, Hong Kong, China

5. Suleyman Buyukkocak, Sener Kilic, Mehmet Bulent Ozer, Hakki Ozgur Unver," Chatter Detection Using Vibrational And Acoustic Emissions In Turning Process" The 20th Int. Conf. on Mechatronics and Machine Vision in Practice- M2ViP, September 2013, Ankara, TURKEY.

6. Süleyman Büyükkoçak, Çağrı Koç , Şeyma Nur Çizmeli, Çağrı Gürpınar, Mehmet Bülent Özer," Design and Testing Of An Earthquake Simulation System" The 20th Int. Conf. on Mechatronics and Machine Vision in Practice- M2ViP, September 2013, Ankara, TURKEY