

**MİKROKANALLI CİHAZLARDA DAMLACIK
OLUŞTURMAK İÇİN İKİ-FAZLI AKIŞ ÇALIŞMA
PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU**

**OPTIMIZATION OF TWO-PHASE FLOW OPERATING
PARAMETERS FOR MAKING DROPLETS IN
MICROCHANNEL DEVICES**

BAHAR ÖZDEN

DOÇ. DR. SELİS ÖNEL

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

Canım aileme...

ÖZET

MİKROKANALLI CİHAZLARDA DAMLACIK OLUŞTURMAK İÇİN İKİ-FAZLI AKIŞ ÇALIŞMA PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Bahar ÖZDEN

Yüksek Lisans, Kimya Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Selis ÖNEL

Haziran 2021, 79 sayfa

Mikroakışkan cihazlar, sistemin ve akışkan miktarının mikro ölçeğe kısıtlı olması sayesinde ucuz ve kolay kontrol edilebilir sistemlerdir. Bu cihazları kimya, biyoloji, tıp, mühendislik gibi disiplinler arası alanlarda kullanmak mümkündür. Mikroakışkan cihazlarda eş boyutlu damlacık üretimi son yıllarda yaygın olan çalışma konuları arasında yer almaktadır. Eş-boyutlu damlacıklar birbirleri ile karışmayan iki akışkan ile oluşturulabilir. İki fazlı akış oluşturmak için genel olarak yağ (sürekli faz) ve su veya sulu bir çözelti (dağınık faz) kullanılmaktadır. Kullanılan sürekli ve dağınık fazların akış hızını değiştirerek damlacıkların çapını kontrol etmek mümkündür.

Bu tez çalışmasının amacı farklı geometri ve boyutlara sahip mikroakışkan cihazlarda oluşturulan damlacık boyutlarının, sürekli ve dağınık faz oranları sabit tutularak, akış hızı ile olan ilişkisinin incelenmesidir. Çalışmalarda x-kavşak içeren basit Tip-1 mikroakışkan cihaz ile kavşağı takip eden hatta entegre edilmiş yardımcı yağ kanalı ve serpentin çıkış hattı içeren daha gelişmiş Tip-2 mikroakışkan cihaz kullanılmıştır. Cihazlarda ortak olarak 20:1 oranında yağ ve su akış hızları kullanılarak yağ içinde sulu damlacıklar üretilmiştir.

Damlacık çapının, nozül genişliğinin yarısından fazlasını kapladığında, damlacık çapı arttıkça damlacıklar arası mesafenin azaldığı belirlenmiştir. Buna karşın damlacık çapının yaklaşık olarak nozül genişliğinin yarısından az olduğu durumda ise damlacık çapı arttıkça damlacıklar arası mesafenin arttığı tespit edilmiştir. Aynı x-kavşağa sahip olduğu halde Tip-1 cihaza göre daha gelişmiş cihaz olan Tip-2 cihazda üretilen damlacık çapının, Tip-1 cihazda üretilen damlacık çapına göre daha küçük olduğu belirlenmiştir. Aynı akış hızı kullanılarak iki cihazda farklı sonuç alınmasının sebebinin, Tip-2 cihazda karşılaşılan serpentin kısımdaki yola bağlı sürtünme ve dönüşlerden kaynaklanan kuvvet kayıpları ve ek basınç düşüşü ile ilgili olduğu gösterilmiştir.

Gelecek alışmalar için iki fazlı sistem, ITO ısıtıcı ile ısıtılıp sulu damlacıkların yağ akışı içinde çözünmesi incelenmek istenmiştir. Mikroakışkan cihazın sadece serpentin bölgesi 40 C'ye ısıtılarak damlacıkların çap değişimi incelenmiştir. Sıcaklık arttıkça yağ içinde çözünürlüğü artan sulu damlacıkların serpentin bölgesinde ilerlerken ortalama başlangıç çapının %10'u kadar küçüldüğü görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Mikroakışkan sistem, iki-fazlı akış, akış odaklı cihaz, eşboyutlu damlacıklar

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF TWO-PHASE FLOW OPERATING PARAMETERS FOR MAKING DROPLETS IN MICROCHANNEL DEVICES

Bahar ÖZDEN

Master of Science, Department of Chemical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Selis ÖNEL

January 2021, 79 pages

Microfluidic devices are inexpensive and controllable systems as the system and the amount of fluid are constrained to the micro-scale. It is possible to use these devices in interdisciplinary fields, such as chemistry, biology, medicine, and engineering. Monodispersed droplet production in microfluidic devices has been among the most popular study topics in the recent years. Monodispersed droplets can be formed with two immiscible fluids. In general, oil (continuous phase) and water or an aqueous solution (dispersed phase) are used to form two-phase flow. It is possible to control the diameters of the droplets by changing the flow rates of the continuous and dispersed phases.

The aim of this thesis study is to examine the relationship between the flow rate and the size of the droplets formed in microfluidic devices that have different geometries and dimensions by keeping the ratio of the continuous and dispersed phases constant. In the study, a simple microfluidic device with an x-junction, Type-1, and a more advanced microfluidic device, Type-2, with an auxiliary oil channel and a serpentine section integrated in the line following the x-junction were employed. Aqueous droplets in oil were produced in the devices by using oil and water flow rates with a ratio of 20:1.

It was determined that when the droplet diameter covers more than half of the nozzle width, the distance between the droplets decreases as the droplet diameter increases. On the other hand, in cases where the droplet diameter is less than half of the nozzle width, it was determined that the distance between the droplets increases as the droplet diameter increases. It was determined that the droplet diameter produced in the Type-2 device, which is a more advanced device compared to the Type-1 device, is smaller than the droplet diameter produced in the Type-1 device despite the fact that both devices have the same x-junction. It was shown that the reason for obtaining different results using the same flow rates was related to the force losses and additional pressure drop encountered in the Type-2 device due to road based friction and the turns in the serpentine section.

For future studies, it was desired to examine the dissolution of aqueous droplets in oil flow by heating the two-phase system with an ITO heater. The change in the diameter of the droplets was investigated by heating only the serpentine region in the microfluidic device to 40 °C. It was observed that the initial average diameter of aqueous droplets, whose solubility in oil increases as the temperature increases, decreased by 10% as they moved through the serpentine region.

Keywords: Microfluidic device, two-phase flow, flow focusing device, monodispersed droplets

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca desteğiyle, her gün yanımda olan bilgi birikimine ve enerjisine hayran kaldığım kıymetli hocam ve danışmanım Doç. Dr. Selis Önel'e,

Çalışmalarım boyunca 214M323 numaralı proje kapsamında bursiyeri olduğum ve çeşitli ekipman ve kimyasal için finansal destekte bulunan TÜBİTAK'a,

Tez çalışmamda kullandığım akış odaklı mikroakışkan cihazların üretildiği Harvard Tıp Fakültesinde BioMEMS Resource Center ve Center for Engineering in Medicine and Surgery'nin yöneticisi Prof. Dr. Mehmet Toner'e,

Yüksek lisansa ilk başladığım günden bu yana dostluklarını hep hissettiğim bu yolda elimi hiç bırakmayan Dr. Gökçe Alp, Nazlı Karakuşçu'ya

Çalışmalarım boyunca hep fikir alışverişinde bulunduğum sevgili laboratuvar arkadaşlarım Çağıl Zeynep Süngü Akdoğan, Erhan Şenlik ve Anıl Hatiboğlu'na,

Uzakta olsalar bile hep destekleriyle yanımda olan canım arkadaşlarım Gamze Yılmaz, Ülkü Begüm Can, Emine Uslu ve Melisa Eldoğan, Barkan Ulubalcı, Gülce Ulubalcı, Yunus Yılmaz ve Yunus Şahan Çetinkaya'ya,

Çalışmalarım boyunca desteğini bir gün olsun eksik etmeyen, sonsuz sabrı ve yaratıcı fikirleri ile her zaman yanımda olan en büyük destekçim sevgili eşim Hasan Can Özden'e

Yaşadığım tüm zorluklarda yanımda olan, varlıklarını hep kalbimde hissettiğim ablam Gül Sarıyıldız, babam Celal Göçmener ve kıymetlim melek annem Filiz Göçmener başta olmak üzere canım aileme,

Ve bu zorlu yolculuğumda adını sayamadığım tüm gizli kahramanlarıma teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. Mikroakışkan Cihazlar	3
2.2.Mikroakışkan Cihazlarda Taşınım Olayları	4
2.2. Damlacık Oluşturmak için Kullanılan Mikro Akışkan Cihazlar	5
2.2.1. T-Kanallı Mikroakışkan Cihazlar	6
2.2.2. Eş Akışlı (Co-flow) Mikroakışkan Cihazlar	7
2.2.3. Akış Odaklı (Flow Focusing) Mikroakışkan Cihazlar	8
2.3. Damlacık Oluşumu için Kullanılan Boyutsuz Sayılar.....	8
2.3.1. Kılcal Sayı.....	9
2.4. Eş Boyutlu ve Eş Aralıklı Damlacıkların Oluşumu	9
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	15
3.1. Malzemeler.....	15
3.2.1. Mikroakışkan Cihazların Yumuşak Litografi ile Üretimi	16
3.3. İki Fazlı Mikroakışkan Sistemde Eş boyutlu ve Aralıklı Damlacık Üretimi	17
3.3.1. Tip-1 X-Kavşaklı Mikroakışkan Cihazda Damlacık Üretimi	18
3.3.2. Serpentin Eklentili Tip-2 Mikroakışkan Cihazda Damlacık Üretimi	25
3.4. Damlacıklar Arası Mesafe Optimizasyonu	27
3.5. Damlacık Çapı Küçültme Çalışmaları.....	27
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	29

4.1. X-kavşaklı Cihazlarda Damlacık Çapı Parametre İncelenmesi.....	29
4.1.1. 25 µm Nozül Genişliğine Sahip Mikroakışkan Cihazda Akış Hızına Bağlı Damlacık Çap Değişimi	29
4.1.2. 50 µm Nozül Genişliğine Sahip Mikroakışkan Cihazda Akış Hızına Bağlı Damlacık Çap Değişimi	30
4.1.3. 100 µm Nozül Genişliğine Sahip Mikroakışkan Cihazda Akış Hızına Bağlı Damlacık Çap Değişimi	31
4.1.4. Kavşak Çıkış Genişliği 25 µm, 50µm, 100µm olan Mikroakışkan Cihazlarda Damlacık Oluşturma Parametrelerinin Karşılaştırılması.....	33
4.1.5. X-kavşaklı Mikroakışkan Cihazlarda Damlacıklar Arası Mesafe İncelemesi.....	34
4.1.5.1. 25 µm Nozül Genişliğine Sahip Mikroakışkan Cihazda Damlacık Çapına Bağlı Damlacıklar Arası Mesafe İlişkisi	34
4.1.5.2. 50 µm Nozül Genişliğine Sahip Mikroakışkan Cihazda Damlacık Çapına Bağlı Damlacıklar Arası Mesafe İlişkisi	35
4.1.5.3. 100 µm Nozül Genişliğine Sahip Mikroakışkan Cihazda Damlacık Çapına Bağlı Damlacıklar Arası Mesafe İlişkisi	36
4.2. Serpentinli Cihazlarda Elde Edilen Sonuçlar.....	40
4.2.1. Serpentinli Cihazlarda Yardımcı Yağ Akışı Etkisi.....	40
4.2.2. Tip-2 Cihazlarda Sıcaklık Etkisi.....	45
5. YORUM.....	50
6. KAYNAKLAR	53
EKLER.....	58
EK 1- Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Soya Fasulyesi Yağının Fiziksel Özellikleri	58
EK 2- 50 µm Nozül Genişliğine Sahip X-kavşaklı Tip-1 Mikroakışkan Cihazda 0,5 µl/min Su – 10 µl/min Yağ Akış Hızı ile Üretilen Örnek Damlacık Görüntüsü	59
EK 3- 100 µm Nozül Genişliğine Sahip X-kavşaklı Mikroakışkan Cihazda 0,5 µl/min Su – 10 µl/min Yağ Akış Hızı ile Üretilen Örnek Damlacık Görüntüsü	60

EK 4- 100 µm Nozül Genişliğine Sahip X-kavşaklı Tip-2 Mikroakışkan Cihazda 0,5 µl/min Su – 10 µl/min Yağ Akış Hızı ile Üretilen Örnek Damlacık Görüntüsü.	61
EK 5- 50 µm Nozül Genişliğine Sahip X-kavşaklı Mikroakışkan Cihazda 0,5 µl/min Su – 10 µl/min Yağ Akış Hızı ile Üretilen Örnek Damlacık Görüntüsü	62
EK 6- Laminer Akışta Kayıp Katsayısının Değerleri [20].....	63
EK 7- Görüntü İşleme İçin Kullanılan Python Kodu (Yüksek lisans öğrencisi Anıl Hatiboğlu'nun izniyle).....	64
EK 8- Teorik Damlacık Çapı Hesaplanması için Kullanılan MATLAB Kodu	69
EK 9- X-Kavşaklı Tip-1 25 µm Nozül Genişliğine Sahip Cihazda Elde Edilen Damlacık Çapı ile Damlacıklar Arası Mesafe Teorik ve Deneysel Çalışmalarının Karşılaştırması İçin Kullanılan MATLAB Kodu	71
EK 10- X-Kavşaklı Tip-1 50 µm Nozül Genişliğine Sahip Cihazda Elde Edilen Damlacık Çapı ile Damlacıklar Arası Mesafe Teorik ve Deneysel Çalışmalarının Karşılaştırması İçin Kullanılan MATLAB Kodu	73
EK 11- X-Kavşaklı Tip-1 100 µm Nozül Genişliğine Sahip Cihazda Elde Edilen Damlacık Çapı ile Damlacıklar Arası Mesafe Teorik ve Deneysel Çalışmalarının Karşılaştırması İçin Kullanılan MATLAB Kodu	75
EK 12- X-Kavşaklı Tip-1 Cihazda Elde Edilen Damlacık Çapı Teorik ve Deneysel Çalışmalarının Karşılaştırması İçin Kullanılan MATLAB Kodu	77
EK 13- Tez Çalışması Orjinallik Raporu	Error! Bookmark not defined.
ÖZGEÇMİŞ	Error! Bookmark not defined.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Mikro-akışkan cihazların geometrisi: (a) T-kavşaklı, (b) akış odaklı (x-kavşaklı) ve (c) eş akışlı. ‘A’ sürekli fazı ve ‘B’ dağınık sulu fazı göstermektedir [34].	6
Şekil 2.2. Basınç kontrollü akış uygulanan T-kanallı cihaz örneği [35].	7
Şekil 2.3. Eş akışlı geometriye sahip Mikroakışkanlı Cihaz Örneği [35].	7
Şekil 2.4. Akış odaklı geometriye sahip mikroakışkan cihaz [35].	8
Şekil 3.5. Genel olarak mikroakışkan cihaz üretimi a) Erkek kalıp b) Erkek kalıp üzerine 10:1 oranında karıştırılmış PDMS ve çapraz bağlama ajanı c) Kanal delikleri açılmış katı PDMS kalıp d) Cam yüzeye yapıştırılmış PDMS kalıp [61].	16
Şekil 3.6. Harrick Plasma Inc marka plazma cihazı ve yardımcı ekipmanı	17
Şekil 3.7. Otomatik Şırınga Pompası	17
Şekil 3.8. X-kavşak içeren basit akış odaklı cihazın a) fonksiyonlarına göre şematik gösterimi: (1) Nozül Bölgesi, (2) Damlacık Oluşum Bölgesi, (3) Damlacık oluşum bölgesi sonrası ve b) PDMS malzemeden üretilmiş hali	20
Şekil 3.9. Tip-2 cihazın fonksiyonlarına göre isimlendirilmiş bölgeleri: a) Kanal giriş bölgesi b) Damlacık oluşum bölgesi, c) Yardımcı yağ kanalı bölgesi, d) Serpentin bölgesi	26
Şekil 3.10. a) ITO (indium-tin-oxide, indiyum-kalay-oksit) ısıtı b) Mikroskop üzerine yerleştirilmiş Tip-2 mikroakışkan cihaz ve ITO ısıtıcı	28
Şekil 4.11. 25 µm nozül genişliğine sahip mikroakışkan cihazda akış hızına bağlı damlacık çap değişimi	30
Şekil 4.12. Tip-1 50 µm nozül genişliğine sahip mikroakışkan cihazda akış hızına bağlı damlacık çap değişimi	31
Şekil 4.13. Tip-1 100 µm nozül genişliğine sahip mikroakışkan cihazda akış hızına bağlı damlacık çap değişimi	32
Şekil 4.14. Farklı kavşak çıkış (nozül) genişliğine sahip Tip-1 cihazların deneysel ve teorik olarak kılcak sayısı ve damlacık çapı arasındaki ilişkisi	33
Şekil 4.15. Tip-1 25 µm nozül genişliğine sahip mikroakışkan cihazda oluşturulan damlacık çapı ve damlacıklar arası mesafe ilişkisi	35
Şekil 4.16. Tip-1 50 µm Nozül Genişliğine Sahip Mikroakışkan Cihazda Oluşturulan Damlacık Çapı ve Damlacıklar Arası Mesafe İlişkisi	36

Şekil 4.17. Tip-1 100 µm nozül genişliğine sahip mikroakışkan cihazda oluşturulan damlacık çapı ve damlacıklar arası mesafe ilişkisi	37
Şekil 4.18. Farklı nozül genişliğine sahip Tip-1 cihazlarda teorik ve deneysel damlacık çapı ve damlacıklar arası mesafe arasındaki ilişki	38
Şekil 4.19. 25µm, 50 µm, 100 µm kanal genişliğine sahip Tip-1 cihazlarda damlacık boyutu ve damlacıklar arası mesafe arasındaki ilişki.....	39
Şekil 4.20. 50 µm nozül genişliğine sahip serpentinli mikroakışkan cihazda sırasıyla 0,4 µl/min - 8 µl/min su-yağ akış hızlarıyla oluşturulan damlacıkların yardımcı yağ akışı hızı ve damlacıklar arası mesafe ilişkisi.....	40
Şekil 4.21. 100 µm nozül genişliğine sahip serpentinli mikroakışkan cihazda sırasıyla 0,4 µl/min - 8 µl/min su-yağ akış hızlarıyla oluşturulan damlacıkların yardımcı yağ akışı hızı ve damlacıklar arası mesafe ilişkisi.....	41
Şekil 4.22. 100 µm nozül genişliğine sahip serpentinli mikroakışkan cihazda sırasıyla 0,8 µl/min - 16 µl/min su-yağ akış hızlarıyla oluşturulan damlacıkların yardımcı yağ akışı hızı ve damlacıklar arası mesafe ilişkisi	42
Şekil 4.23. Kavşak çıkış genişliği 50 µm olan Tip-2 mikroakışkan cihazda sırasıyla 0,4 µl/min – 8 µl/min su-yağ akış hızlarıyla oluşturulan damlacıkların yardımcı yağ akışı hızı ve damlacık çapı ilişkisi	43
Şekil 4.24. Kavşak çıkış genişliği 100 µm olan Tip-2 mikroakışkan cihazda sırasıyla 0,4 µl/min - 8 µl/min su-yağ akış hızlarıyla oluşturulan damlacıkların yardımcı yağ akışı hızı ve damlacık çapı ilişkisi	44
Şekil 4.25. Kavşak genişliği 100 µm olan Tip-2 mikroakışkan cihazda sırasıyla 0,8 µl/min - 16 µl/min su-yağ akış hızlarıyla oluşturulan damlacıkların yardımcı yağ akışı hızı ve damlacık çapı ilişkisi	45
Şekil 4.26. 50 µm nozül genişliğine sahip serpentinli mikroakışkan cihazda sırasıyla 0,4 µl/min – 8 µl/min su-yağ akış hızlarıyla oluşturulan damlacıkların farklı yardımcı yağ akışı hızlarında sıcaklık etkisindeki bölge ve damlacık çapı ilişkisi.....	46
Şekil 4.28. 100 µm nozül genişliğine sahip serpentinli mikroakışkan cihazda sırasıyla 0,4 µl/min - 8 µl/min su-yağ akış hızlarıyla oluşturulan damlacıkların farklı yardımcı yağ akışı hızlarında sıcaklık etkisindeki bölge ve damlacık çapı ilişkisi.....	48
Şekil 4.29. 100 µm nozül genişliğine sahip serpentinli mikroakışkan cihazda sırasıyla 0,4 µl/min - 8µl/min su-yağ akış hızlarıyla oluşturulan damlacık oluşum bölgesinde damlacıkların farklı yardımcı yağ akışı hızları ile damlacık çapı ilişkisi	49

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. 25 µm X-Kavşak Nozül Genişliğine Sahip Akış Odaklı Tip-1 Mikroakışkan Cihazda Damlacık Oluşumu İçin Kullanılan Akış Hızları	21
Çizelge 3.2. 50 µm X-Kavşak Nozül Genişliğine Sahip Akış Odaklı Tip-1 Mikroakışkan Cihazda Damlacık Oluşumu İçin Kullanılan Akış Hızları	22
Çizelge 3.3. 100 µm X-Kavşak Nozül Genişliğine Sahip Akış Odaklı Tip-1 Mikroakışkan Cihazda Damlacık Oluşumu İçin Kullanılan Akış Hızları	23
Çizelge 3.4 Tip-2 Cihazda Kullanılan Akış Hızı Çiftleri	27
Çizelge 3.5. X-kavşaklı Tip-2 Cihazın Damlacık Küçültme Çalışmasında Kullanılan Bölgeleri.....	28

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Ca	Kılcal sayı
D_h	Hidrolik çap (m)
v	Çizgisel akış hızı (m/s)
Re	Reynold sayısı
f	Sürtünme katsayısı
L	Kanal uzunluğu
H	dikdörtgen kanal kesitindeki yüksekliği,
d	Dikdörtgen kanal genişliği
$Q_{O,1}$	1 Nolu yağ giriş hacimsel akış hızı ($\mu\text{l}/\text{min}$)
$Q_{O,2}$	2 Nolu yağ giriş hacimsel akış hızı ($\mu\text{l}/\text{min}$)
$Q_{O,tot}$	Toplam yağ giriş hacimsel akış hızı ($\mu\text{l}/\text{min}$)
Q_w'	Su giriş hacimsel akış hızı ($\mu\text{l}/\text{min}$)
μ	Viskozite
ρ	Yoğunluk
γ, σ	Arayüzey gerilimi
$D_{droplet}^*$	Boyutsuz damlacık çapı
$D_{droplet}$	Damlacık çapı
$D_{interdroplet distance}^*$	Boyutsuz damlacıklar arası mesafe
$D_{interdroplet distance}$	Damlacıklar arası mesafe
D_{Device}	Cihaza ait kanal genişliği
$Q_{top,giriş}$	Cihaza giren toplam hacimsel akış hızı
$Q_{top,çıkış}$	Cihazdan çıkan toplam hacimsel akış hızı
$Q_{yağ,giriş}$	Cihaza giren toplam yağ hacimsel akış hızı
$Q_{su,giriş}$	Cihaza giren toplam su hacimsel akış hızı

$Q_{yağ,çıkış}$ Cihazdan çıkan toplam yağ hacimsel akış hızı

$Q_{su,çıkış}$ Cihazdan çıkan toplam su hacimsel akış hızı

Kısaltmalar

CPA Cryo-protectant agent (Kristallenme Önleyici Ajan)

DARPA Defense Advanced Research Projects Agency (ABD Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı)

GC Gaz Kromatografisi

PDMS Polidimetilsiloksan

PEG Polietilen glikol

DEX Deksametazon

DMSO Dimetilsülfaoksit

ITO Indium-Tin-Oxide (İndiyum-Kalay-Oksit)

PJFF Pinned jet flow focusing

ATPS Aqueous two phase system (Sulu iki fazlı sistem)

1. GİRİŞ

Bu tez kapsamında, hassas memeli hücrelerinin biyosaklama öncesi zarar görmeden hazırlanmasını sağlamak amacıyla geliştirilmiş, x-kavşak, ek yağ kanalı ve serpentin içeren akış odaklı bir mikrokanallı akışkan sistem (Tip-2) üzerinde iki-fazlı akış ve yağ içinde sulu damlacık üretimi kapsamında parametre çalışması yapılmıştır. Bu sistemin çalışma parametreleri, cihazın temelini oluşturan ve sadece damlacık üretimi için x-kavşak içeren daha basit bir cihazın (Tip-1) çalışma parametreleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan Tip-1 ve Tip-2 cihazlar, 25, 50 ve 100 mikron genişliğinde damlacık oluşturma nozülü içerecek şekilde birbirinin iki katı kanal genişliğine sahip üç farklı boyutta üretilmiştir. Sonuçta, üç giriş ve bir çıkış içeren x-kavşaklı akış odaklı basit mikro-cihazlar (Tip-1) ve aynı boyutlarda x-kavşağına ek olarak uzun serpentin kısım içeren mikro-cihazlar (Tip-2) olmak üzere toplam altı mikro-kanallı cihaz için akış hızı, damlacık boyutu ve damlacıklar arası mesafe gibi değişkenler incelenerek cihaz çalışma koşulları araştırılmıştır.

Günümüzde en etkili biyosaklama yöntemi olan hücre dondurma işleminde, hücrenin düşük sıcaklıklara maruz bırakılması sırasında, hücre içinde ve dışında meydana gelen kristalleşmenin hücreye mekanik ve kimyasal zararlar verdiği bilinmektedir. Bu olumsuz etkiler hücrenin canlılığını yitirmesine sebep olmaktadır [1]. Bu sebeple dondurarak saklama yönteminde kristalleşmeye karşı koruyucu karbonhidratlar (cryoprotectant agents, CPA) kullanılmaktadır [2]. Karbonhidratların görevi sulu ortamın camsı geçiş sıcaklığını yükselterek kristalleşmeyi engellemektir. Donmaya karşı koruyucu karbonhidratları hücrelere yükleme işlemi günümüzde kullanılan kademeli yöntemlerle yapıldığında, hassas hücreler için ölümcül sonuçlara neden olmaktadır [3,4]. Bu sebeple tez danışmanı tarafından önceki bir çalışmada tasarlanan ve hücrelere zarar vermeden kesintisiz ve kontrollü yükleme yapılabilmesini sağlayan mikro-kanallı cihazlarda iki-fazlı akışın optimize edilmesi gerekmektedir. Geliştirilmiş bu mikro-akışkan cihazlarda kontrollü akış ile hedeflenen büyüklükte mikro ölçekte pikolitre sulu damlacıklar oluşturulması sağlanmıştır.

Günümüzde mikro-akışkan cihaz sistemleri tıp, biyoloji, kimya, fizik gibi alanlarda mikro boyutlarda çalışma imkanı vermesi, ucuz ve kontrol edilebilir olması gibi önemli

avantajlar sebebiyle son on yılda sıkça kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. Teknolojinin gelişimiyle mikro düzeyde malzemeler üzerinde çalışmalar kolaylaşmıştır. Bu çalışmalara örnek olarak, tıp alanında belirli hücreler (sperm, yumurta, sinir hücreleri gibi) daha sonra kullanmak amacıyla çeşitli işlemlere tabi tutularak yöntemlere göre farklı sıcaklıklarda saklanabilmektedir (biyosaklama). Hücrelerin dondurma işlemleri sırasında canlı hücrede tahribatı en az seviyede tutmak önemli kriterlerden biridir. Daha önceki çalışmalarda biyosaklama öncesinde hücrelere verilebilecek hasarın en aza indirilebilmesi için canlı hücrelerin mikro-akışkan sistemlerde oluşturulan damlacıkların içine hapsedilmesi düşünülmüştür. Bu tezin kapsamı, tez yürütücüsü Doç. Dr. Selis Önel tarafından tasarlanan mikro-kanallı cihazın, iki fazlı damlacık oluşturmak için kullanılan basit x-kavşaklı cihazlarla kıyaslanarak parametre optimizasyonunun yapılmasını içermektedir. Bu şekilde hücre enkapsülasyonu öncesinde akış hızına bağlı olarak damlacık boyutu ve damlacıklar arası mesafenin kontrolü için çalışma parametreleri arasındaki ilişkinin belirlenmesini içermektedir.

Bu tezde, hücre dondurma esnasında oluşabilecek toksisitenin ve hücrelere verilen mekanik zararın en aza indirilmesi için tasarlanan mikro-kanallı cihazın en verimli şekilde kullanılabilmesi için iki-fazlı akış çalışma koşulları optimize edilecektir. Ülkemizde mikro-akışkan sistemlerin yeni kullanılmaya başlaması, ayrıca bu çalışmanın da alanında ve üniversitemizde öncü çalışma niteliğinde olmasıyla ileriki çalışmalarda kullanılabilmesi tez çalışmasının özgün yönüdür.

2. GENEL BİLGİLER

Eş boyutlu damlacık üretimi ve kullanımının, tek hücreli memeli hücrelerinin görüntülenebilmesi [5], mikro reaktör olarak; çok aşamalı proses içeren mikro ve nano partikül sentezlerinde [6–9], çoklu faz ile oluşturulan çekirdek-kabuk polimer kapsül sentezinde[10], hücrelerin enzim reaksiyon kinetiği araştırmasında[11], ilaç yüklü mikroemülsiyon üretiminde [12], ayırma proseslerinde [13], biyoyakıt sentezinde [14] ve hücre dondurulması için gerekli ön hazırlıklar [15,16] gibi çeşitli alanlarda uygulamaları mevcuttur. Her bir damlacığın kontrol edinilebilir ve gözlemlenebilir olmasının yanı sıra, kısa süre içinde binlerce ürün çıktısı oluşturulabilmesi gibi avantajları olduğu için mikroakışkan cihazlar yardımıyla damlacık üretimi tercih edilmektedir. Mikroakışkan sistemlerde akış hızını ayarlayarak damlacık çapı ve damlacıklar arası mesafenin kontrol edilebilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır.

2.1. Mikroakışkan Cihazlar

Mikroakışkanlar, akışkan davranışını daha hassas şekilde kontrol edebilmek amacıyla yüzey kuvvetlerinin hacimsel kuvvetlere göre daha etkili olduğu mikro boyutta küçük geometrilerle sınırlandırıldığı bir bilim dalıdır. Mikroakışkanlar bilimi genel olarak akışkanlar mekaniği biliminin bir alt disiplindir. Daha büyük hacimlerde bulunan akışkanların fiziğini tanımlayan temel denklemler, mikroakışkan sistemler için kullanılan denklemler ile aynıdır. Mikro sistemde çalışılan boyutlar, klasik akışkanlar mekaniğine göre 1 milyon kat küçüktür. Genel akışkan sistemler ile mikroakışkan sistemler arasındaki boyut farklılıkları akış rejimleri üzerinde de farklılıklarına sebep olmaktadır. Örneğin, genel akışkanlar mekaniğinde laminer ve türbilans akış gözlenebilirken, mikroakışkan sistemlerde boyutun küçüklüğü sebebiyle sadece laminer akışta çalışılabilmektedir. Mikroakışkan sistemlerin başka bir önemli özelliği de yüzey geriliminin etkileridir. Yüzey gerilimi genellikle makroskopik akışkan sistemler için çok önemli olmayan bir etkidir. Bununla birlikte, mikroakışkanlarda, kullanılan sıvı miktarının çok az olması nedeniyle yerçekimi kuvvetleri genellikle ihmal edilebilir. Yüzey gerilimi, sıvıların, örneğin açık yüzeylerde veya kapalı kanallar içinde tek damlacıklar şeklinde taşındığı sistemlerde artarak baskın hale gelir.

Makro sistemlerden farklı olarak mikro akışkanlar küçük boyutlu cihazlarla kullanılabilir. Mikro akışkan cihaz olarak bilinen bu cihazlar tarihte ilk olarak 1970'li yıllarda Stanford Üniversitesi'nde minyatürleştirilmiş gaz kromatografisi (GC) olarak geliştirilmiştir. Bu minyatür gaz kromatografisi, özellikle DNA ve proteinlerin karmaşık karışımlarının analizi için teknolojinin geliştirilmesini teşvik etmiştir [17].

Mikroakışkan sistemlerin gelişiminde bir başka motivasyon ise, 1990'larda ABD Savunma Bakanlığı Savunma Gelişmiş Araştırma Projeleri Ajansı (DARPA)'nın kimyasal ve biyolojik silahların kullanıldığı büyük askeri ve terör tehditlerine karşı sahada detektör olarak kullanılacak mikroakışkan sistemler geliştirilmesini desteklemesi olmuştur. Bu programlar akademik alanda mikroakışkan teknolojisinin hızlı büyümesi için önemli bir gelişme oldu [18].

2.2.Mikroakışkan Cihazlarda Taşınım Olayları

Mikroakışkan cihazlar, cihaz boyutlarının mikro seviyede küçük olması sebebi ile Reynold sayısı (Re) 1,0'den küçük olduğu için, laminer akışa [19] sahiptir. Reynold sayısını veren aşağıdaki kesirde:

$$Re = \frac{D_h * v * \rho}{\mu} \quad (1)$$

D_h hidrolik çap, 10^{-6} m mertebelerindedir. **Eşitlik 1**'de v çizgisel akış hızı, ρ akışkanın özkütlesi ve μ akışkanın dinamik viskozitesidir.

Laminer akışa sahip mikroakışkan sistemlerde gözlenebilecek büyük basınç düşüşleri, sıvının çıkıştan geçmesine izin vermeyebilir ve bu durum mikroakışkan cihazın istenildiği gibi çalışmasına engel olabilir. Ayrıca sürtünme yük kayıplarından kaynaklanan akış düzensizliklerinin, damlacıklar arası mesafe ve damlacık çapının kararlılığını bozarak eş boyutlu damlacık oluşumunu etkilediği gözlenmiştir [21]. Bu durumun yarattığı düzensizliğe örnek olarak, iki bitişik damlacığın çarpışması ve bu sebeple daha büyük bir damlacığın oluşumu gösterilebilir.

Makro sistemlerde olduğu gibi mikroakışkan cihazlarda da kanal duvarlarındaki sürtünme kaybından dolayı bir basınç düşüşü yaşanır. Laminer akışın olduğu kılcal kanaldaki iki nokta arasındaki basınç düşüşü Hagen-Poiseuille ilişkisi kullanılarak elde edilebilir [20]:

$$\Delta P = \left(\frac{k_{f1} \rho L_1 v_1^2}{2D_h} \right) + \left(\frac{k_{f1} \rho L_2 v_2^2}{2D_h} \right) + 24 \left(\frac{k_{f2} v_2^2 \rho}{2} \right) + \left(\frac{k_{f3} v_2^2 \rho}{2} \right) \quad (2)$$

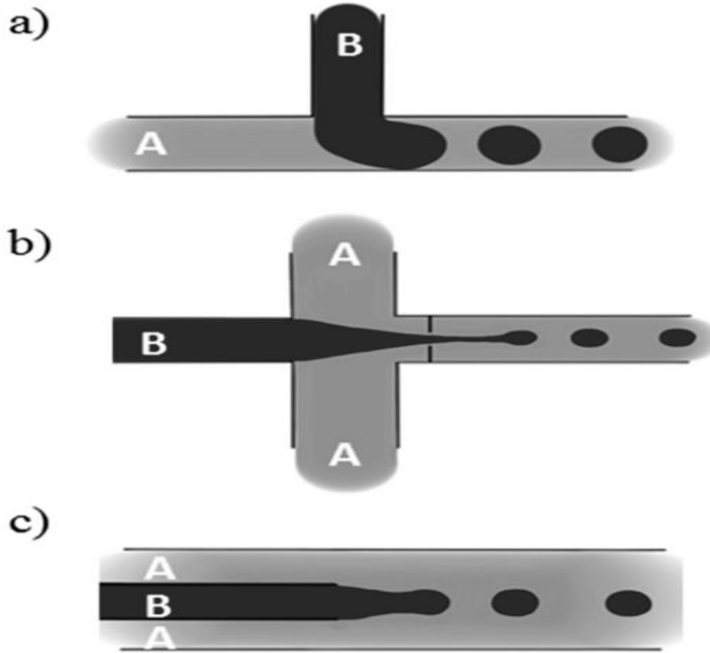
Eşitlik 2'de $\left(\frac{k_{f1} \rho L_1 v_1^2}{2D_h} \right)$ kısmında düz bir kanalda f sürtünme katsayısı, D_h hidrolik çap, L kanal uzunluğu, ρ sıvının yoğunluğu ve v sıvının akış hızıdır. Kanal uzunluğu arttıkça kanal boyunca basınç düşüşü artmaktadır. Bu durum sistemde sürtünme yük kaybına sebep olmaktadır.

Kanal uzunluğuna ek olarak kanal tasarımında kullanılan dirsek, u-dönüşleri ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı sürtünmeler yerel yük kayıplarına sebep olmaktadır [22]. Serpentin içeren tasarımlarda u-dönüş bölgelerinde merkezci kuvvet etkisiyle akışta düzensizliğin olduğu gözlenmiştir [23]. **Eşitlik 2**'deki $\left(\frac{k_{f1} \rho L_2 v_2^2}{2D_h} \right) + 24 \left(\frac{k_{f2} v_2^2 \rho}{2} \right) + \left(\frac{k_{f3} v_2^2 \rho}{2} \right)$ kısım ise yerel yük kayıplarını göstermektedir. **Eşitlik 2**'deki kayıp katsayısı değerleri **EK-6**'da verilmiştir.

2.2. Damlacık Oluşturmak için Kullanılan Mikro Akışkan Cihazlar

Literatürde çalışılan cihazlarda damlacıklar mikroreaktörler [24–27] veya mikro kontrollü odacıklar [28] olarak kullanılmaktadır. Oluşturulan eş boyutlu damlacıklar içine hücreler hapsedilerek, hücreler üzerinde çeşitli kimyasalların etkileri incelenebilmektedir [29–32]. Çalışmaları birbirlerinden ayıran en önemli özellik ise damlacık oluşumu için planlanan cihazların tasarımıdır. Tasarımlardaki değişiklikler giriş kanallarının konumu, sayısı, kanal genişlikleri, nozül tipleri olmak üzere çeşitlendirilmiştir. Bu çalışmalarda ortak olarak damlacık oluşumunda fiziksel mekanizmalara dayanan üç ana yaklaşım ortaya çıkmıştır. Bunlar damla üretim bölgesindeki akış alanı topolojisiyle tanımlanır. Bu cihaz yaklaşımları, T-kanallı mikroakışkan cihazlar, eş akışlı (co-flow) mikroakışkan

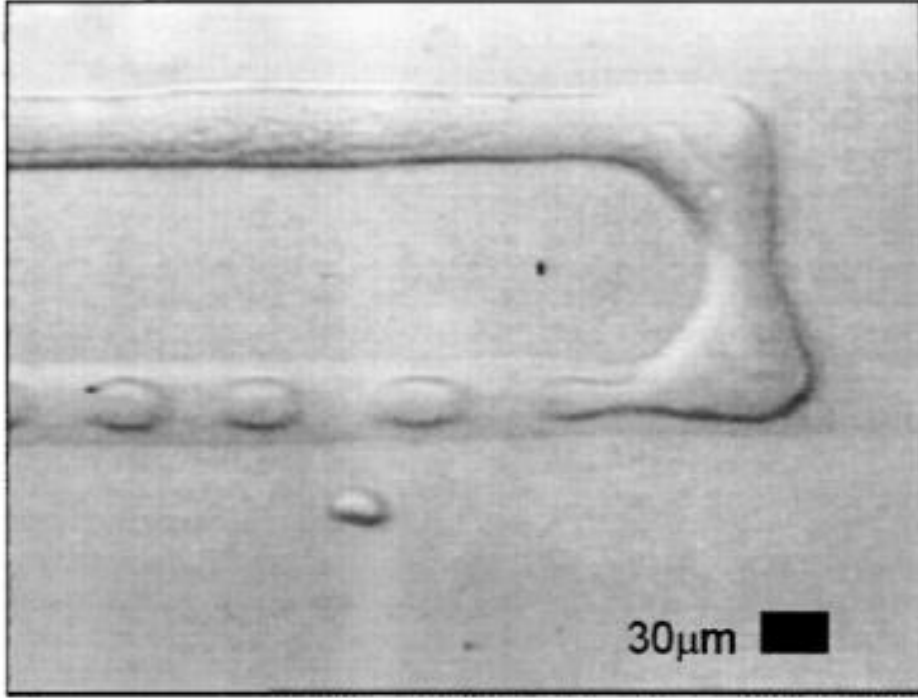
cihazlar ve akış odaklı (flow focusing) mikroakışkan cihazlar olarak Şekil 2.1’de gösterilmiştir [33,34].



Şekil 2.1. Mikro-akışkan cihazların geometrisi: (a) T-kavşaklı, (b) akış odaklı (x-kavşaklı) ve (c) eş akışlı. ‘A’ sürekli fazı ve ‘B’ dağınık sulu fazı göstermektedir [34].

2.2.1. T-Kanallı Mikroakışkan Cihazlar

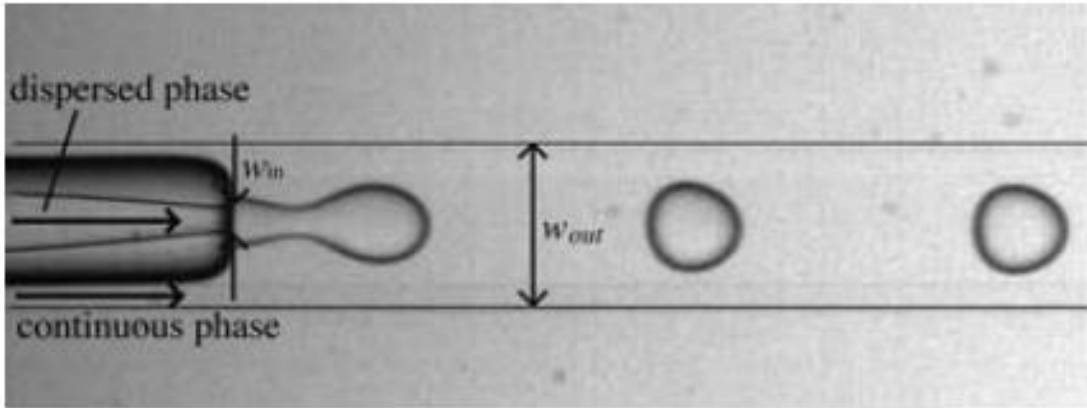
T-kanallı basınç kontrollü akış uygulanan bir mikro akışkan sistemde damlacık oluşumu ilk olarak Thorsen ve arkadaşları [35] tarafından çalışılmıştır. Çalışmada kullanılan farklı yağ ve su hatları Şekil 2.2’de gösterildiği gibi 90°’lik bir T-kavşakta karşılaştırılmıştır. Yağ ve su fazı akış hızını ayarlamak için kullanılan basınç ve oluşan damlacık boyutları üzerinde etkisi tartışılmıştır.



Şekil 2.2. Basınç kontrollü akış uygulanan T-kanallı cihaz örneği [35].

2.2.2. Eş Akışlı (Co-flow) Mikroakışkan Cihazlar

Eş akışlı cihazlarda nozül bölgesinde Şekil 2.3'teki gibi dikdörtgen veya kare şeklindeki bir dış kanal ve dış kanala paralel ilerleyen bir iç kanal ile damlacık oluşturulmaktadır.

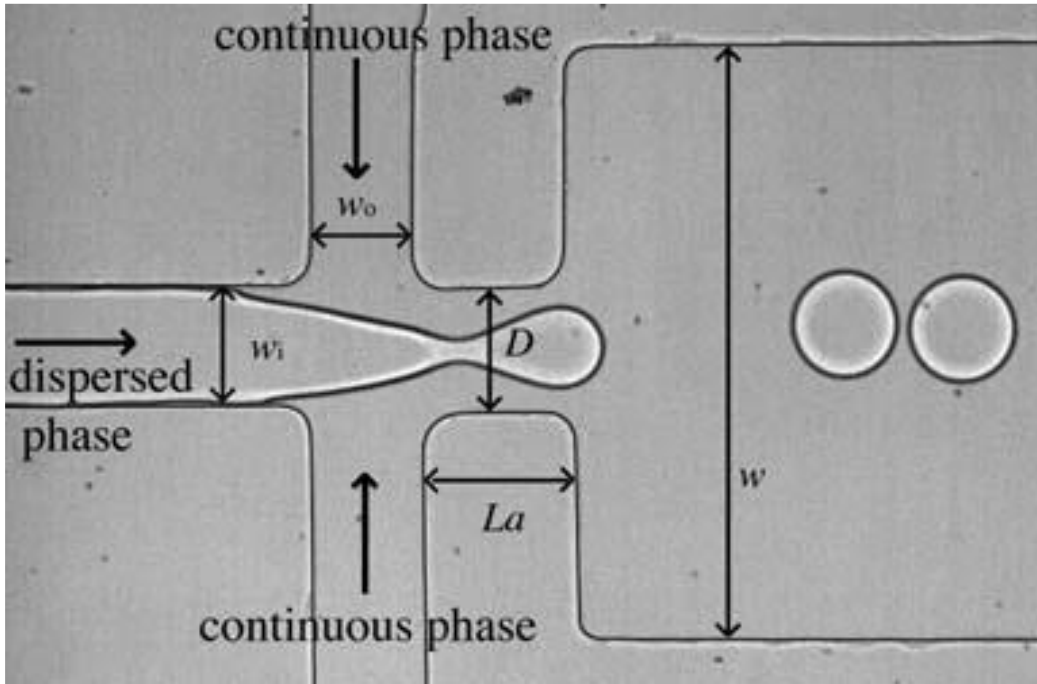


Şekil 2.3. Eş akışlı geometriye sahip Mikroakışkanlı Cihaz Örneği [35].

Eş akışlı cihazlar üzerindeki ilk çalışma Cramer ve arkadaşları [36] tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan sistemde, sürekli akış hızı kritik bir değere ulaştığında jet akışından damlacık akışına geçiş sağlandığı gösterilmiştir

2.2.3. Akış Odaklı (Flow Focusing) Mikroakışkan Cihazlar

Akış odaklı cihazlar, diğer cihaz sistemlerinden farklı olarak karşılıklı gelen iki adet sürekli faz kanalı ve bir adet dağınmık faz kanalı olmak üzere üç akış girişi bulundurmaktadır. Kavşak çıkışı ile birlikte dörtlü bir kavşak oluşturduğundan bu çalışmada x-kavşaklı cihaz olarak adlandırılmıştır. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi dağınmık faz, iki taraftan gelen sürekli faz arasında sıkıştırılarak kesilmekte ve damlacık oluşumu sağlanmaktadır.



Şekil 2.4. Akış odaklı geometriye sahip mikroakışkan cihaz [35].

2.3. Damlacık Oluşumu için Kullanılan Boyutsuz Sayılar

Damlacık oluşturmada kullanılan mikro akışkan cihazlar Şekil 2.1'de gösterildiği gibi T-kavşak, akış odaklama ve eş akış yöntemlerini içeren cihazlardır [34]. Bu cihazlar ile sürekli bir yağ fazı içinde eşboyutlu damlacıklar oluşturmak mümkündür. Bu

damlacıkların oluşumunda baskın olan kuvvetler, atalet kuvveti, yüzey gerilimi ve viskoz kuvvetlerdir. Bu kuvvetlerin birbirleriyle olan ilişkileri, akışkanlar mekaniği biliminde boyutsuz sayılarla ifade edilmektedir [37]. Damlacık oluşumunda etkisi olan boyutsuz sayı kılcal sayıdır (Capillary number, Ca) [38,39].

2.3.1. Kılcal Sayı

Kılcal sayı, bir sistemdeki viskoz kuvvetleri yüzey gerilim kuvvetleriyle ilişkilendiren boyutsuz bir değerdir. Sistemde birden fazla faz birbiri ile temas içinde ise akışkan fazların viskozite oranının etkisini içerek şekilde aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$Ca = \frac{\mu_{sürekli} \cdot V}{\sigma} \frac{\mu_{sürekli}}{\mu_{damlacık}} = \frac{\text{Viskoz kuvvetler}}{\text{yüzey gerilimi}} \quad (3)$$

Bu eşitlikte $\mu_{sürekli}$ ve $\mu_{damlacık}$ sırasıyla sürekli ve dağınmık fazın dinamik viskozitesi, V karakteristik hız, σ yüzey gerilimi veya iki faz arasındaki arayüz gerilimidir.

Kılcal sayı, akışkan hareketinden kaynaklanan sürüklenme kuvvetleri ile yüzey geriliminden kaynaklanan kuvvetlerin arasındaki ilişkidir. Bu, bir sıvının karışamaz (veya kısmen karışabilen) ikinci bir sıvı ya da gaz tabakası boyunca hareket ettirilmesi durumunda geçerlidir [40,41].

2.4. Eş Boyutlu ve Eş Aralıklı Damlacıkların Oluşumu

Mikro damlacıklar gibi küçük hacimlerde kütle aktarımını takip etmek ve kontrol etmek mikroakışkan sistemlerle mümkün olabilmektedir. Hücreleri damlacıklar içinde hapsederek ve damlacık içinde CPA derişimini kontrol ederek sürekli olarak ve çok aşamalı yöntemlerde oluşan mekanik zararlardan koruyarak CPA yüklemesi yapılabildiği gösterilmiştir [3, 4]. Küresel bir ortam içinde enkapsüle edilen pankreas hücre dokusu için 1-boyutlu matematiksel bir model kurularak donma sırasında CPA etkisi incelenmiştir [43]. Hücrelerin enkapsüle edildiği ortamların hacmini ve derişimini kontrol edebilmek için mikroakışkan cihazlarda oluşturulan damlacıkların davranışlarını belirlemek gerekmektedir. Damlacıkların davranışlarını; akış hızına ve cihaz tipine bağlı olarak modelleme çalışmaları yapılmıştır [44–46]. Literatürde damlacık oluşumunun

cihaz geometrisiyle doğrudan bağlantılı olduğu gözlenmiştir [47]. Farklı geometrilere yapılan çalışmalarda cihaza ait kanal genişliğinin, kanal konumunun ve damlacık oluşum bölgesindeki nozül geometrisinin damlacıkların boyu üzerinde etkili olduğu gösterilmiştir [48].

2009 yılında Abate ve arkadaşlarının [47] yaptığı çalışmada T-kavşaklı, akış odaklı (flow focusing) ve kendi tasarladıkları “pinned-jet-flow focusing” (PJFF) adını verdikleri akış odaklı cihazların karşılaştırması yapılmıştır. T-kavşaklı cihazda ve PJFF cihazda 0.01-0.04 arası düşük ve orta kılcak sayısı değerlerinde eş boyutlu damlacıklar elde edilebilirken, akış odaklı cihazda benzer damlacıklar 0.04-0.3 arası orta ve yüksek kılcak sayısı değerleri için elde edilmiştir. Kılcalık sayısı değeri orta seviye yani 0.04 civarında olduğunda her tip cihazda benzer parametrelere sahip damlacıkların üretildiği tespit edilmiştir. Akış odaklı cihazda düşük kılcak sayılarında kararsız, orta ve yüksek kılcak sayılarında kararlı damlacıklar elde edilmiştir.

Jose ve arkadaşlarının [49] 2012 yılında yaptığı çalışmada damlacıklar arası mesafenin cihaz tasarımıyla olan ilişkisi gösterilmiştir. Kare şeklinde odacığa gönderilen damlacıkların arasındaki mesafenin kanal genişliğinin artırılıp azaltılması ile değişkenlik gösterdiği belirtilmiştir. Çalışmada ayrıca damlacıklar arası mesafenin, sürekli fazın viskozitesi ve damlacığın derişimine bağlı olduğu gösterilmiştir. Çalışmanın literatüre bir başka katkısı ise damlacıklar arası mesafenin sabit damlacık boyutunda akış hızları ile ters orantılı olduğunun gösterilmesidir. Düşük kılcak sayısında ($Ca < 1,5 \times 10^{-2}$) ve damlacıklar arası mesafe ile damlacık çapı oranı 10'dan büyük olduğu durumda eş aralıklı damlacıklar oluşturmuşlardır.

Deng ve arkadaşlarının [50] 2017 yılında yapmış olduğu damlacık oluşturma parametrelerinin incelendiği çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak su içinde yağ (oil-in-water) damlacıkları üzerinde çalışılmıştır. Yağlı damlacıklar eş akışlı cihazda üretilmiştir. Eş akışlı cihazlarda damlacık oluşumunu yüzey gerilimi ile viskoz ve atalet kuvvetlerinin etkilediği gösterilmiştir. Buna bağlı olarak damlacık çapının, sürekli fazın akış hızı, viskozitesi ve arayüzey gerilimiyle ters orantılı olduğu gösterilmiştir. Ayrıca damlacık çapının, dağınık faz (yağ) akış hızı sabit tutulup sürekli faz (su) akış hızı

arttırıldıkça küçüldüğü gösterilmiştir. Bunun sebebi olarak sürekli faz hızının yüksek olmasının, iki fazlı arayüzeyde ve viskoz sürüklenme kuvveti üzerinde yüksek hız grediyeni oluşturduğu ve damlacıkların küçüldüğü belirtilmiştir. Sürekli faz akış hızı sabit tutulup dağınmık faz olan yağ akış hızı arttırıldıkça sürüklenme kuvveti üzerinde etkisi az olduğu için damlacık boyunda değişiklik yapamadığı gösterilmiştir.

2017 yılındaki başka bir çalışmada [51] kılcal sayı ve damlacık oluşum bölgesindeki değişikliklerin damlacık oluşum rejimi ve eş boyutlu damlacıkların boyutu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Matematiksel modelleme ve deneysel çalışma yapılan bu makalede akış odaklı cihaz ile eş akışlı cihaz kullanılmıştır. Akış odaklı cihaz ile damlacık oluşumunda nozül uzunluğunun ve genişliğinin damlacık üretim rejimleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu makaleden elde edilen önemli bir sonuç ise nozülün yeteri kadar küçük veya kılcal sayının (Ca) 0,3'ten büyük olduğu durumda sadece jet akış gözlenebildiği belirtilmiştir. Buna bağlı olarak nozül genişliği arttırıldığında, damlacık-jet arası geçiş ve damlacık akış bölgelerini kapsayan kılcal sayıların yükseldiği tespit edilmiştir.

Mastiani ve arkadaşlarının [52] 2018 yılında yapmış olduğu araştırmada yağ içinde sulu damlacık olan bir sistem yerine sulu iki fazlı bir sistemde (aqueous two phase system, ATPS) damlacık oluşumu üzerine çalışmışlardır. Yapılan çalışmada iki giriş ve bir çıkış kanalı bulunan akış odaklı cihaz kullanılmıştır. ATPS'de sürekli faz olarak polietilen glikol (PEG), dağınmık (damlacık) faz olarak deksametazon (DEX) tercih edilmiştir. Sistemin yağ içinde sulu damlacık sisteminden en önemli farkı çok düşük arayüz gerilimine sahip olmasıdır. Bu düşük arayüz gerilimi sayesinde, sulu damlacık sisteminde sürekli faza ait kılcal sayının (Ca) 0,1'den küçük olduğu durumda gözlenen jet akış rejimi, ATPS'de Ca 0,3 ile 1,7 aralığında gözlenmiştir. Böylece yağ içinde sulu damlacıklara göre çok daha küçük (0,7 μm) çapa sahip ve çok daha yüksek (300 Hz) frekansta damlacıklar elde edilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada akış hızları oranı ve sürekli faz akışının damlacık çapıyla olan ilişkisi incelenmiştir. Damlacık çapının sürekli faz basıncı ve akış hızları oranı ile fonksiyonunda sürekli faz akışkanının basıncı 0,8. dereceden, akış hızı oranının ise 0,2. dereceden üstel kuvveti ile orantılı değişim gösterdiği deneysel çalışmalar ile ortaya konmuştur.

2019 yılında Han ve arkadaşları [53] üç boyutlu sayısal simülasyon ve deneysel yapılan çalışmada damlacık oluşum mekanizması ve oluşumunu etkileyen faktörleri incelemiştir. Damlacık oluşum faktörleri olan frekans ve damlacık boyutunun akış hızları oranı, sürekli fazın viskozitesi ve arayüz gerilimi ile olan ilişkisi tartışılmıştır. Yapılan bu çalışmada araştırmacılar ilk olarak sürekli fazı sabit tutup akış hızları oranını arttırmışlardır. Bu artış ile sürekli fazın kayma hızı (shear rate) azaldığı için damlacık boyunun arttığını ve buna bağlı olarak frekansın düştüğü gözlemlenmiştir. İkinci olarak sürekli fazın damlacık boyu ve frekans üzerine etkisini inceleyen araştırmacılar, sürekli faz ve dağınık faz hızlarını ve aralarındaki arayüzey gerilimini sabit tutup, sürekli faz viskozitesini arttırmışlardır. Viskozite arttıkça viskoz kuvvetler artacağı için damlacık çapı azalmış ve buna bağlı olarak damlacık oluşum frekansının arttığı gösterilmiştir.

Mikroakışkan cihaz üzerinde damlacık boyutu üzerine yapılan 2019 yılında bir başka çalışma Rahimi ve arkadaşları [48] tarafından yürütülmüştür. Kılcal iki kanalın iç içe konumlandırıldığı (coaxial flow focusing) bir akış odaklı mikro akışkan cihaz üzerinde çalışmışlardır. Dış kanalda yer alan akış sürekli, iç kanalda yer alan akış ise dağınık fazdır. Damlacıklar iç kanal nozülü önüne konumlandırılmış dar kanal bölgesinde oluşturulmaktadır. Bu çalışmada mikro akışkan cihaza ait dört temel geometrik parametrenin damlacık özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu geometrik parametreler dar kanal yarıçapı, iç kanal nozülü yarıçapı, iç kanal nozülünün dar kanala olan uzaklığı ve dar kanal uzunluğu olarak belirtilmiştir. Yapılan bu deneysel çalışmada ilk olarak dağınık faz akış hızı sabit tutulup sürekli faz akış hızı artırıldığında geometrik parametrelerden bağımsız olarak damlacık boyunun küçüldüğü gösterilmiştir. Böylelikle sürekli faz akışının kılcal sayı arttıkça, akış hızına dik yöndeki hız değişimi artırılmış ve fazlar arasındaki arayüzeyde yüksek sürüklenme kuvveti oluşturmuştur. Bu sebeple daha küçük çapa sahip damlacıkların elde edilmesi sağlanmıştır. Yapılan bu çalışmada uygulanan sayısal simülasyonun deney sonuçları ile doğrulanması sağlanmıştır. Farklı nozül çaplarına ait konfigürasyonlarda gerçekleştirilen deneylerde ve simülasyon çalışmalarında, azalan nozül çapı ile elde edilen damlacık çapının küçüldüğü ve eş boyutlu damlacık oluşturma performansının arttığı tespit edilmiştir. Benzer bir şekilde dar kanal yarı çapı küçüldükçe elde edilen damlacık çapının küçüldüğü gösterilmiştir. Dar kanal uzunluğu arttıkça görece daha küçük çapa sahip damlacıkların oluştuğu

gözlemlenmiştir. Nozül ile dar kanal arasındaki uzaklığın damlacık çapı üzerinde ihmal edilebilir kadar değişiklik gösterdiği ifade edilmiştir.

Literatürde yer alan cihaz tasarımlarında çeşitli amaçlar için eklenti serpentin geometrileri kullanılmıştır. Bu amaçlara örnek olarak kullanılan kanal uzunluğunun artırılıp cihazda yer kaplanmasının engellenmesi [54], literatürde pasif karıştırma olarak tanımlanan akış düzensizliği ile karıştırma etkisi [55–59] gösterilebilir.

Muradoğlu ve arkadaşlarının [56] 2005 yılında yaptığı çalışmada mikroakışkan cihazlarda reaktör olarak kullanılan damlacıkların, serpentin bölgesinde ilerlerken merkezkaç kuvvetiyle kendi içlerinde karışması incelenmiştir. Karışmanın incelenebilmesi için kılcal sayı Ca ve damlacık çapının nozül genişliğine oranı gibi boyutsuz sayılar kullanılmıştır. Kılcal sayı azaldıkça damlacığın kendi içindeki karışmayı arttırdığından bahsedilmiştir. Ayrıca damlacık içindeki karışmanın, damlacık çapının nozül genişliğine oranının 0,53'ten yüksek olduğu durumda daha iyi olduğu gözlenmiştir.

Zhang ve arkadaşlarının [57] 2014 yılında yaptığı çalışma ile serpentin cihazdaki dönüşlerde elde edilen merkezkaç kuvveti etkisiyle 8 μm çapa sahip partiküllerin kanal ortasında düzenli şekilde sıralanması sağlanmıştır. Bu şekilde bir akış, kıvrımlı kanal duvarları yakınında oluşan ve literatürde ikincil akış [60] olarak nitelendirilen akış kaynaklı sürüklenme kuvveti ve merkezkaç kuvveti arasındaki kuvvet dengesi ile elde edilmiştir.

2017 yılında Javaid ve arkadaşlarının [58] yaptığı çalışmada farklı serpentin geometrisine sahip mikroakışkan cihazların davranışlarını incelemişlerdir. Bu çalışmada kompleks serpentin geometrisine sahip cihazlarda akışın karıştırma performansı ve ikincil akış etkisi incelenmiştir. Serpentin geometrisinde artan dönüş sayısı ve artan akış hızı etkisiyle cihazda basınç düşüşünün arttığından bahsedilmiştir.

Yapılan bu tez çalışmasında, literatürdeki yapılan çalışmaların ışığında tasarlanan farklı geometri ve boyutlara sahip mikroakışkan cihazlarda oluşturulan damlacıkların

boyutlarının, sürekli ve dağınık faz oranları sabit tutularak, akış hızı ile olan ilişkisi incelenmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Malzemeler

Çalışmada iki fazlı akış içinde sulu damlacık oluşturmak için kullanılan x-kavşaklı (akış odaklı) basit cihazlar Harvard Tıp Fakültesi ve Massachusetts General Hospital'da, Dr. Mehmet Toner yönetimindeki BioMEMS Resource Center (BMRC)'da tasarlanmıştır. Diğer cihazlar ise bu x-kavşak akabinde ısıtılabilen uzun bir serpentin bölgesi, ısıl-çift girişleri ve damlacık arası mesafeyi kontrol edebilmek amacı ile ek yağ kanalı eklenerek tez danışmanı Dr. Selis Önel tarafından aynı merkezde tasarlanmıştır.

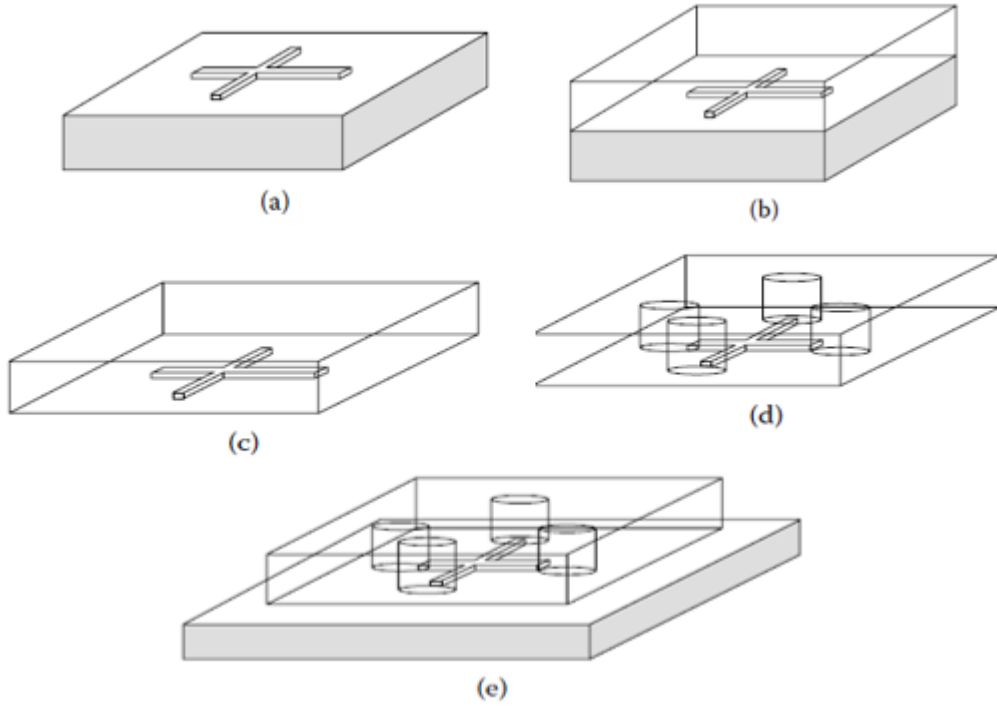
Mikro kanallara sahip serpentinli ve serpentinsiz cihaz kalıpları fotolitografi yöntemi ile silikon wafer üzerine fotorezist SU-8 malzeme kaplanarak BMRC'de üretilmiştir. Bunun için cihaz geometrisinin işlendiği krom-cam maskeler kullanılmıştır.

Cihazlarda iki fazlı akış içinde damlacık oluşturabilmek için sürekli faz olarak yağ ve dağınık faz olarak sulu çözeltileri temsil eden deiyonize su kullanılmıştır. Yağ fazında diğer yağlara göre yüksek su tutma kapasitesi olan (hacmen %0,4-4 [3]) ve kendisi su içinde çözünmeyen biyouyumlu soya yağı kullanılmıştır. Bu yağ oda sıcaklığında deiyonize suya doymuş hale getirildikten sonra kullanılmıştır. Test tüpünde soya yağına deiyonize su eklenip ağzı kapatılarak 1 dakika boyunca su yağ içinde iyice dağılana kadar çalkalanmıştır. Ağzı kapalı olarak 1 gün boyunca oda sıcaklığında bekletilerek yağ ve su fazlarının karışmayan kısımlarının tamamen ayrılması beklenmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında sulu damlacıkların kararlılığını arttırmak için doymuş yağa yüzey aktif madde olan SPAN 80 (hacmen %0,1) eklenmiştir.

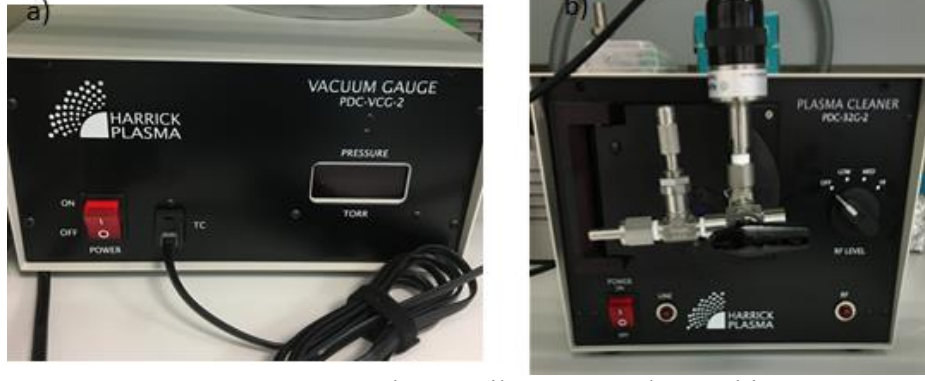
Araştırmada kullanılan mikro akışkan cihazlar, saydam ve hafif esnek bir yapıya sahip olan polidimetilsiloksan (PDMS) malzemedan üretilmiştir. Cihazların PDMS malzemedan yapılma sebebi, optik mikroskop ile rahat gözlemlenebilmesi ve suyun ve yağın yapışmayacağı bir malzeme olmasıdır. Tez çalışmasında kullanılan mikro kanallı cihazlar serpentinli (Tip 2) ve serpentinsiz (Tip 1) olmak üzere iki farklı tiptedir.

3.2.1. Mikroakışkan Cihazların Yumuşak Litografi ile Üretimi

PDMS (Sylgard 184; Dow Corning, Midland, MI) ve çapraz bağlama ajanı (curing agent) 10:1 oranında karıştırılarak oluşturulan viskoz polimer çözelti SU-8 kalıbına dökülmüştür (Şekil 3.5a, 3.5b). Çözelti üzerindeki hava kabarcıkları vakum odasında (degassing) uzaklaştırılmıştır. Hava kabarcıkları alınan PDMS çözeltisi 80 °C'deki etüvde en az 4 saat tutularak çapraz bağlanma sayesinde sertleşme işlemi yapılmıştır. Sertleşen SU-8 kalıptan çıkarılan ve bir yüzeyinde kanal geometrisini içeren PDMS malzeme (Şekil 3.5c) üzerine kanal giriş ve çıkış delikleri 75-gauge iğneler (punch) kullanılarak açılmıştır (Şekil 3.5d). Kanalları içeren PDMS malzeme ve cam lamalar, yüzeylerinin temizlenmesi ve birbirleriyle bağ yapma özelliğinin kazanılması için Şekil 3.6'daki plazma cihazına (Harrick Plasma Inc. PDC-32G-2 Model) yerleştirilmiştir. Hava kullanılarak 2,8 Torr basınç altında 40 saniye süreyle plazmaya tabi tutulmuştur. PDMS'in kanal geometrilerinin bulunduğu yüzeyi ile cam lam yapıştırılarak cihaz hazırlanmıştır (Şekil 3.5e).



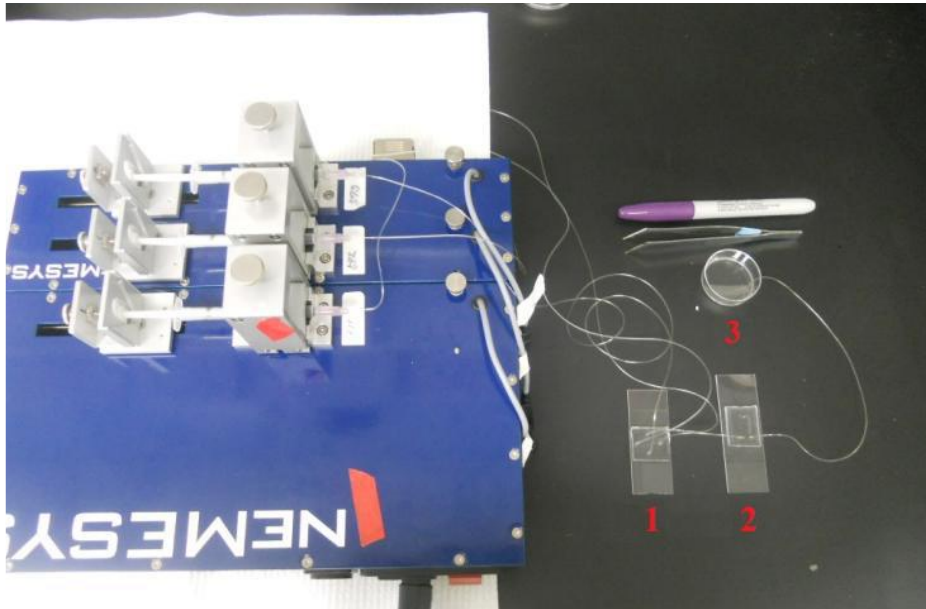
Şekil 3.5. Genel olarak mikroakışkan cihaz üretimi a) Erkek kalıp b) Erkek kalıp üzerine 10:1 oranında karıştırılmış PDMS ve çapraz bağlama ajanı c) Kanal delikleri açılmış katı PDMS kalıp d) Cam yüzeye yapıştırılmış PDMS kalıp [61]



Şekil 3.6. Harrick Plasma Inc marka plazma cihazı ve yardımcı ekipmanı

3.3. İki Fazlı Mikroakışkan Sistemde Eş boyutlu ve Aralıklı Damlacık Üretimi

X-Kavşaklı Tip-1 ve serpentin eklentili Tip-2 cihazlarda yağ ve su fazı akış hızları Şekil 3.7'deki otomatik kontrollü çok-şırıngalı pompa sistemi (NEMESYS Low Pressure Module) kullanılarak ayarlanmıştır. Damlacık oluşumu için en verimli yağ ve su fazları hacimsel akış hızları oranı cihaz tasarımında planlandığı gibi sabit 20:1 seçilmiştir. Akış hızı değiştirilerek yağ fazı (sürekli faz) ve su fazı (dağınık faz) ile oluşturulan iki fazlı akış ortamında eş boyutlu damlacıklar oluşturulmuştur.



Şekil 3.7. Otomatik Şırınga Pompası

X-kavşaklı Tip-1 ve Tip-2 cihazlarda oluşturulan damlacıklar Olympus IX73 marka çevrik mikroskopta 4X objektif kullanılarak görüntülenmiştir. 1220 adet 15 saniye uzunluğundaki video mikroskop görüntüleri Stream Motion programı kullanılarak kayıt altına alınmıştır. Elde edilen görüntüler sayesinde Tip-1 cihaz ve Tip-2 cihaz ile oluşturulan damlacıkların Python programlama dili ile yazılmış olan bir görüntü işleme kodu kullanılarak yaklaşık 185000 damlacık çapı ve damlacıklar arası mesafe elde edilmiştir. Elde edilen verilerin teorik hesaplamaları ve grafiksel sonuçları MATLAB yazılımı ile gösterilmiştir.

3.3.1. Tip-1 X-Kavşaklı Mikroakışkan Cihazda Damlacık Üretimi

Literatürdeki çalışmalarda her damlacık kendi içinde reaktör niteliğindeki kararlı sistemler olarak tanımlanmıştır [62]. Reaktör olarak kullanılan damlacıkların kararlı davranabilmesi için mikroakışkan cihaz kullanılarak eş boyutlu ve eş aralıklı olarak üretilmesi istenmiştir. Literatürdeki cihaz geometrilerinden farklı olarak bu tez çalışmasında akış odaklı cihaz geometrisine sahip 25, 50 ve 100 mikron nozül genişliğinde damlacık oluşturma nozülü içeren üç farklı x-kavşaklı Tip-1 cihaz kullanılarak eşboyutlu damlacık üretimi yapılmıştır. Damlacıkları oluşturacak akış hızlarıyla, damlacık boyutu ve damlacıklar arası mesafe değişkenleri incelenerek cihaz çalışma koşulları araştırılmıştır.

Yapılan çalışmalarda farklı deney gruplarının birbiriyle kıyaslanabilmesi için damlacık çapı, damlacıklar arası mesafe ve akış hızları boyutsuz sayılarla ifade edilmiştir. Bunun için öncelikle kanal geometrisi eş değer çap kullanılarak hesaplanmıştır. Bu şekilde damlacıklar arası mesafe ve damlacık çapları boyutsuz sayılar kullanılarak ifade edilmiştir. Cihazların eş değer çapı, hidrolik çapın hesaplanma yöntemi ile bulunmaktadır. Dikdörtgen kanal geometrisine sahip cihazın hidrolik çap hesabı **Eşitlik 4**'te verilmiştir.

$$D_h = \frac{2 \cdot h \cdot d}{h + d} \quad (4)$$

Eşitlik 4'te h dikdörtgen kanal kesitindeki yüksekliği, d ise genişliği tanımlamaktadır. Hesaplanan hidrolik çaplar (D_h) ile cihazlara ait eş değer çaplar (D_{Device}) birbirine eşittir. Buna bağlı olarak boyutsuz damlacık çapı $D_{droplet}^*$ aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$D_{droplet}^* = \frac{D_{droplet}}{D_{Device}} \quad (5)$$

Eşitlik 5'te verilen değer deneysel çalışmada elde edilen damlacık çaplarını ifade etmektedir. Aynı şekilde boyutsuz damlacıklar arası mesafe, $D_{interdroplet\ distance}^*$, deneysel çalışmada bulunan damlacıklar arası mesafenin eş değer çapa oranı ile bulunmaktadır:

$$D_{interdroplet\ distance}^* = \frac{D_{interdroplet\ distance}}{D_{device}} \quad (6)$$

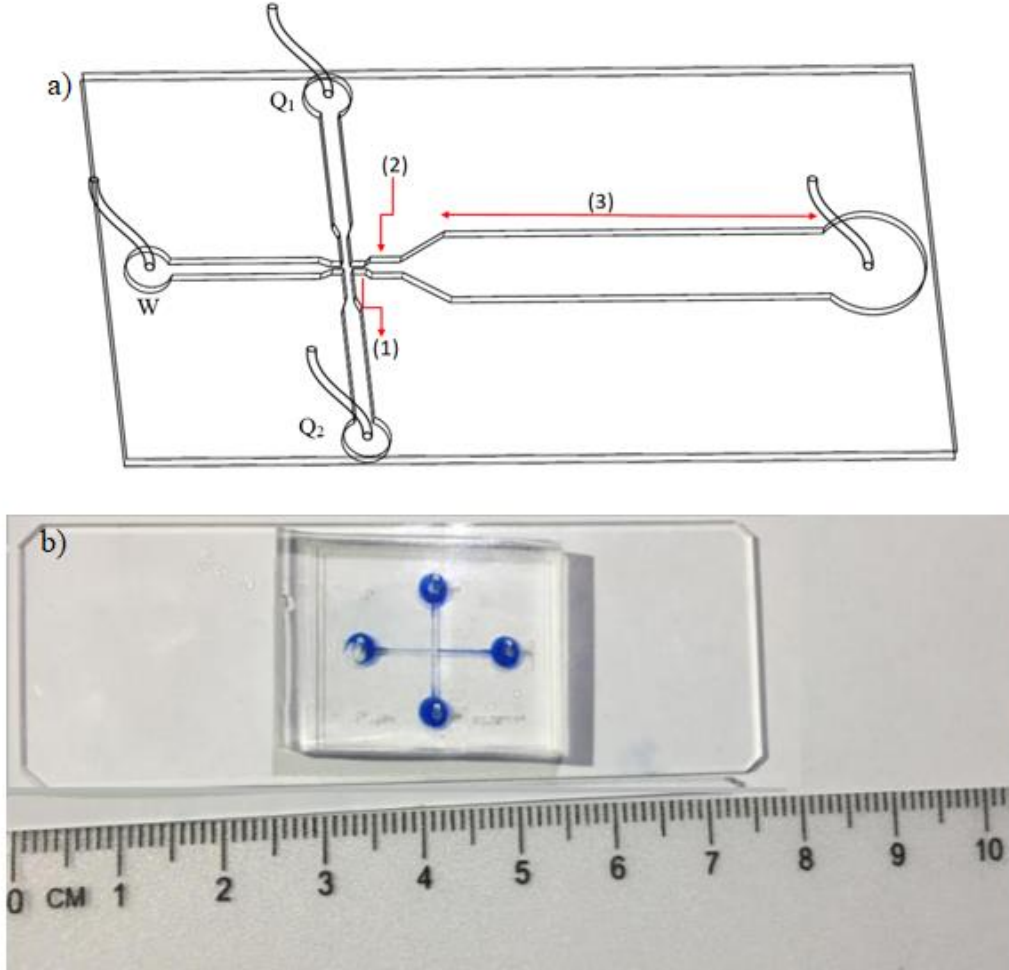
Damlacık oluşturmak için kullanılan akış hızlarının kıyaslanabilmesi için sürekli fazın akış hızı **Eşitlik 7**'deki gibi boyutsuz sayı olan kılcal sayı ile ifade edilmiştir:

$$Ca = \frac{\mu \cdot V}{\sigma} \quad (7)$$

Kılcal sayıda kullanılan çizgisel hızı hesaplamak için gerekli olan yağın hacimsel akış hızı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$V = \frac{Q_{yağ}}{h \cdot d} \quad (8)$$

Tez araştırması kapsamında kullanılan akış odaklı Tip-1 cihaz tasarımı Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Basit x-kavşağa sahip cihazın karşılıklı iki adet yağ girişi, bir adet su girişi ve bir adet çıkış kanalı bulunmaktadır. Yağ kanalları $Q_{O,1}$ ve $Q_{O,2}$ ’deki akış hızları toplamı ($Q_{O,tot}$) ile su kanalı Q_w ’deki akış hızı arasında 20:1 oranı ile damlacık oluşturulmuştur. Şekil 3.8’de gösterildiği gibi Tip-1 cihazda kavşak çıkışında akış üç ana bölümden oluşmaktadır: (1) nozül, (2) damlacık oluşum bölgesi, (3) damlacık oluşum bölgesi sonrası.



Şekil 3.8. X-kavşak içeren basit akış odaklı cihazın a) fonksiyonlarına göre şematik gösterimi: (1) Nozül Bölgesi, (2) Damlacık Oluşum Bölgesi, (3) Damlacık oluşum bölgesi sonrası ve b) PDMS malzemeden üretilmiş hali

X-kavşaklı Tip-1 ve Tip-2 mikrokanallı cihazlar üç farklı ölçekte tasarlanmış ve üretilmiştir. Cihazların x-kavşak nozül genişlikleri $25 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$ ve $100 \mu\text{m}$, kanal yüksekliği yaklaşık olarak $190 \mu\text{m}$ 'dir.

Her cihazda, sistemin kararlı hale gelmesinden jet akışa geçişine kadar damlacık üretilmiştir. Çizelge 3.1, 3.2 ve 3.3'te Tip-1 akış odaklı mikroakışkan cihazlarda çalışılan hızlar verilmiştir.

Çizelge 3.1. 25 μm X-Kavşak Nozül Genişliğine Sahip Akış Odaklı Tip-1 Mikroakışkan Cihazda Damlacık Oluşumu İçin Kullanılan Akış Hızları

Yağ ₁ Akış Hızı, $Q_{O,1}$ ($\mu\text{l}/\text{min}$)	Yağ ₂ Akış Hızı, $Q_{O,2}$ ($\mu\text{l}/\text{min}$)	Toplam Yağ Akış Hızı, $Q_{O,tot}$ ($\mu\text{l}/\text{min}$)	Su Akış Hızı Q_w ($\mu\text{l}/\text{min}$)
1	1	2	0.1
1.5	1.5	3	0.15
2	2	4	0.2
2.5	2.5	5	0.25
3	3	6	0.3
3.5	3.5	7	0.35
4	4	8	0.4
4.5	4.5	9	0.45
5	5	10	0.5
10	10	20	1
15	15	30	1.5
20	20	40	2
23	23	46	2.3

Çizelge 3.2. 50 µm X-Kavşak Nozül Genişliğine Sahip Akış Odaklı Tip-1 Mikroakışkan Cihazda Damlacık Oluşumu İçin Kullanılan Akış Hızları

Yağ ₁ Akış Hızı, $Q_{O,1}$ (µl/min)	Yağ ₂ Akış Hızı, $Q_{O,2}$ (µl/min)	Toplam Yağ Akış Hızı, $Q_{O,tot}$ (µl/min)	Su Akış Hızı Q_w (µl/min)
1.5	1.5	3	0.15
2.75	2.75	5.5	0.275
5	5	10	0.5
7.5	7.5	15	0.75
10	10	20	1
12.5	12.5	25	1.25
15	15	30	1.5
17.5	17.5	35	1.75
20	20	40	2
25	25	50	2.5
30	30	60	3
40	40	80	4
50	50	100	5

Çizelge 3.3. 100 µm X-Kavşak Nozül Genişliğine Sahip Akış Odaklı Tip-1 Mikroakışkan Cihazda Damlacık Oluşumu İçin Kullanılan Akış Hızları

Yağ ₁ Akış Hızı, Q _{0,1} (µl/min)	Yağ ₂ Akış Hızı, Q _{0,2} (µl/min)	Toplam Yağ Akış Hızı, Q _{0,tot} (µl/min)	Su Akış Hızı Q _w (µl/min)
1.5	1.5	3	0.15
2.5	2.5	5	0.25
5	5	10	0.5
7.5	7.5	15	0.75
10	10	20	1
12.5	12.5	25	1.25
15	15	30	1.5
17.5	17.5	35	1.75
20	20	40	2
22.5	22.5	45	2.25
25	25	50	2.5
27.5	27.5	55	2.75
30	30	60	3

3.3.1.1. Teorik Olarak Damlacık Çapı ve Damlacıklar Arası Mesafe Hesaplanması

Mikroakışkan cihazlarda, makro sistemlerde olduğu gibi bir kontrol hacimde kütle korunumu ve kuvvet dengesi kullanarak hesaplamalar yapılabilir. Şekil 3.8’de gösterilen nozül genişliğine, kanal yüksekliğine ve L kanal uzunluğuna sahip x-kavşaklı cihazın 3. bölgesinde yapılan kütle dengesi aşağıda verilmiştir.

Aşağıdaki denklemde suyun hacminin, V_{su} , bulunabilmesi için toplam damlacık sayısı n ve damlacık çapı $D_{droplet}$ kullanılmıştır:

$$V_{su} = n \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_{droplet}}{2} \right)^3 \quad (9)$$

Benzer şekilde yağ hacmi, $V_{yağ}$, toplam hacimden suyun hacmi çıkarılarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

$$V_{yağ} = (L - nD_{droplet})wh + n(wD_{droplet}h) - V_{su} \quad (10)$$

Sıkıştırılmaz akışın olduğu bu sistemde kanal girişinde ve çıkışında kütle korunumu gereği aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$Q_{top,giriş} = Q_{su,giriş} + Q_{yağ,giriş} \quad (11)$$

$$Q_{top,çıkış} = Q_{su,çıkış} + Q_{yağ,çıkış} \quad (12)$$

$$Q_{top,giriş} = Q_{top,çıkış} \quad (13)$$

Eşitlik 13'teki toplam hacimsel akış hızı değişmemektedir. Süreklilik denklemi gereğince yağ ve suyun girişteki hacimsel akış hızları oranı, bu kontrol hacmi içinde bulunan su ve yağ akışları oranına aşağıda gösterildiği gibi eşit olmalıdır:

$$\frac{Q_{su,giriş}}{Q_{yağ,giriş}} = \frac{Q_{su,çıkış}}{Q_{yağ,çıkış}} \quad (14)$$

$$\frac{Q_{su,giriş}}{Q_{yağ,giriş}} = \frac{V_{su}}{V_{yağ}} \quad (15)$$

$$\frac{Q_{su,giriş}}{Q_{yağ,giriş}} = \frac{n^4 \pi \left(\frac{D_{droplet}}{2}\right)^3}{(L - nD_{droplet})wh + n(wD_{droplet}h) - V_{su}} = \frac{1}{20} \quad (16)$$

Eşitlik 16'da kontrol hacminde n tane bulunan damlacık çapının yağ ve su akış hızları ile olan ilişki verilmiştir. Bu ilişki kullanılarak **EK-8**'de verilen hesaplama (MATLAB) ile olası tüm boylardaki damlacıklar için kanala kaç damlacık sığacağı belirlenmesi için bir iterasyon yapılmıştır. Damlacık oluşumunda mevcut olan kılcal gerilim (σ/d) ve

viskoz kesme gerilimi $(\mu V/D_h)$ birbirini dengelemeye çalışmakta ve bu ilişkinin oluşan damlacığın boyutunu belirlediği bilinmektedir [35,39]. Bu kuvvet dengesini sağlayan iterasyon sonuçları da filtrelenerek teorik olarak kontrol hacmindeki akış hızına bağlı damlacık çapı tayin edilmiştir.

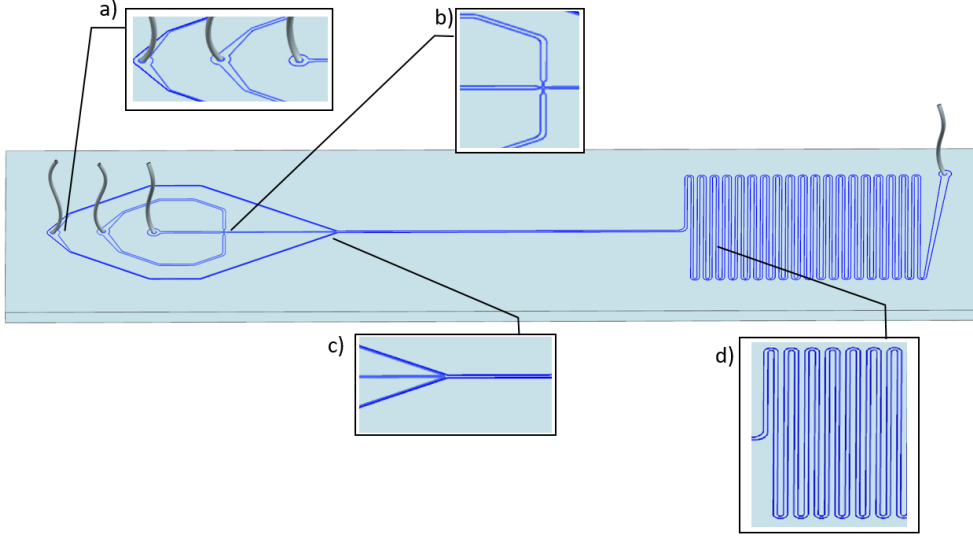
3.3.2. Serpentin Eklentili Tip-2 Mikroakışkan Cihazda Damlacık Üretimi

Damlacık oluşturulduktan sonra serpentinli bölge kullanılarak damlacığın sürekli fazda maruz kalma süresi arttırılmıştır. Şekil 9'da gösterilen x-kavşaklı Tip-2 cihaz tez danışmanı tarafından, Harvard Üniversitesi ve Massachusetts General Hospital kapsamında BioMEMS Resource Center ve Center for Engineering in Medicine isimli araştırma merkezlerinde başlayan ve 214M323 numaralı TÜBİTAK 1001 projesi ile tamamlanan çalışma kapsamında geliştirilmiştir.

Damlacıklar arası mesafenin ayarlanması ve düzenlenmesi için yardımcı bir yağ kanalı girişi kullanılmaktadır. Kullanılan bu yardımcı yağ kanalı sayesinde damlacıklar arasındaki mesafe istenilen boyuta getirilmesine çalışılmıştır. Tip-2 cihaz üzerinde damlacıklar arasındaki mesafenin ve damlacık çapının bu yardımcı yağ akışının etkisine bağlı olarak gösterdiği değişimler incelenmiştir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan serpentin eklentili Tip-2 cihaz Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Tip-2 cihaz dört ana bölmede değerlendirilecek şekilde geliştirilmiştir. Bu bölgeler kanal giriş bölgesi, damlacık oluşum bölgesi, yardımcı yağ kanalı bölgesi, serpentin ve kanal çıkış bölgesinden oluşacak şekildedir. Cihazda iki adet yağ girişi O₁ ve O₂, bir adet su girişi W ve bir adet çıkış kanalı bulunmaktadır. Bu yağ girişlerinden O₁ ve su girişi W damlacık oluşumu için kullanılmaktadır. Mavi renkle işaretlenmiş bölge, iki farklı yağ girişi ve su girişinin olduğu kısımları kapsayan, 0.75 mm'lik iğne uçlu zımba ile tygon tüp bağlantı delikleri açılmış bölgedir. Burada ilk besleme yağ ve su fazına sahip şırıngalardan gelen akış, kanalın yeşil renk ile gösterilen damlacık oluşum bölgesine aktarılmaktadır. Damlacık oluşturma deneyleri, bu bölgede oluşturulan damlacıkların özelliklerini gözlemlemek amaçlıdır. Tip-2 cihazda damlacık oluşturacak O₁:W oranı basit x-kavşaklı cihazda olduğu gibi 20:1 orandır. Cihazdaki ikinci yağ

kanalı girişi ise damlacıklar arası mesafe için kullanılmış olup bir sonraki konu başlığında açıklanmıştır.



Şekil 3.9. Tip-2 cihazın fonksiyonlarına göre isimlendirilmiş bölgeleri: a) Kanal girişi bölgesi b) Damlacık oluşum bölgesi, c) Yardımcı yağ kanalı bölgesi, d) Serpentin bölgesi

Tip-2 cihazda damlacık oluşturulması iki farklı nozül genişliğinde çalışılmıştır. Bu cihazlarda damlacıkların oluştuğu kavşak çıkış genişlikleri 50 μm ve 100 μm 'dir. Oluşturulan damlacık çaplarının bu iki farklı boyuttaki cihaz için karşılaştırılabilmesi açısından Tip-2 cihazda uygulananlara benzer akış hızı ($Q_{0,1}$ ve Q_w) çiftleri kullanılmıştır. Eş boyutlu damlacıklar arasındaki mesafenin açılabilmesi için eklenen yağ akışı ile damlacıklar arası mesafedeki değişimin incelenmesi üzerine yapılan çalışma kavşak çıkış genişliği 50 μm ve 100 μm olan cihazlarda yapılmıştır. Cihazlarda damlacığı oluşturan yağ ve su akış hızları sabit tutulup, yardımcı yağ akışı kademeli olarak artırılmıştır. Damlacık oluşturmada kullanılan akış hızı çiftleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 Tip-2 Cihazda Kullanılan Akış Hızı Çiftleri

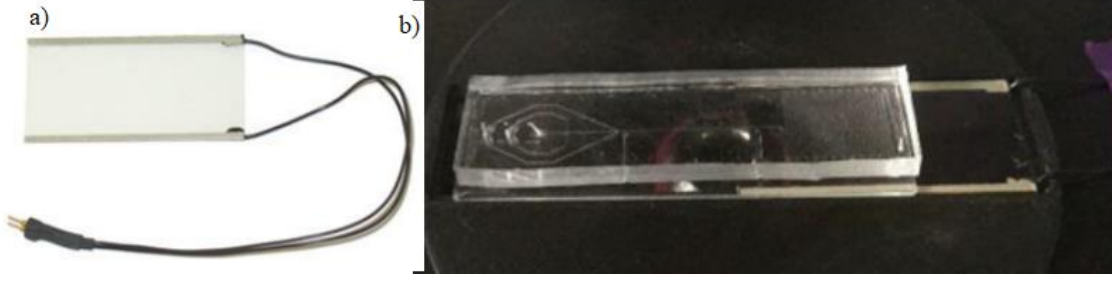
X-kavşak çıkış Genişliği μm	Yağ Akış Hızı $Q_{O,1}$ $\mu\text{l}/\text{min}$	Su Akış Hızı Q_w $\mu\text{l}/\text{min}$
50	8	0,4
100	8	0,4
100	16	0,8

3.4. Damlacıklar Arası Mesafe Optimizasyonu

Tip-2 cihazın Tip-1 cihazdan farkı damlacıklar arası mesafenin ikinci bir yardımcı yağ kanalı kullanılarak kontrol edilebilir olmasıdır. Bu yardımcı kanal ile, Tip-2 cihazın serpentin bölgesinde oluşabilecek kayıplar nedeniyle damlacıkların birbirlerine yaklaşması ve damlacıkların birbirine değip birleşmelerinin engellenmesi amaçlanmıştır. Damlacık oluşum bölgesinden gelen damlacıklar arası mesafenin artışı, yardımcı yağ kanalındaki akış hızının artırılması ile gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada damlacık oluşumu için Çizelge 3.5'te verilen akış hızları kullanılıp, farklı yardımcı yağ akışları ile damlacık çapı ve damlacıklar arası mesafe değişiklikleri incelenmiştir.

3.5. Damlacık Çapı Küçültme Çalışmaları

Damlacık çapı küçültme çalışmaları Tip-2 cihazlarda serpentin kısmının altına şeffaf bir ısıtıcı eklenerek gerçekleştirilmiştir. Cihazda serpentin girişi ve kanal çıkışı arasındaki bölgede Şekil 3.10'daki ITO (indium-tin-oxide, indiyum-kalay-oksit) ısıtıcı ve iki adet ısılcift entegre edilerek hem oda sıcaklığında hem de 40 °C sıcaklıkta damlacık küçülme deneyleri yapılmıştır.



Şekil 3.10. a) ITO (indium-tin-oxide, indiyum-kalay-oksit) ısıtıcı b) Mikroskop üzerine yerleştirilmiş Tip-2 mikroakışkan cihaz ve ITO ısıtıcı

25 °C sıcaklıkta, Çizelge 3.5'teki akış hızları kullanılarak damlacık oluşum bölgesinde oluşturulan damlacıklar, yardımcı yağ kanalı bölgesinden ilerledikten sonra ITO ısıtıcı entegreli serpentin bölgesine ulaşmaktadır. Serpentin bölümünde damlacık küçülme miktarının incelenebilmesi için damlacıklar hem ısıtılarak hem de ısıtılmadan boyutlarının ölçümleri alınıp Çizelge 3.5'de verilen bölgelere göre karşılaştırmaları yapılmıştır.

Çizelge 3.5. X-kavşaklı Tip-2 Cihazın Damlacık Küçültme Çalışmasında Kullanılan Bölgeleri

1.Bölge	Damlacık Oluşum Bölgesi
2.Bölge	Serpentin girişi (ITO ısıtıcısı başlangıcı)
3.Bölge	1. Serpentin Kanalı
4.Bölge	3. Serpentin Kanalı
5.Bölge	5. Serpentin Kanalı
6.Bölge	7. Serpentin Kanalı
7.Bölge	10. Serpentin Kanalı
8.Bölge	12. Serpentin Kanalı
9.Bölge	15. Serpentin Kanalı
10.Bölge	20. Serpentin Kanalı

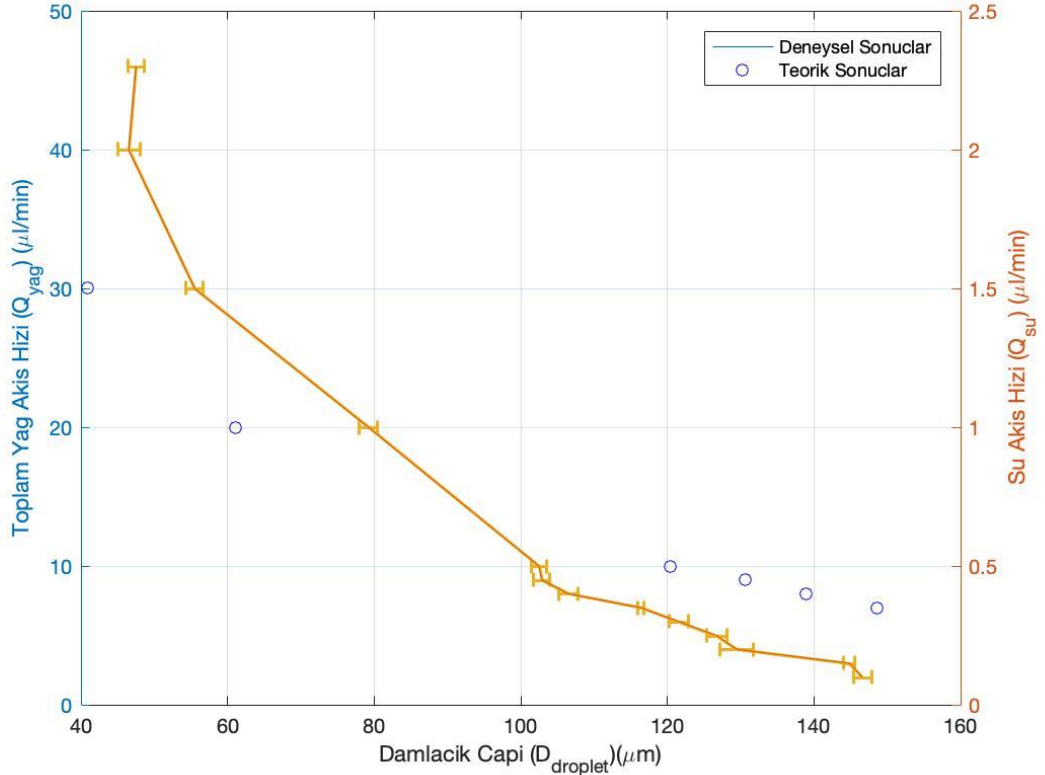
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. X-kavşaklı Cihazlarda Damlacık Çapı Parametre İncelenmesi

4.1.1. 25 µm Nozül Genişliğine Sahip Mikroakışkan Cihazda Akış Hızına Bağlı Damlacık Çap Değişimi

Tip-1 nozül çıkışı 25 µm olan cihazda damlacık elde edilmesi mümkün olan en düşük akış hızı çifti 2 µl/min yağ ve 0,1 µl/min su olmuştur. Bu akış hızı çiftiyle oluşturulan damlacık en büyük çapa ($146,61 \pm 6,32 \times 10^{-3}$ µm) sahiptir. Jet akış öncesi damlacık üretilen maksimum akış hızı ise 46 µl/min yağ ve 2,3 µl/min su akış hızı çiftiyle elde edilebilmiştir. Bu akış hızı çifti ile oluşturulan damlacık ise 25 µm nozül genişliğine sahip cihazda elde edilebilen en küçük çapa sahip ($47,49 \pm 2,44 \times 10^{-1}$) µm damlacık olmuştur.

25 µm nozül genişliğine sahip mikroakışkan cihazda teorik damlacık çapı **EK 9**'da verilen süreklilik denkliği ve kuvvet dengesi kullanılarak MATLAB ile hesaplanmıştır.



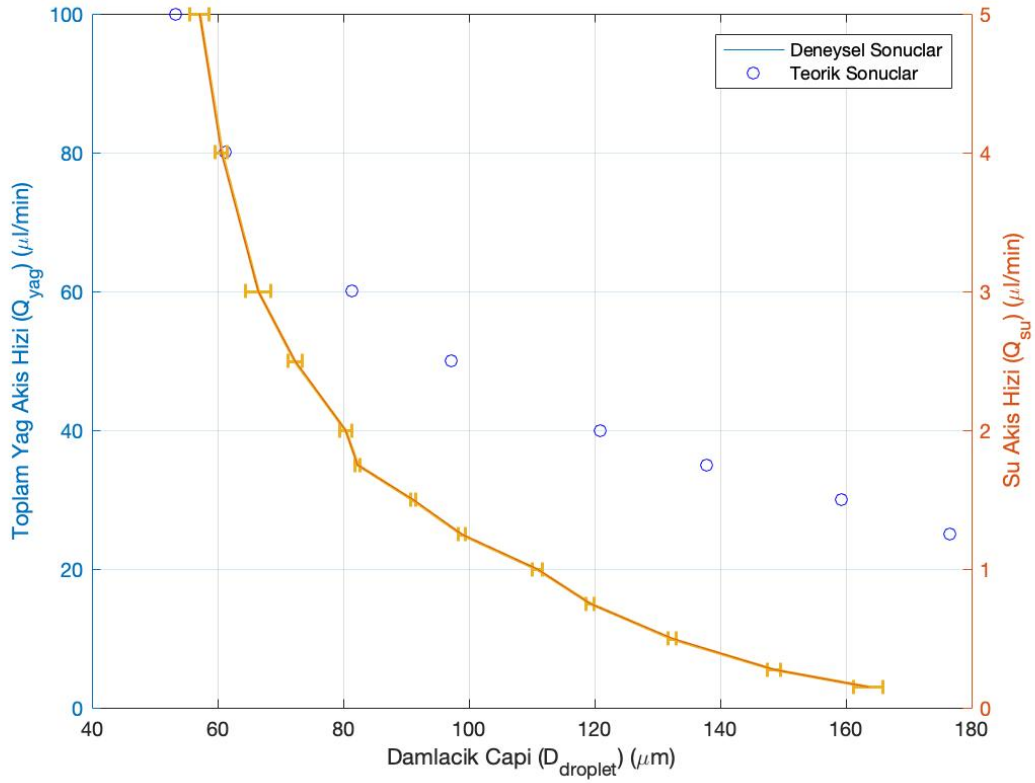
Şekil 4.11. 25 µm nozül genişliğine sahip mikroakışkan cihazda akış hızına bağlı damlacık çap değişimi

Şekil 4.11'de elde edilen teorik ve deneysel damlacık çapının yağ ve su akış hızı çiftleriyle olan ilişkisi verilmiştir. Yağ ve su akış hızı çiftlerinde artan akış hızı kılcal sayının büyümesine neden olmuştur. Artan kılcal sayı ile damlacığın oluşmasında etki eden kuvvetlerin dengesi, daha küçük çapa sahip damlacıkların elde edilmesiyle kurulmuştur. Bu artış damlacık çapının küçülmesine doğrudan etki etmiştir. Ayrıca damlacık çapının sapma değeri en fazla 1,3 µm olduğunda bu değişimin kararlı olduğu söylenebilir.

4.1.2. 50 µm Nozül Genişliğine Sahip Mikroakışkan Cihazda Akış Hızına Bağlı Damlacık Çap Değişimi

X-kavşak çıkışı 50 µm olan cihazda damlacık elde edilmesi mümkün olan en düşük akış hızı çifti 3 µl/min yağ ve 0,15 µl/min su olmuştur. Bu akış hızı çifti ile oluşturulan damlacık en büyük çapa ($163,6 \pm 9,05 \times 10^{-3}$ µm) sahiptir. Jet akış öncesi damlacık üretilen maksimum akış hızı 100 µl/min yağ ve 5 µl/min su olarak elde edilmiştir. Bu akış hızı çifti ile 50 µm nozül genişliğine sahip cihazda elde edilebilen en küçük damlacık çapı $57,14 \pm 5,88 \times 10^{-3}$ µm olmuştur.

50 µm nozül genişliğine sahip mikroakışkan cihazda teorik damlacık çapı süreklilik denkliği ve kuvvet dengesi kullanılarak MATLAB'de hesaplanmıştır (EK 10).



Şekil 4.12. Tip-1 50 μm nozül genişliğine sahip mikroakışkan cihazda akış hızına bağlı damlacık çap değişimi

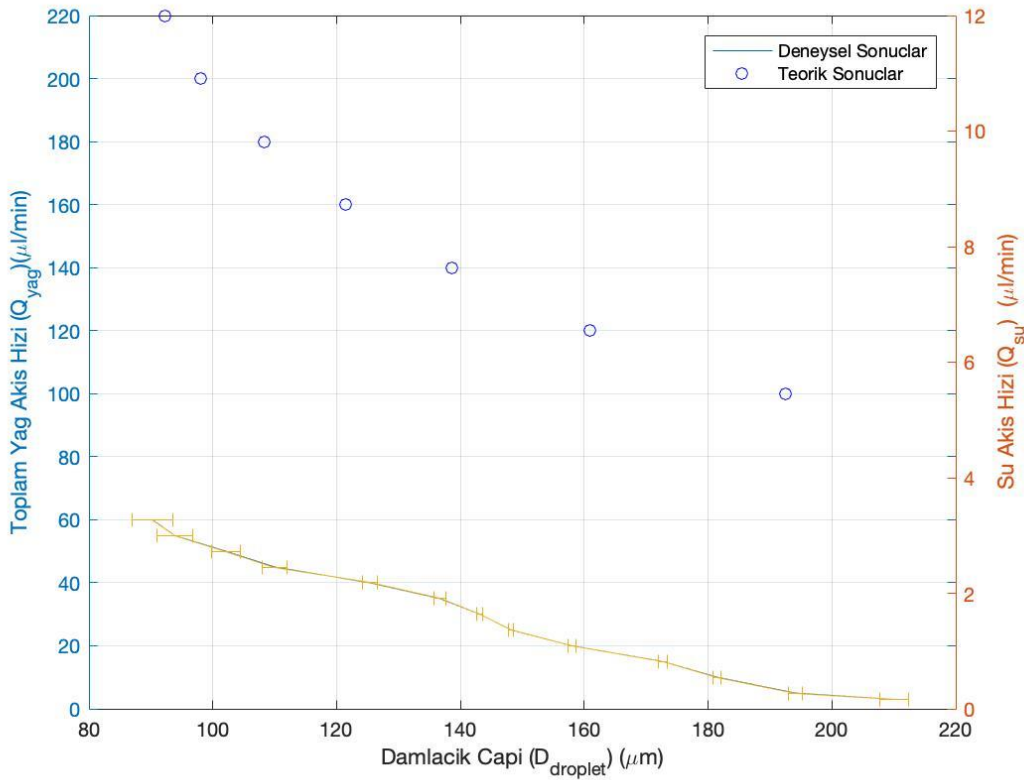
Şekil 4.12'de elde edilen teorik ve deneysel damlacık çapının, yağ ve su akış hızı çiftleriyle olan ilişkisi verilmiştir. Görüldüğü gibi teorik ve deneysel damlacık çapının küçülmesi, artan yağ ve su akış hızı çiftlerinin etkisiyle meydana gelmiştir. Damlacık çapı akış hızı arasındaki ilişki diğer cihaz nozül genişliğine sahip cihazlarda olduğu gibi teorik değerlerle paralel bir davranış göstermiştir. Ayrıca en fazla 2,33 μm büyüklüğünde olan damlacık çapı sapma değerlerinden de gözlendiği şekliyle bu değişimin kararlı olduğu söylenebilir.

4.1.3. 100 μm Nozül Genişliğine Sahip Mikroakışkan Cihazda Akış Hızına Bağlı Damlacık Çap Değişimi

X-kavşak çıkışı 100 μm olan cihazda damlacık elde edilmesi mümkün olan en düşük akış hızı çifti 3 $\mu l/min$ yağ ve 0,15 $\mu l/min$ su olmuştur. Bu akış hızı çifti ile oluşturulan damlacık en büyük çapa ($210,06 \pm 7,6 \times 10^{-3} \mu m$) sahiptir. Jet akış öncesi damlacık

üretilebilen maksimum akış hızı 60 $\mu\text{l}/\text{min}$ yağ ve 3 $\mu\text{l}/\text{min}$ su olarak elde edilmiştir. Bu akış hızı çifti ile oluşturulan damlacık ise 100 μm nozül genişliğine sahip cihazda elde edilebilen en küçük çapa sahip ($90,24 \pm 2,44 \times 10^{-3} \mu\text{m}$) damlacık olmuştur.

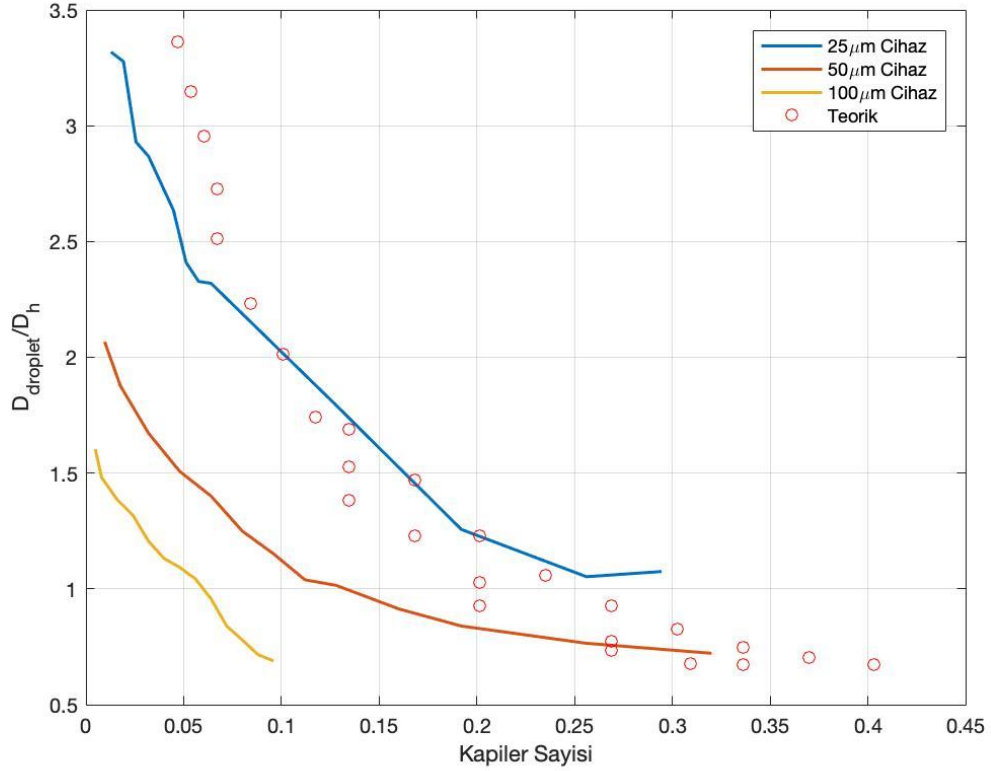
100 μm nozül genişliğine sahip mikroakışkan cihazda teorik damlacık çapı süreklilik denkliği ve kuvvet dengesi kullanılarak MATLAB ile hesaplanmıştır (EK 11).



Şekil 4.13. Tip-1 100 μm nozül genişliğine sahip mikroakışkan cihazda akış hızına bağlı damlacık çap değişimi

Şekil 4.13'te görüldüğü gibi damlacık çapı yağ ve su akış hızına artan akış hızı çiftlerinde damlacık çapının küçülmesi şeklinde açıklanmaktadır. Damlacık çapı boyu-akış hızı arasındaki ilişki diğer cihaz nozül genişliğine sahip cihazlarda olduğu gibi teorik değerlerle paralel bir davranış göstermiştir.

4.1.4. Kavşak Çıkış Genişliği 25 µm, 50 µm, 100 µm olan Mikroakışkan Cihazlarda Damlacık Oluşturma Parametrelerinin Karşılaştırılması



Şekil 4.14. Farklı kavşak çıkış (nozül) genişliğine sahip Tip-1 cihazların deneysel ve teorik olarak kılcal sayı ve damlacık çapı arasındaki ilişki

Damlacık çapının eşdeğer nozül genişliğine oranı ve kılcal sayı, farklı kavşak çıkış genişliğine sahip üç cihaz için cihaz boyutundan bağımsız olarak aynı davranışı göstermiştir. Kılcal sayı arttıkça damlacık oluşum bölgesindeki damlacığa etki eden kayma gerilimi artmaktadır. Bu artışın da kesme kuvveti etkisinden damlacık çapını küçülttüğü bilinmektedir [47]. Şekil 4.14 değerlendirildiğinde, bu çalışma kapsamında elde edilen deneysel ve teorik damlacık çapı ve akış hızları arasındaki ilişki üç cihaz için ortak bir grafikte paylaşılmıştır. Elde edilen veriler, üç cihazın birlikte kıyaslanabilmesi için boyutsuz sayılarla ifade edilmiştir. Teorik hesaplamada sadece damlacığı oluşturan temel kuvvetler dahil edilmiştir. Kullanılan matematiksel modelde sistemdeki atalet kuvvetleri, sürtünme kuvvetleri ve benzerleri dahil edilmemiştir. Teorik olarak elde edilen ilişkinin benzerleri her üç cihaz için de deneysel olarak elde edilebilmiştir. Tip-1 cihazın nozül genişliği azaldıkça, yani sisteme giriş çıkış yapan akışkan miktarı ve

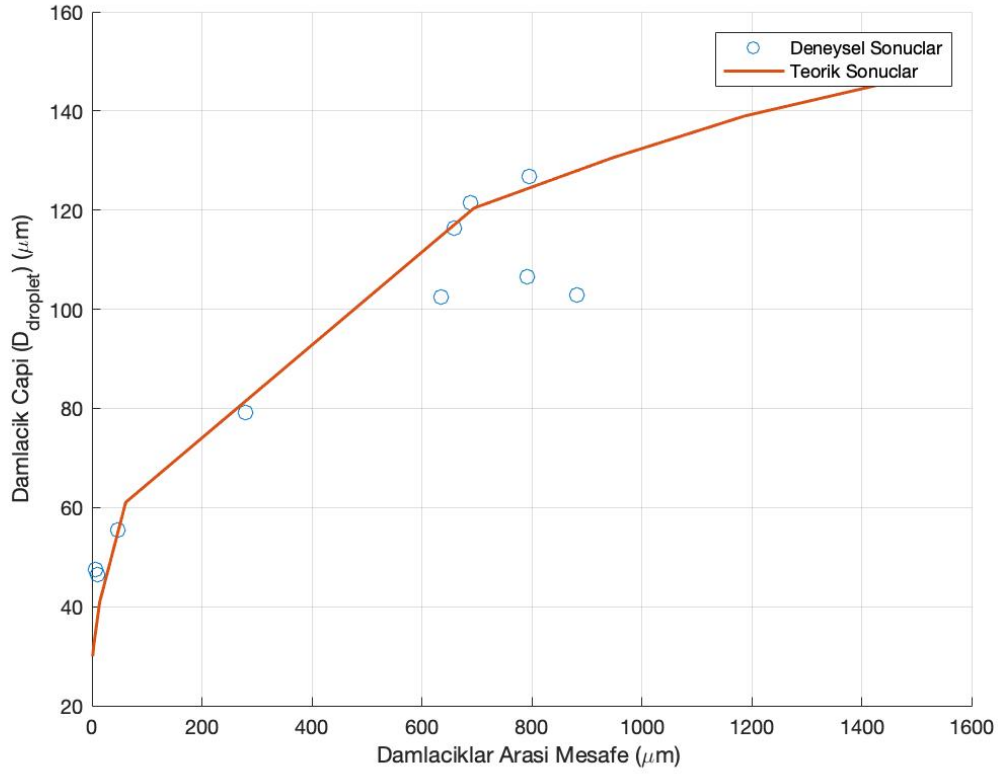
sürtünmeye tabi yüzey alan azaldıkça, teorik verilere yaklaşıldığı gözlenmiştir. Bu durum, literatürde [56] olduğu gibi nozül genişliği arttıkça sisteme etki eden ve teorik hesaplamada ihmal edilen kuvvetlerin artmasıyla açıklanmaktadır.

4.1.5. X-kavşaklı Mikroakışkan Cihazlarda Damlacıklar Arası Mesafe İncelemesi

25 μm , 50 μm ve 100 μm kavşak nozül genişliğine sahip olan cihazlarda yapılan çalışmalarda akış hızına bağlı olarak damlacıklar arası mesafenin kontrol edilebildiği gösterilmiştir. Kütlenin korunumu yasasına göre, yağ ve su oranı sabit tutularak oluşturulan damlacıkların arasındaki mesafenin akış hızı arttırıldıkça artması beklenmektedir. Farklı boyuttaki cihazlarda bu artışın nasıl olduğu, viskoz ve kılcal kuvvetlerin etkisi ve sonuçları deneysel olarak incelenmiştir ve aşağıda açıklanmıştır.

4.1.5.1. 25 μm Nozül Genişliğine Sahip Mikroakışkan Cihazda Damlacık Çapına Bağlı Damlacıklar Arası Mesafe İlişkisi

25 μm nozül genişliğine sahip mikroakışkan x-kavşaklı cihazda oluşturulan tüm damlacıkların kendi aralarında oluşturdukları damlacıklar arası mesafe Şekil 4.15'te verilmiştir.

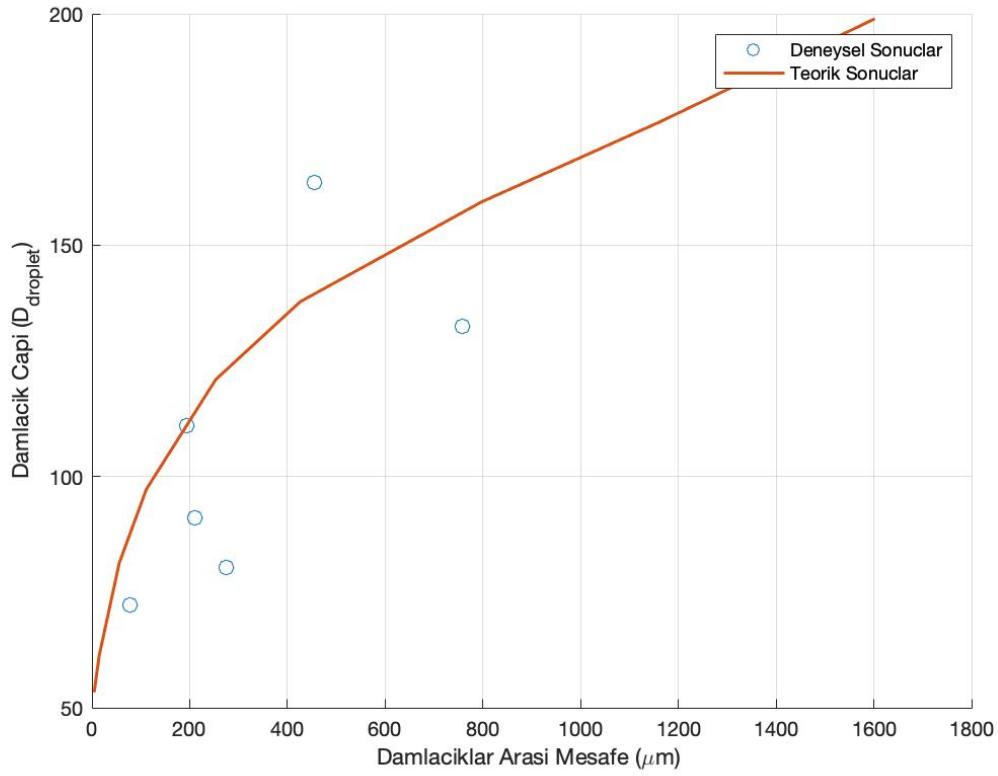


Şekil 4.15. Tip-1 25 µm nozül genişliğine sahip mikroakışkan cihazda oluşturulan damlacık çapı ve damlacıklar arası mesafe ilişkisi

EK 9'da verilen MATLAB kodu kullanılarak elde edilen teorik damlacıklar mesafe incelemesinde sistemdeki kütle korunumu kanunu kullanılmıştır. Şekil 4.15'te gözlemlendiği gibi damlacıklar arası mesafenin, damlacık çapına göre değişimi süreklilik denklemi ile hesaplanan teorik değerler ile uyumlu bir davranış göstermektedir.

4.1.5.2. 50 µm Nozül Genişliğine Sahip Mikroakışkan Cihazda Damlacık Çapına Bağlı Damlacıklar Arası Mesafe İlişkisi

50 µm nozül genişliğine sahip mikroakışkan x-kavşaklı cihazda oluşturulan tüm damlacıkların kendi aralarında oluşturdukları damlacıklar arası mesafe Şekil 4.16'da verilmiştir.

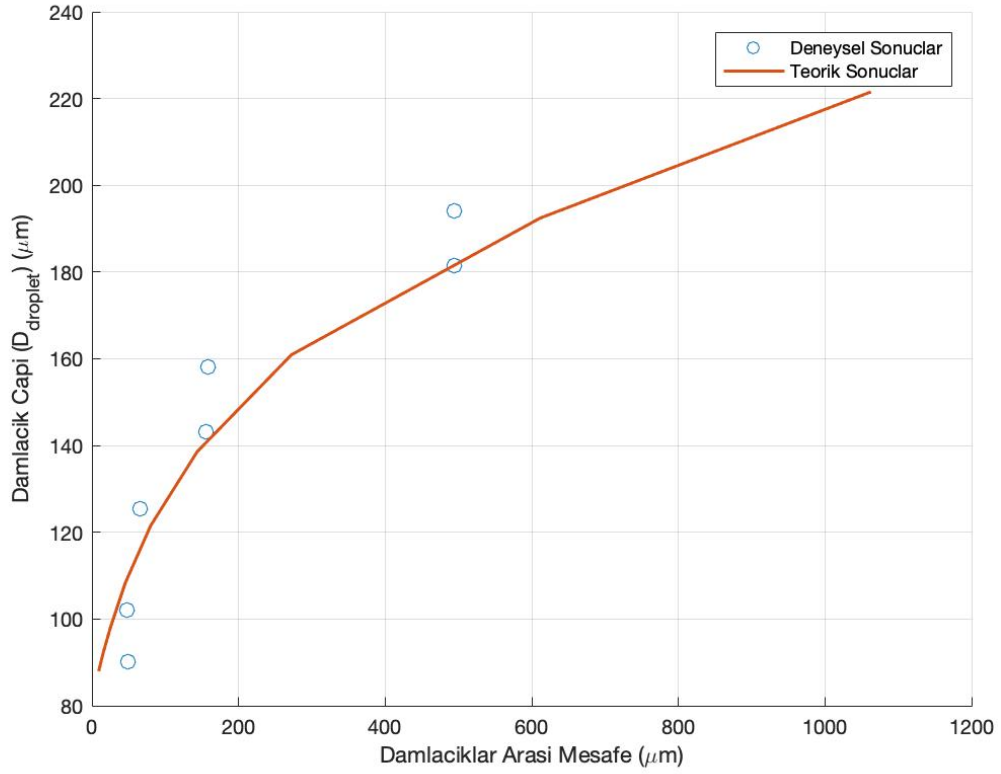


Şekil 4.16. Tip-1 50 µm Nozül Genişliğine Sahip Mikroakışkan Cihazda Oluşturulan Damlacık Çapı ve Damlacıklar Arası Mesafe İlişkisi

EK 10' da verilen MATLAB kodu kullanılarak teorik olarak elde edilen damlacıklar arası mesafe incelemesinde sistemdeki kütle korunumu kanunu kullanılmıştır. Şekil 4.16'da gözlemlendiği gibi damlacıklar arası mesafenin, damlacık çapına göre değişimi süreklilik denklemi ile hesaplanan teorik değerler ile uyumlu bir davranış göstermektedir.

4.1.5.3. 100 µm Nozül Genişliğine Sahip Mikroakışkan Cihazda Damlacık Çapına Bağlı Damlacıklar Arası Mesafe İlişkisi

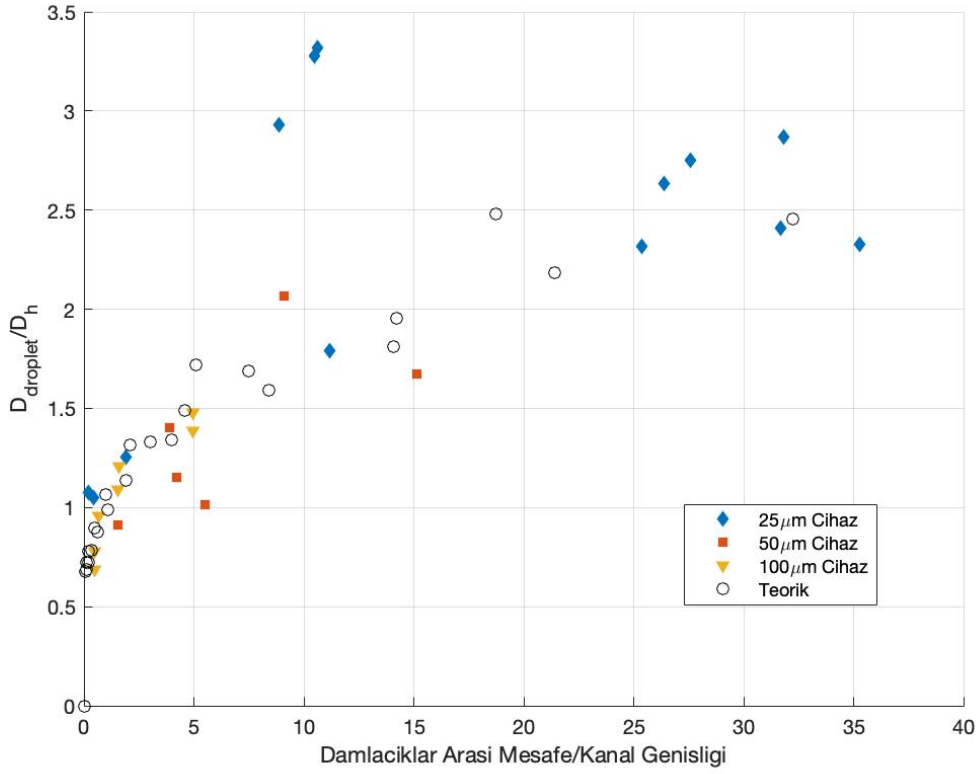
100 µm nozül genişliğine sahip mikroakışkan x-kavşaklı cihazda oluşturulan tüm damlacıkların kendi aralarında oluşturdukları damlacıklar arası mesafe Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.17. Tip-1 100 µm nozül genişliğine sahip mikroakışkan cihazda oluşturulan damlacık çapı ve damlacıklar arası mesafe ilişkisi

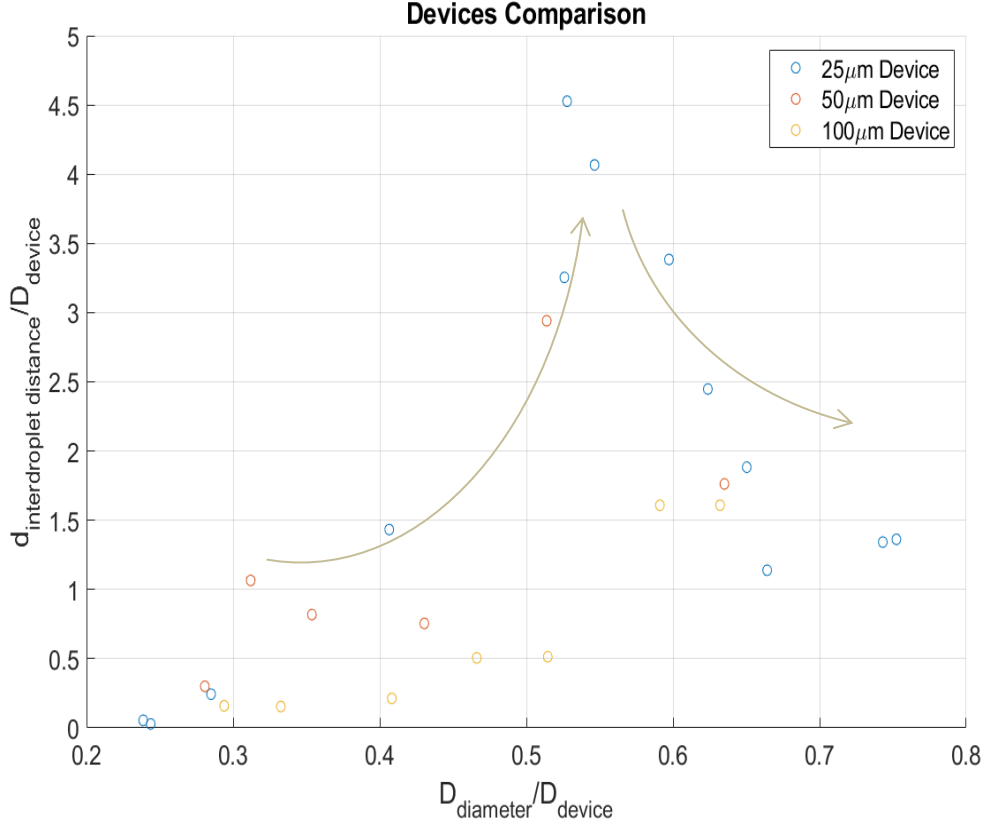
EK 11'de verilen MATLAB kodu kullanılarak elde edilen teorik damlacıklar mesafe incelemesinde sistemdeki kütle korunumu kanunu kullanılmıştır. Şekil 4.17'de gözlemlendiği gibi damlacıklar arası mesafenin, damlacık çapına göre değişimi süreklilik denklemi ile hesaplanan teorik değerler ile uyumlu bir davranış göstermektedir.

25 µm, 50 µm ve 100 µm nozül genişliğine sahip cihazlarda oluşturulan damlacıkların boyutları ve damlacıklar arası mesafesi ile ilişkisi Şekil 4.15, 4.16 ve 4.17'de sunulan grafiklerde verilmiştir. Bu grafiklerde belirli ilişkiler tespit edilmiş olsa da, bu ilişkilerin her üç boyuttaki cihaz için farklı olduğu gözlenmiştir. Bu sebeple, cihazlarda elde edilen bu verilerin birbirleri ile kıyaslanabilmesi için boyutsuz sayılardan yararlanılmıştır ve şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.18. Farklı nozül genişliğine sahip Tip-1 cihazlarda teorik ve deneysel damlacık çapı ve damlacıklar arası mesafe arasındaki ilişki

Şekil 4.18’de görülen ilişkiye göre damlacık çapı ve damlacıklar arasındaki mesafe ilişkisi deneysel olarak gösterilmiştir. Ayrıca süreklilik denklemi kullanılarak bu ilişki incelenmiştir. Görüldüğü üzere elde edilen deneysel veriler süreklilik denklemi ile uyumlu bir davranış göstermektedir. Bu ilişki her cihaz için aynı eğilim çizgisi üzerinde değişim göstermiştir. Damlacık çapı ve damlacıklar arası mesafe arttıkça elde edilen verilerin eğilim çizgisi üzerindeki dağılımı kritik bir $D_{\text{droplet}}/D_h \sim 2,5$ değerine kadar teori ile uyumlu davranış göstermiştir. Bu kritik değerden sonra özellikle 25 μm nozül genişliğine sahip cihazda teorik elde edilen verilere göre aykırı olarak damlacıklar arası mesafenin azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 4.19. 25 μm , 50 μm , 100 μm kanal genişliğine sahip Tip-1 cihazlarda damlacık boyutu ve damlacıklar arası mesafe arasındaki ilişki

Şekil 4.19’da görülen ilişkiye göre Tip-1 cihazlarda boyuttan bağımsız olarak üç cihaz için de akış hızının azalması ile damlacık çapının sürekli arttığı; ancak damlacıklar arası mesafenin kritik bir $D_{\text{droplet}}/D_{\text{device}} \sim 0,55$ değerine kadar arttığı ve akabinde azaldığı görülmüştür. Fiziksel olarak değerlendirildiğinde $D_{\text{droplet}}/D_{\text{device}} \sim 0,55$ değeri, damlacık çapının kanal genişliğinin yarısını kaplaması olarak düşünülebilir. Damlacık büyüdükçe kanal içinde kaplağı kesit alanın kanalın kesit alanına oranı da artmaktadır. Damlacık yüzey alanının artması akış karşıtı bir direnç oluşturarak damlacık hızının yağa göre hızının azalmasına sebep olmaktadır. Bu da damlacıklar arası mesafeye etki eden baskın kuvvetlerin değişmesine sebep olmaktadır. Ayrıca, damlacık yüzeyine etki eden kuvvetler, damlacık yüzeyi kanal duvarlarına yaklaştıkça, sınır katmanı (boundary layer) akış hızından etkileniyor olabilir. Damlacığı sürükleyen yağ akışının da bu etkiyle azaldığı ve damlacıklar arası mesafeyi azalttığı söylenebilir.

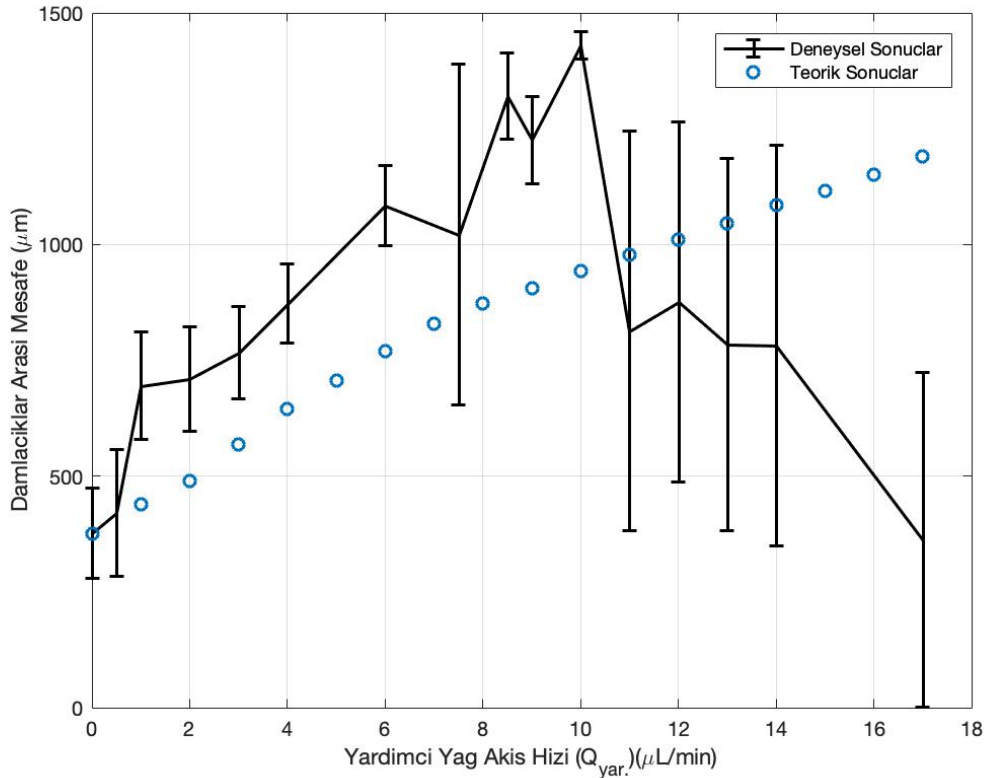
4.2. Serpentinli Cihazlarda Elde Edilen Sonuçlar

4.2.1. Serpentinli Cihazlarda Yardımcı Yağ Akışı Etkisi

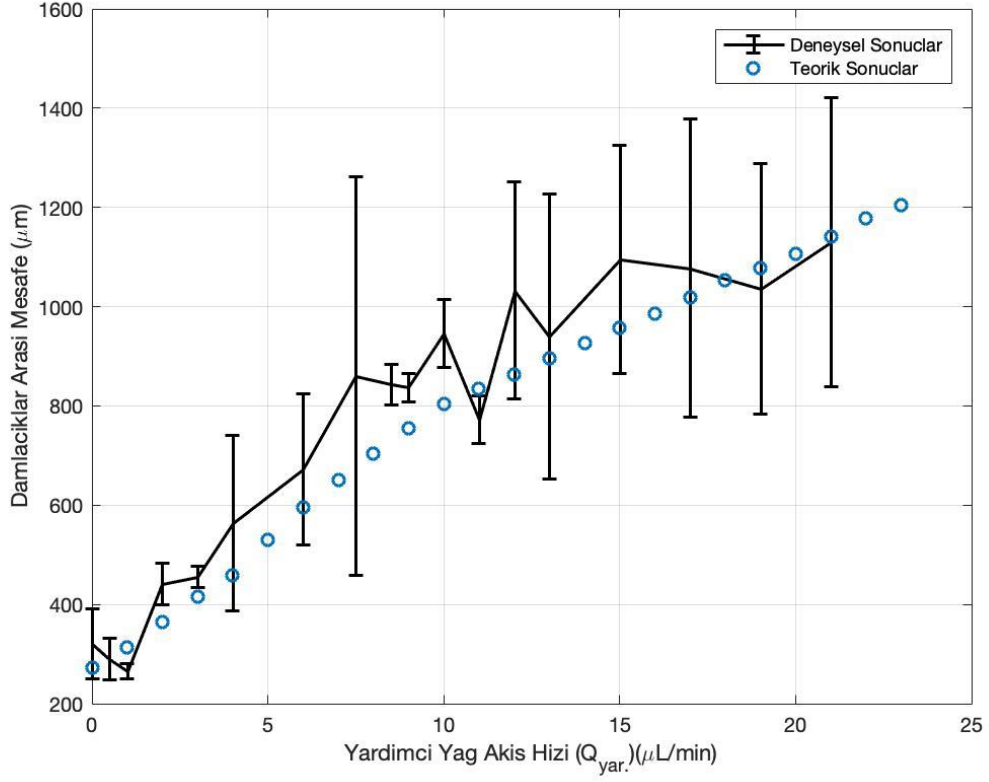
Bu deneysel çalışmada sisteme bir yardımcı yağ akışı eklenerek damlacıklar arası mesafenin değiştirilmesi amaçlanmıştır. Damlacıklar sabit su ve yağ akış hızı çiftinde (sırasıyla 0,4 $\mu\text{l}/\text{min}$ -8 $\mu\text{l}/\text{min}$ su-yağ akış hızları ve 0,8 $\mu\text{l}/\text{min}$ -16 $\mu\text{l}/\text{min}$ su-yağ akış hızları) oluşturulmuştur. Böylece damlacıklar arası mesafeyi etkileyen sistemdeki tek değişken, yardımcı akış hızı olarak belirlenmiştir. Yardımcı akış hızının artırılması ile damlacıklar arası mesafenin artırılması beklenmektedir.

4.2.1.1. Serpentinli Cihazlarda Damlacıklar Arası Mesafe ve Yardımcı Yağ Akış Hızı Arasındaki İlişki

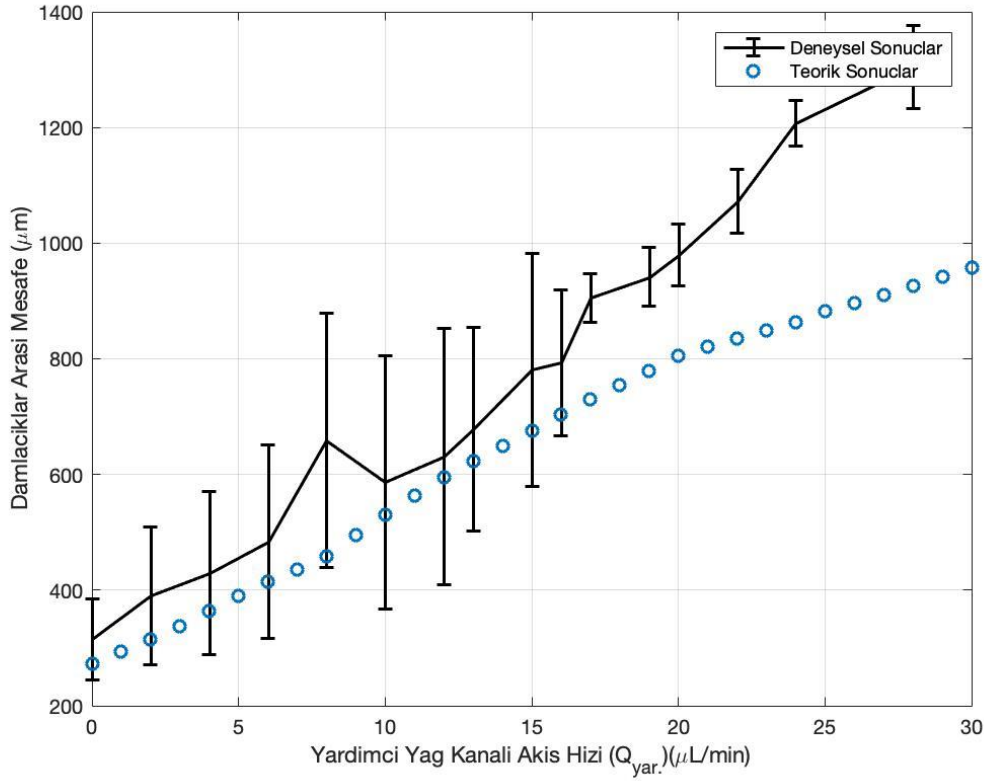
Şekil 4.19, 4.20 ve 4.21’de farklı nozül genişliğine sahip iki cihazın yardımcı akış bölgesindeki damlacıklar arası mesafenin yardımcı yağ akışına göre değişimi verilmiştir.



Şekil 4.20. 50 μm nozül genişliğine sahip serpentinli mikroakışkan cihazda sırasıyla 0,4 $\mu\text{l}/\text{min}$ - 8 $\mu\text{l}/\text{min}$ su-yağ akış hızlarıyla oluşturulan damlacıkların yardımcı yağ akışı hızı ve damlacıklar arası mesafe ilişkisi



Şekil 4.21. 100 μm nozül genişliğine sahip serpentinli mikroakışkan cihazda sırasıyla 0,4 $\mu\text{L}/\text{min}$ - 8 $\mu\text{L}/\text{min}$ su-yağ akış hızlarıyla oluşturulan damlacıkların yardımcı yağ akışı hızı ve damlacıklar arası mesafe ilişkisi

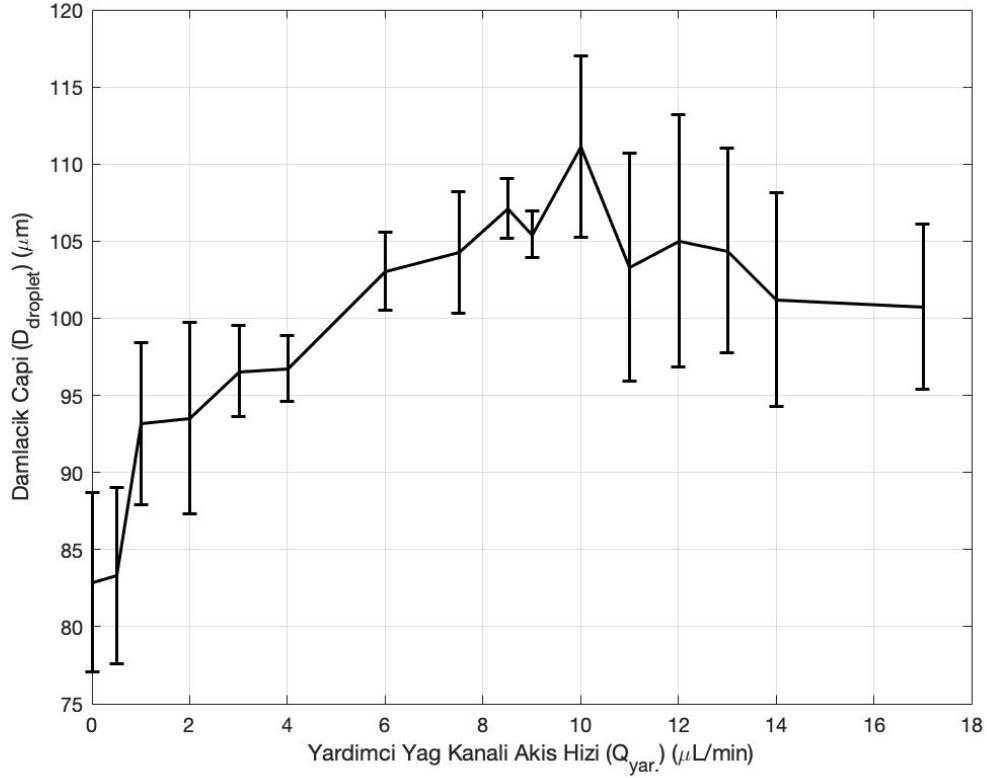


Şekil 4.22. 100 µm nozül genişliğine sahip serpentinli mikroakışkan cihazda sırasıyla 0,8 µl/min - 16 µl/min su-yağ akış hızlarıyla oluşturulan damlacıkların yardımcı yağ akışı hızı ve damlacıklar arası mesafe ilişkisi

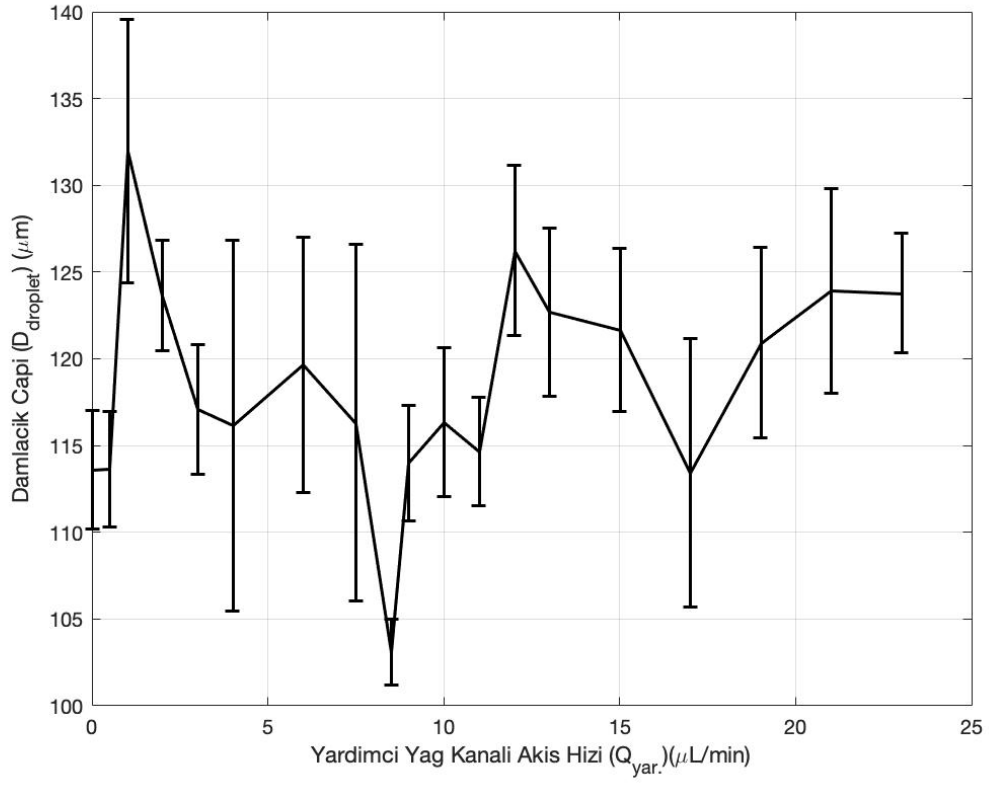
Şekil 4.19, 4.20 ve 4.21’de görüldüğü üzere her üç konfigürasyon için de hedeflendiği gibi damlacıklar arası mesafenin değiştirilebildiği gözlenmiştir. Kavşak çıkış genişliğinin 100 µm olduğu cihazda 50 µm olan cihaza göre damlacıklar arası mesafe artışı daha kararlı bir davranış göstermiştir; damlacık çapındaki sapmanın da daha düşük olduğu belirlenmiştir. Üç grafik için de benzer olarak belirli bir yardımcı akış hızından daha yüksek hızlarda ölçümlerdeki farklılığın arttığı veya azaldığı gözlenmiştir. Bu durum yardımcı yağ akış hızının belirli bir değerden sonra sistemin kararlılığını arttırdığı veya azalttığı yönünde değerlendirilebilir. Hatta 50 µm nozül genişliğine sahip cihazda belirli bir sınır değerinin üzerinde karşılaşılan bu kararsızlığın, damlacıklar arası mesafenin azalmasına sebep olduğu gözlenmiştir. Bu kararsızlığın damlacık çapında bir etkisi olup olmadığı bir sonraki başlık altında sunulmuştur.

4.2.1.2. Tip-2 Cihazlarda Damlacık Çapı ve Yardımcı Yağ Akış Hızı Arasındaki İlişki

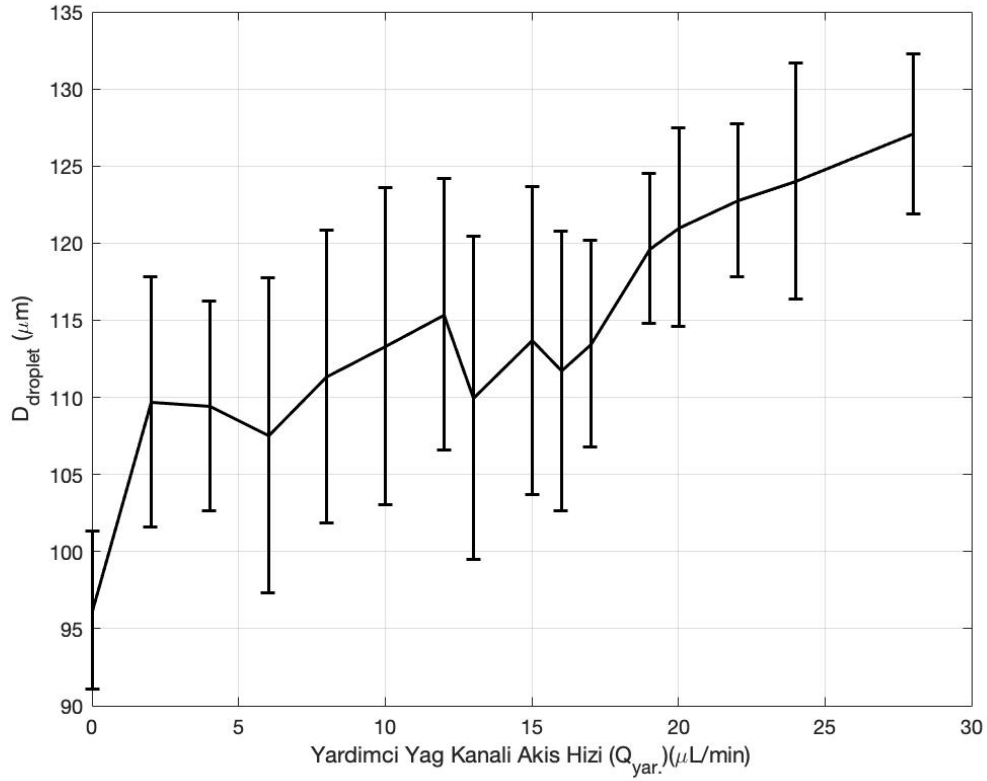
Yardımcı yağ akış hızının kullanıldığı Tip-2 cihazda damlacıklar arası mesafe ile damlacık çapı arasındaki ilişki aşağıdaki Şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4.23. Kavşak çıkış genişliği 50 μm olan Tip-2 mikroakışkan cihazda sırasıyla 0,4 $\mu\text{l}/\text{min}$ – 8 $\mu\text{l}/\text{min}$ su-yağ akış hızlarıyla oluşturulan damlacıkların yardımcı yağ akışı hızı ve damlacık çapı ilişkisi



Şekil 4.24. Kavşak çıkış genişliği 100 μm olan Tip-2 mikroakışkan cihazda sırasıyla 0,4 $\mu\text{l}/\text{min}$ - 8 $\mu\text{l}/\text{min}$ su-yağ akış hızlarıyla oluşturulan damlacıkların yardımcı yağ akışı hızı ve damlacık çapı ilişkisi



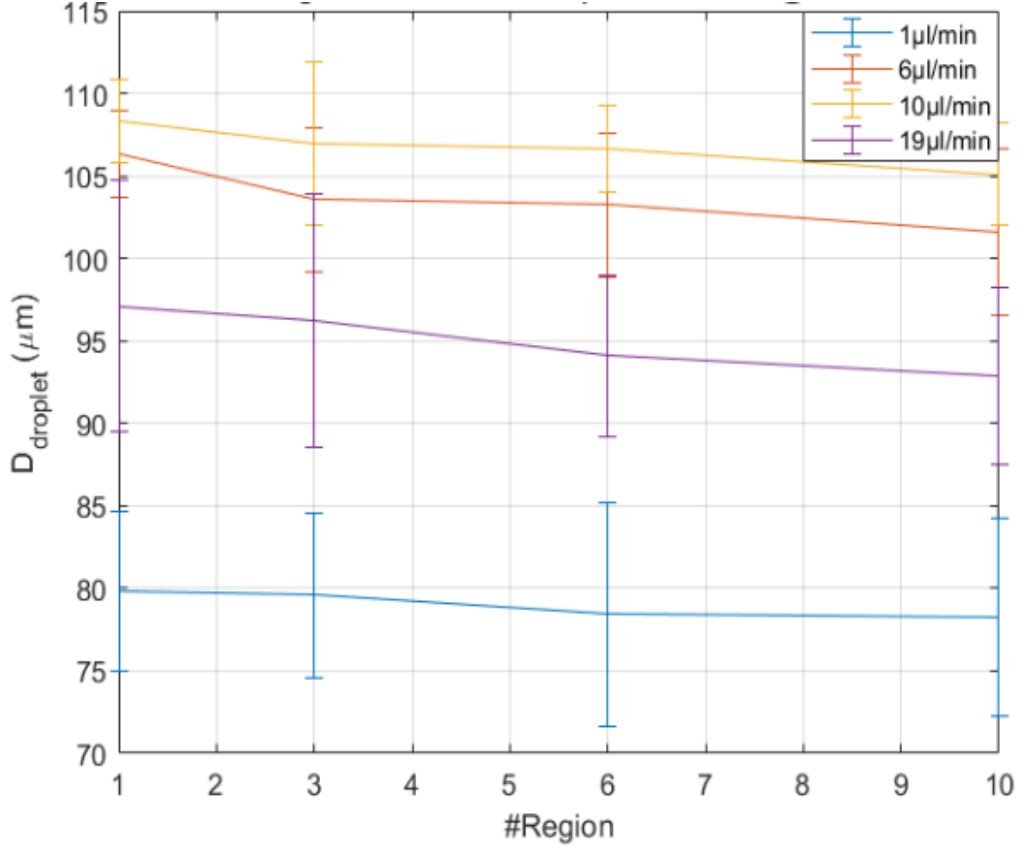
Şekil 4.25. Kavşak genişliği 100 μm olan Tip-2 mikroakışkan cihazda sırasıyla 0,8 $\mu\text{l}/\text{min}$ - 16 $\mu\text{l}/\text{min}$ su-yağ akış hızlarıyla oluşturulan damlacıkların yardımcı yağ akışı hızı ve damlacık çapı ilişkisi

Şekil 4.22, 4.23 ve 4.24'te sabit yağ ve su akışıyla oluşturulan damlacık çapının değişen yardımcı yağ akış hızına göre değişimi verilmiştir. Her üç konfigürasyon için de elde edilen veriler damlacığın oluşum bölgesinden alınmıştır. Damlacığı oluşturan yağ-su akış hızı çiftleri sabit tutulduğunda x-kavşaklı Tip-1_cihazlardan elde edilen verilere göre damlacık çapının sabit kalması beklenmekteydi. Sisteme eklenen yardımcı yağ akış hızıyla damlacık çapının değiştiği ve hata çubuklarının genişlediği gözlenmiştir. Bu durum yardımcı yağ akışının damlacık oluşum bölgesindeki damlacık oluşum dinamiğini ek kanal ve kavşak arasındaki basınç düşüşüyle etkilediği şeklinde açıklanabilir.

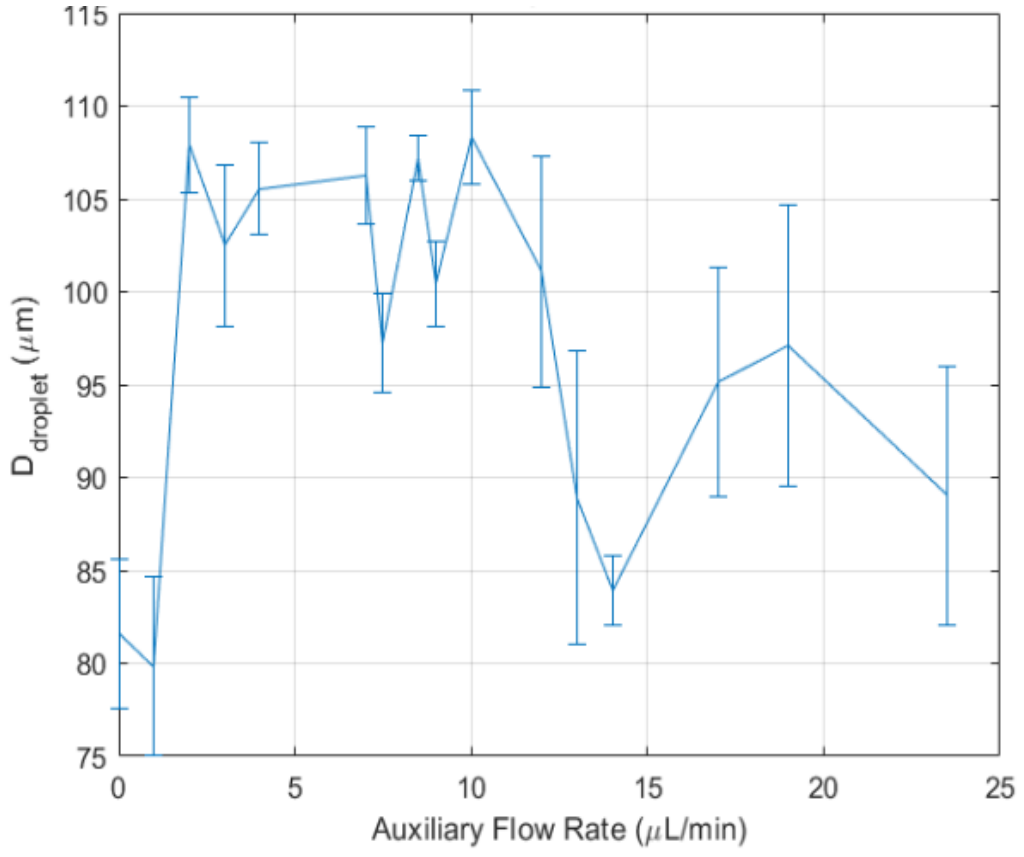
4.2.2. Tip-2 Cihazlarda Sıcaklık Etkisi

Tip-2 cihaz kullanılarak sulu damlacığın sürekli faz olan yağ içinde sıcaklığa bağlı çözünürlüğü incelenmiştir. Bunun için sabit oranda yağ-su akış hızlarıyla oluşturulan

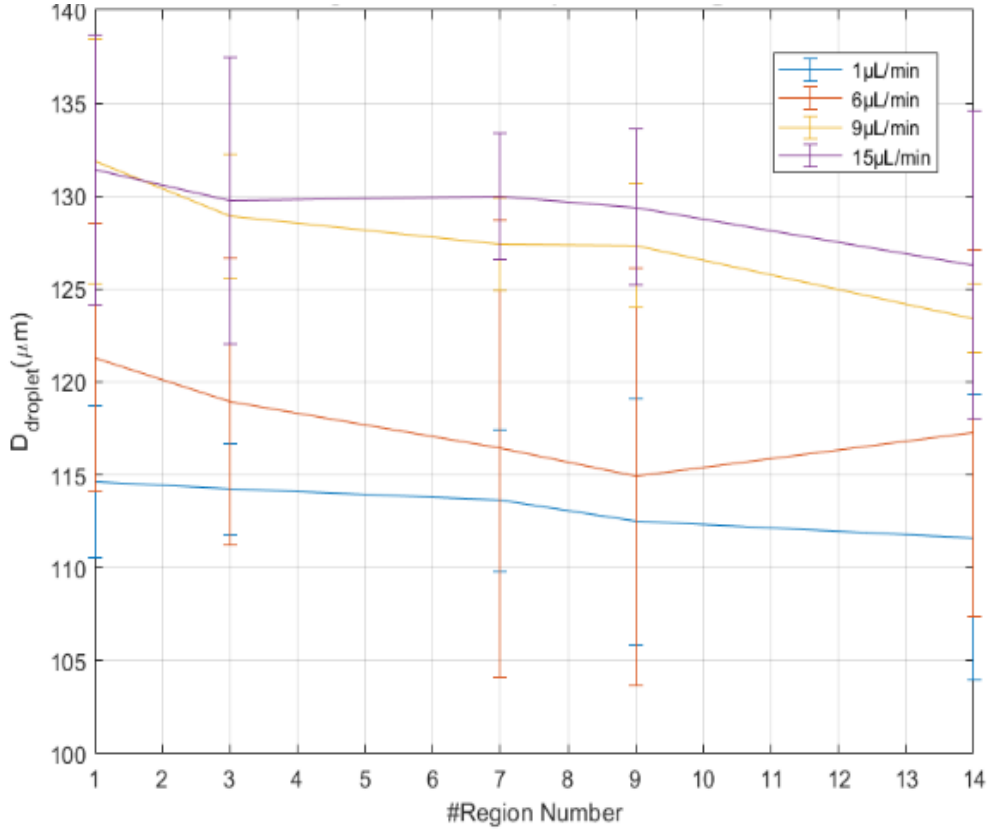
damlacıkların farklı yardımcı yağ akışı hızlarında sıcaklık etkisi Çizelge 3.5'te verilen Tip-2 cihaz bölgelerinde damlacık çapı değişimi aşağıdaki grafiklerde sunulmuştur.



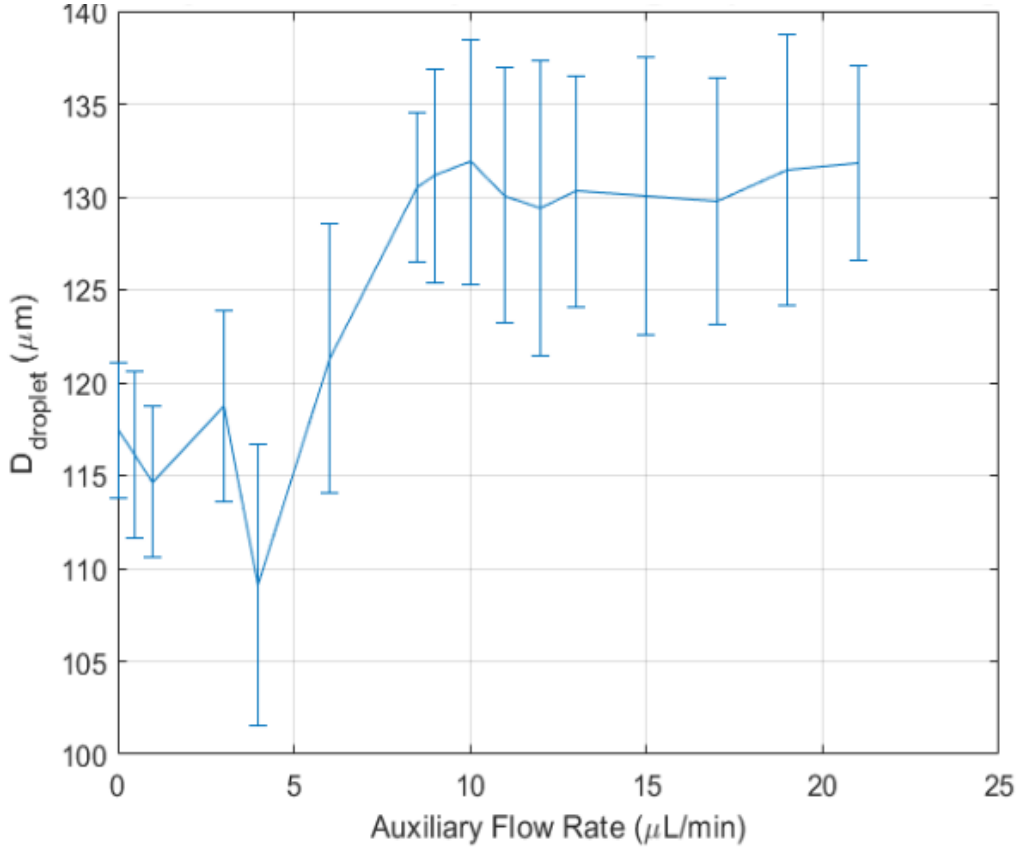
Şekil 4.26. 50 μm nozül genişliğine sahip serpentinli mikroakışkan cihazda sırasıyla 0,4 $\mu l/min$ – 8 $\mu l/min$ su-yağ akış hızlarıyla oluşturulan damlacıkların farklı yardımcı yağ akışı hızlarında sıcaklık etkisindeki bölge ve damlacık çapı ilişkisi



Şekil 4.27. 50 μm nozül genişliğine sahip serpentinli mikroakışkan cihazda sırasıyla 0,4 $\mu\text{l}/\text{min}$ - 8,0 $\mu\text{l}/\text{min}$ su-yağ akış hızlarıyla oluşturulan damlacık oluşum bölgesinde damlacıkların farklı yardımcı yağ akışı hızları ile damlacık çapı ilişkisi



Şekil 4.28. 100 μm nozül genişliğine sahip serpentinli mikroakışkan cihazda sırasıyla 0,4 μl/min - 8 μl/min su-yağ akış hızlarıyla oluşturulan damlacıkların farklı yardımcı yağ akışı hızlarında sıcaklık etkisindeki bölge ve damlacık çapı ilişkisi



Şekil 4.29. 100 μm nozül genişliğine sahip serpentinli mikroakışkan cihazda sırasıyla 0,4 μl/min - 8μl/min su-yağ akış hızlarıyla oluşturulan damlacık oluşum bölgesinde damlacıkların farklı yardımcı yağ akışı hızları ile damlacık çapı ilişkisi

Şekil 4.25 ve 4.27’de görüldüğü gibi cihazın nozül genişliğinden bağımsız olarak 40 °C’deki serpentin bölgesinde ilerledikçe damlacıkların boyutları küçülme eğilimindedir. Her bölgeden elde edilen verilere göre ortalama damlacık çapına ait standart sapmanın %10’dan yüksek olduğu hesaplanmıştır. Bu düzensizliğe sebep olan durumun damlacık oluşum bölgesinde eş boyutlu damlacık oluşturulamamasından kaynaklı olduğu düşünülmüştür.

Farklı yardımcı yağ akışlarının kullanıldığı cihazda damlacık çapı değişimi Şekil 4.26 ve 4.28’de verilmiştir. Görüldüğü gibi damla çapındaki sapma yardımcı akış hızı arttıkça artmaktadır. Bu durum damlacık oluşum bölgesinde yardımcı yağ akışından kaynaklı kayma kuvvetlerin azalmasıyla açıklanabilir.

5. YORUM

Yapılan tez çalışması kapsamında, farklı geometrilere ve boyutlara sahip mikroakışkan cihazlar kullanılarak damlacık oluşturmada kullanılan akış hızlarına göre damlacık çapı ve damlacıklar arasındaki mesafenin değişimi incelenmiştir. Yapılan bu deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen önemli bulgular aşağıda sıralanmıştır:

- X-kavşaklı Tip-1 cihazda 25 µm nozül genişliğine sahip cihazda damlacık çapları akış hızına ters orantılı davranış göstermiştir. Cihazda en büyük $146,61 \pm 6,32 \times 10^{-3}$ µm çapa sahip damlacık minimum 2 µl/min yağ ve 0,1 µl/min su akış hızı çiftiyle elde edilebilmiş, en küçük $47,49 \pm 2,44 \times 10^{-1}$ µm çapa sahip damlacık minimum 46 µl/min yağ ve 2,3 µl/min su akış hızı çiftiyle elde edilebilmiştir. Elde edilebilen en küçük damlacık çapından sonra sistem jet akış rejimine geçiş yapmıştır.
- X-kavşaklı Tip-1 cihazda 50 µm nozül genişliğine sahip cihazda da damlacık çapları akış hızına ters orantılı davranış göstermiştir. Cihazda en büyük $163,6 \pm 9,05 \times 10^{-3}$ µm çapa sahip damlacık minimum 3 µl/min yağ ve 0,15 µl/min su akış hızı çiftiyle elde edilebilmiş, en küçük $57,14 \pm 5,88 \times 10^{-3}$ µm çapa sahip damlacık minimum 100 µl/min yağ ve 5 µl/min su akış hızı çiftiyle elde edilebilmiştir. Elde edilebilen en küçük damlacık çapından sonra sistem jet akış rejimine geçiş yapmıştır.
- X-kavşaklı Tip-1 cihazda 100 µm nozül genişliğine sahip cihazda da damlacık çapları akış hızına ters orantılı davranış göstermiştir. Cihazda en büyük $210,06 \pm 7,6 \times 10^{-3}$ µm çapa sahip damlacık minimum 3 µl/min yağ ve 0,15 µl/min su akış hızı çiftiyle elde edilebilmiş, en küçük $90,24 \pm 2,44 \times 10^{-3}$ µm çapa sahip damlacık minimum 60 µl/min yağ ve 3 µl/min su akış hızı çiftiyle elde edilebilmiştir. Elde edilebilen en küçük damlacık çapından sonra sistem jet akış rejimine geçiş yapmıştır.
- Boyutsuz olan kılcak sayısı Ca ve damlacık çapının eşdeğer nozül genişliğine oranı ile hazırlanan Şekil 15'te bu üç farklı nozül genişliğindeki cihazda damlacık

oluşumunun ortak bir davranışta olduğu gözlenmiştir. Bu davranış, kılcal sayının artmasıyla damlacık oluşum bölgesindeki kayma geriliminin arttığı ve bu artışın damlacık çapının küçülmesine sebep olduğu şeklinde yorumlanmıştır.

- X-kavşaklı 25, 50, 100 μm nozül genişliğine sahip Tip-1 cihazlarda, damlacık çapı ve damlacıklar arası mesafe nozül genişliğinden bağımsız olarak benzer davranış göstermiştir. Bunun sebebi olarak nozül genişliği parametresi, süreklilik denkleminde Eşitlik 18’de de görüldüğü üzere doğrusal bir değişime neden olmaktadır. Elde edilen veriler boyutsuz sayılar ile ifade edilince (damlacıklar arası mesafenin nozül genişliğine oranı) cihazdan bağımsız davranış gösteren bir sonuçtur. Bu ilişkide gözlenen eğilim çizgisi üzerindeki dağılımı görece küçük damlacıkların eş mesafe performansının büyük çaplı damlacıklara göre daha iyi olduğu şeklinde açıklanabilmektedir. Ayrıca damlacık çapının, nozül genişliğinin yarısından fazlasını kapladığında, damlacık çapı arttıkça damlacıklar arası mesafenin azaldığı belirlenmiştir. Damlacık çapının yaklaşık olarak nozül genişliğinin yarısından az olduğu durumda ise damlacık çapı arttıkça damlacıklar arası mesafenin arttığı tespit edilmiştir.
- X-kavşaklı Tip-2 cihazda damlacıklar arasındaki mesafe yardımcı yağ kanalı aracılığıyla değiştirilmiştir. 100 μm nozül genişliğine sahip cihazda 50 μm nozül genişliğine sahip cihaza göre damlacıklar arası mesafe artışının daha kararlı bir davranış göstermiş olduğu, ayrıca hata çubukları değişiminin daha düşük olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonucunda belirli yardımcı yağ akış hızlarından sonra hata çubuklarının artışı veya azalışı gözlenmiştir. Bu durum, yardımcı yağ akış hızının sistemin kararlılığını belirli bir değerden sonra arttırdığı veya azalttığı yönünde değerlendirilmektedir. Hatta 50 μm nozül genişliğine sahip cihazda belirli bir kritik yardımcı yağ akış hızına kadar damlacıklar arası mesafenin arttığı, kritik değerden sonra damlacıklar arası mesafenin azaldığı gözlenmiştir.
- X-kavşaklı Tip-2 cihazda 0,4 $\mu\text{l}/\text{min}$ su – 8 $\mu\text{l}/\text{min}$ yağ akış hızı ve 0,8 $\mu\text{l}/\text{min}$ su – 16 $\mu\text{l}/\text{min}$ yağ akış hızı çiftleri kullanılarak üretilen damlacıkların çapı, X-kavşaklı Tip-1 cihazda üretilen damlacıkların çapı ile kıyaslandığında daha küçük

olduğu gözlenmiştir. Bu farkın temel sebebi kanal boyunca eklenen mesafe ve u-dönüşlerden kaynaklı basınç düşüşüyle ilişkilidir. Literatürde serpentin sayısı arttıkça sistemdeki basınç düşüşünün arttığı bilinmektedir. Her köşe dönüşünde yüzeydeki sürtünme kuvveti ve merkezkaç kuvveti sebebiyle basınç düşüşleri meydana gelmektedir. Literatürde dönüşlerdeki vorteks etkisi ve ikincil akış ile beraber damlacıklar üzerinde düzensizlik etkisinin yaratılması ve bununla karışım yapıldığı bilinmektedir. Bahsi geçen bu etkilerle Tip-2 cihazda gözlenen sapma miktarları açıklanmaktadır.

- Tip-2 cihazlarda ısıtma uygulanan deneylerde, sulu damlacık serpentin bölgesinde ilerledikçe 40 °C'deki yağa daha uzun süre maruz bırakılmış ve yağ içinde çözünmeye başlamıştır. Şekil 4.25 ve Şekil 4.27'de gösterildiği gibi sulu damlacıkların çözünürlüğü artmış ve damlacık çapları küçülmüştür. Sistemin serpentindeki U-dönüş varlığındaki yüzey sürtünmesi ve bunun sebep olduğu basınç düşüşleri oluşturulan damlacıkların çaplarında kararsızlığa sebep olmuştur. Daha sonra yapılacak çalışmalarda kullanılacak cihaz tasarımlarında serpentin dönüşlerinin cihazın boyuna paralel olması yerine enine dönüşlerinin olması daha az U-dönüşü kullanımını sağlayacaktır. Böylece sistem daha az basınç düşüşüne maruz kalacak, yukarıda açıklandığı gibi damlacık çapının ve damlacık arası mesafenin daha kararlı davranış göstereceği düşünülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- [1] A. Fowler, M. Toner, Cryo-injury and biopreservation., *Ann. N. Y. Acad. Sci.* (2006). <https://doi.org/10.1196/annals.1363.010>.
- [2] B.J. Fuller, Cryoprotectants: The essential antifreezes to protect life in the frozen state, *Cryo-Letters.* (2004).
- [3] A. Bajpayee, J.F. Edd, A. Chang, M. Toner, Concentration of Glycerol in Aqueous Microdroplets by Selective Removal of Water, *Anal. Chem.* (2010). <https://doi.org/10.1021/ac9022742>.
- [4] Y.S. Heo, H.J. Lee, B.A. Hassell, D. Irimia, T.L. Toth, H. Elmoazzen, M. Toner, Controlled loading of cryoprotectants (CPAs) to oocyte with linear and complex CPA profiles on a microfluidic platform, *Lab Chip.* (2011). <https://doi.org/10.1039/c1lc20377k>.
- [5] E. Brouzes, M. Medkova, N. Savenelli, D. Marran, M. Twardowski, J.B. Hutchison, J.M. Rothberg, D.R. Link, N. Perrimon, M.L. Samuels, Droplet microfluidic technology for single-cell high-throughput screening, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* (2009). <https://doi.org/10.1073/pnas.0903542106>.
- [6] I. Shestopalov, J.D. Tice, R.F. Ismagilov, Multi-step synthesis of nanoparticles performed on millisecond time scale in a microfluidic droplet-based system, *Lab Chip.* (2004). <https://doi.org/10.1039/b403378g>.
- [7] M. Abdul Wahab, E.Y. Erdem, Multi-step microfluidic reactor for the synthesis of hybrid nanoparticles, *J. Micromechanics Microengineering.* (2020). <https://doi.org/10.1088/1361-6439/ab8dd2>.
- [8] K. Liu, H.J. Ding, J. Liu, Y. Chen, X.Z. Zhao, Shape-controlled production of biodegradable calcium alginate gel microparticles using a novel microfluidic device, *Langmuir.* (2006). <https://doi.org/10.1021/la061729+>.
- [9] C.D. Ahrberg, J. Wook Choi, B. Geun Chung, Automated droplet reactor for the synthesis of iron oxide/gold core-shell nanoparticles, *Sci. Rep.* (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58580-9>.
- [10] Z. Nie, S. Xu, M. Seo, P.C. Lewis, E. Kumacheva, Polymer particles with various shapes and morphologies produced in continuous microfluidic reactors, *J. Am. Chem. Soc.* (2005). <https://doi.org/10.1021/ja042494w>.
- [11] A. Huebner, L.F. Olguin, D. Bratton, G. Whyte, W.T.S. Huck, A.J. De Mello, J.B. Edel, C. Abell, F. Hollfelder, Development of quantitative cell-based enzyme assays in microdroplets, *Anal. Chem.* (2008). <https://doi.org/10.1021/ac800338z>.
- [12] S. Patil, A. Pandit, G. Gaikwad, P. Dandekar, R. Jain, Exploring Microfluidic Platform Technique for Continuous Production of Pharmaceutical Microemulsions, *J. Pharm. Innov.* (2020). <https://doi.org/10.1007/s12247-020-09457-x>.
- [13] R. Villa, E. Alvarez, R. Porcar, E. Garcia-Verdugo, S. V. Luis, P. Lozano, Ionic liquids as an enabling tool to integrate reaction and separation processes, *Green Chem.* (2019). <https://doi.org/10.1039/c9gc02553g>.
- [14] P. Bodénès, H.Y. Wang, T.H. Lee, H.Y. Chen, C.Y. Wang, Microfluidic

- techniques for enhancing biofuel and biorefinery industry based on microalgae, *Biotechnol. Biofuels.* (2019). <https://doi.org/10.1186/s13068-019-1369-z>.
- [15] D.G. Pyne, J. Liu, M. Abdelgawad, Y. Sun, Digital microfluidic processing of mammalian embryos for vitrification, *PLoS One.* (2014). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0108128>.
- [16] M.D. Canto, C. Moutier, F. Brambillasca, M.C. Guglielmo, A. Bartolacci, M.M. Renzini, R. Fadini, J. Buratini, Automated vitrification for embryo cryopreservation: preliminary comparative results and first live birth in Europe, *Fertil. Steril.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2019.07.425>.
- [17] J.C. McDonald, D.C. Duffy, J.R. Anderson, D.T. Chiu, H. Wu, O.J.A. Schueller, G.M. Whitesides, Fabrication of microfluidic systems in poly(dimethylsiloxane), *Electrophoresis.* (2000). [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1522-2683\(20000101\)21:1<27::AID-ELPS27>3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/(SICI)1522-2683(20000101)21:1<27::AID-ELPS27>3.0.CO;2-C).
- [18] G.M. Whitesides, The origins and the future of microfluidics, *Nature.* (2006). <https://doi.org/10.1038/nature05058>.
- [19] D. Mark, S. Haeberle, G. Roth, F. Von Stetten, R. Zengerle, Microfluidic lab-on-a-chip platforms: Requirements, characteristics and applications, *Chem. Soc. Rev.* (2010). <https://doi.org/10.1039/b820557b>.
- [20] C.J. Geankoplis, *Transport Processes and Unit Operations (Geankoplis).pdf*, Englewood Cliffs. (2003).
- [21] R. Ravi, S.N. Gummadi, R. Vinu, Coulson and richardson's chemical engineering, 2017. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-01372-X>.
- [22] P.K. Panigrahi, *Transport Phenomena in Microfluidic Systems*, 2015. <https://doi.org/10.1002/9781118298428>.
- [23] T. Shen, Z. Zhu, L. Huang, J. Chang, Transient flow behavior in serpentine curved microchannel of inertial microfluidic devices, *J. Micromechanics Microengineering.* (2020). <https://doi.org/10.1088/1361-6439/ab5c64>.
- [24] H. Song, D.L. Chen, R.F. Ismagilov, Reactions in droplets in microfluidic channels, *Angew. Chemie - Int. Ed.* (2006). <https://doi.org/10.1002/anie.200601554>.
- [25] H. Song, R.F. Ismagilov, Millisecond Kinetics on a Microfluidic Chip Using Nanoliters of Reagents, *J. Am. Chem. Soc.* (2003). <https://doi.org/10.1021/ja0354566>.
- [26] F. Sarrazin, L. Prat, N. Di Miceli, G. Cristobal, D.R. Link, D.A. Weitz, Mixing characterization inside microdroplets engineered on a microcoalescer, *Chem. Eng. Sci.* (2007). <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.10.013>.
- [27] H. Song, J.D. Tice, R.F. Ismagilov, A microfluidic system for controlling reaction networks in time, *Angew. Chemie - Int. Ed.* (2003). <https://doi.org/10.1002/anie.200390203>.
- [28] T. Thorsen, S.J. Maerkl, S.R. Quake, Microfluidic large-scale integration, *Science (80-.)*. (2002). <https://doi.org/10.1126/science.1076996>.
- [29] S. V. Dalvi, A.H. Khan, X. Jiang, S. Surwase, M. Gultekinoglu, C. Bayram, I. Sathisaran, D. Bhatia, J. Ahmed, B. Wu, K. Ulubayram, M. Edirisinghe, Effectiveness of oil-layered albumin microbubbles produced using microfluidic t-

- junctions in series for in vitro inhibition of tumor cells, *Langmuir*. (2020). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c01557>.
- [30] E.W.M. Kemna, R.M. Schoeman, F. Wolbers, I. Vermes, D.A. Weitz, A. Van Den Berg, High-yield cell ordering and deterministic cell-in-droplet encapsulation using Dean flow in a curved microchannel, *Lab Chip*. (2012). <https://doi.org/10.1039/c2lc00013j>.
- [31] L. Wu, P. Chen, Y. Dong, X. Feng, B.F. Liu, Encapsulation of single cells on a microfluidic device integrating droplet generation with fluorescence-activated droplet sorting, *Biomed. Microdevices*. (2013). <https://doi.org/10.1007/s10544-013-9754-z>.
- [32] R. Vasiliauskas, D. Liu, S. Cito, H. Zhang, M.A. Shahbazi, T. Sikanen, L. Mazutis, H.A. Santos, Simple Microfluidic Approach to Fabricate Monodisperse Hollow Microparticles for Multidrug Delivery, *ACS Appl. Mater. Interfaces*. (2015). <https://doi.org/10.1021/acsami.5b04824>.
- [33] C.N. Baroud, F. Gallaire, R. Dangla, Dynamics of microfluidic droplets, *Lab Chip*. (2010). <https://doi.org/10.1039/c001191f>.
- [34] T. Alkayyali, T. Cameron, B. Haltli, R.G. Kerr, A. Ahmadi, Microfluidic and cross-linking methods for encapsulation of living cells and bacteria - A review, *Anal. Chim. Acta*. (2019). <https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.12.056>.
- [35] T. Thorsen, R.W. Roberts, F.H. Arnold, S.R. Quake, Dynamic pattern formation in a vesicle-generating microfluidic device, *Phys. Rev. Lett*. (2001). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.4163>.
- [36] C. Cramer, P. Fischer, E.J. Windhab, Drop formation in a co-flowing ambient fluid, *Chem. Eng. Sci*. (2004). <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.04.006>.
- [37] B.R. Munson, D.F. Young, T.H. Okiishi, *Fundamentals of fluid mechanics*, Fundam. Fluid Mech. (1994). <https://doi.org/10.1201/b15874-3>.
- [38] A.S. Utada, A. Fernandez-Nieves, H.A. Stone, D.A. Weitz, Dripping to jetting transitions in coflowing liquid streams, *Phys. Rev. Lett*. (2007). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.094502>.
- [39] T.M. Squires, S.R. Quake, *Microfluidics: Fluid physics at the nanoliter scale*, *Rev. Mod. Phys*. (2005). <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.77.977>.
- [40] B.E. Rapp, *Microfluidics: Modeling, mechanics and mathematics*, 2016. <https://doi.org/10.1016/c2012-0-02230-2>.
- [41] A. Günther, K.F. Jensen, *Multiphase microfluidics: From flow characteristics to chemical and materials synthesis*, *Lab Chip*. (2006). <https://doi.org/10.1039/b609851g>.
- [42] J. Berthier, P. Silberzan, *Microfluidics for Biotechnology*, 2006. [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20010316\)40:6<9823::AID-ANIE9823>3.3.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20010316)40:6<9823::AID-ANIE9823>3.3.CO;2-C).
- [43] Z.F. Cui, R.C. Dykhuizen, R.M. Nerem, A. Sembanis, Modeling of cryopreservation of engineered tissues with one-dimensional geometry, *Biotechnol. Prog*. (2002). <https://doi.org/10.1021/bp0101886>.
- [44] U. Okumuş, Examination and Mathematical Modelling of Shrinkage Rate of Uniform Droplets in a Microfluidic System Designed for Biopreservation,

Hacettepe Üniversitesi, 2015.

- [45] T. Yang, J. Peng, Z. Shu, P.K. Sekar, S. Li, D. Gao, Determination of the membrane transport properties of jurkat cells with a microfluidic device, *Micromachines*. (2019). <https://doi.org/10.3390/mi10120832>.
- [46] J. Peng, C. Fang, S. Ren, J. Pan, Y. Jia, Z. Shu, D. Gao, Development of a microfluidic device with precise on-chip temperature control by integrated cooling and heating components for single cell-based analysis, *Int. J. Heat Mass Transf.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.135>.
- [47] A.R. Abate, A. Poitzsch, Y. Hwang, J. Lee, J. Czerwinska, D.A. Weitz, Impact of inlet channel geometry on microfluidic drop formation, *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.* (2009). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.80.026310>.
- [48] M. Rahimi, A. Shams Khorrami, P. Rezai, Effect of device geometry on droplet size in co-axial flow-focusing microfluidic droplet generation devices, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.03.067>.
- [49] B.M. Jose, T. Cubaud, Droplet arrangement and coalescence in diverging/converging microchannels, *Microfluid. Nanofluidics*. (2012). <https://doi.org/10.1007/s10404-011-0909-z>.
- [50] C. Deng, H. Wang, W. Huang, S. Cheng, Numerical and experimental study of oil-in-water (O/W) droplet formation in a co-flowing capillary device, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* (2017). <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.05.041>.
- [51] L. Wu, X. Liu, Y. Zhao, Y. Chen, Role of local geometry on droplet formation in axisymmetric microfluidics, *Chem. Eng. Sci.* (2017). <https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.01.022>.
- [52] M. Mastiani, S. Seo, B. Mosavati, M. Kim, High-Throughput Aqueous Two-Phase System Droplet Generation by Oil-Free Passive Microfluidics, *ACS Omega*. (2018). <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b01768>.
- [53] W. Han, X. Chen, Z. Wu, Y. Zheng, Three-dimensional numerical simulation of droplet formation in a microfluidic flow-focusing device, *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.* (2019). <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1767-y>.
- [54] S.C. Jacobson, R. Hergenröder, L.B. Koutny, J.M. Ramsey, R.J. Warmack, Effects of Injection Schemes and Column Geometry on the Performance of Microchip Electrophoresis Devices, *Anal. Chem.* (1994). <https://doi.org/10.1021/ac00079a028>.
- [55] R.H. Liu, M.A. Stremler, K. V. Sharp, M.G. Olsen, J.G. Santiago, R.J. Adrian, H. Aref, D.J. Beebe, Passive mixing in a three-dimensional serpentine microchannel, *J. Microelectromechanical Syst.* (2000). <https://doi.org/10.1109/84.846699>.
- [56] M. Muradoglu, H.A. Stone, Mixing in a drop moving through a serpentine channel: A computational study, *Phys. Fluids*. (2005). <https://doi.org/10.1063/1.1992514>.
- [57] J. Zhang, W. Li, M. Li, G. Alici, N.T. Nguyen, Particle inertial focusing and its mechanism in a serpentine microchannel, *Microfluid. Nanofluidics*. (2014).

<https://doi.org/10.1007/s10404-013-1306-6>.

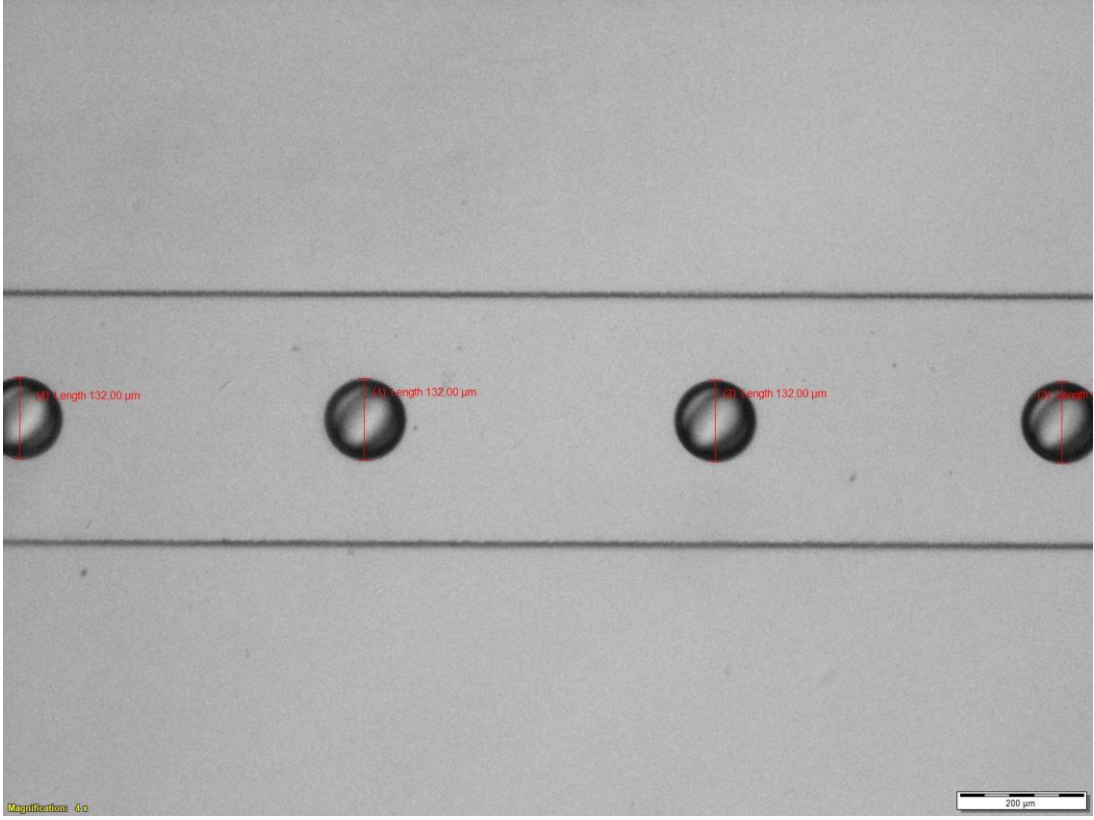
- [58] M.U. Javaid, T.A. Cheema, C.W. Park, Analysis of passive mixing in a serpentine microchannel with sinusoidal side walls, *Micromachines*. (2017). <https://doi.org/10.3390/mi9010008>.
- [59] J. Clark, M. Kaufman, P.S. Fodor, Mixing enhancement in serpentine micromixers with a non-rectangular cross-section, *Micromachines*. (2018). <https://doi.org/10.3390/mi9030107>.
- [60] D. Di Carlo, Inertial microfluidics, *Lab Chip*. (2009). <https://doi.org/10.1039/b912547g>.
- [61] P.C.H. Li, Microfluidic Lab-on-a-Chip for Chemical and Biological Analysis and Discovery, 2005. <https://doi.org/10.1201/9781420027457>.
- [62] C.X. Zhao, A.P.J. Middelberg, Two-phase microfluidic flows, *Chem. Eng. Sci.* (2011). <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.08.038>.

EKLER

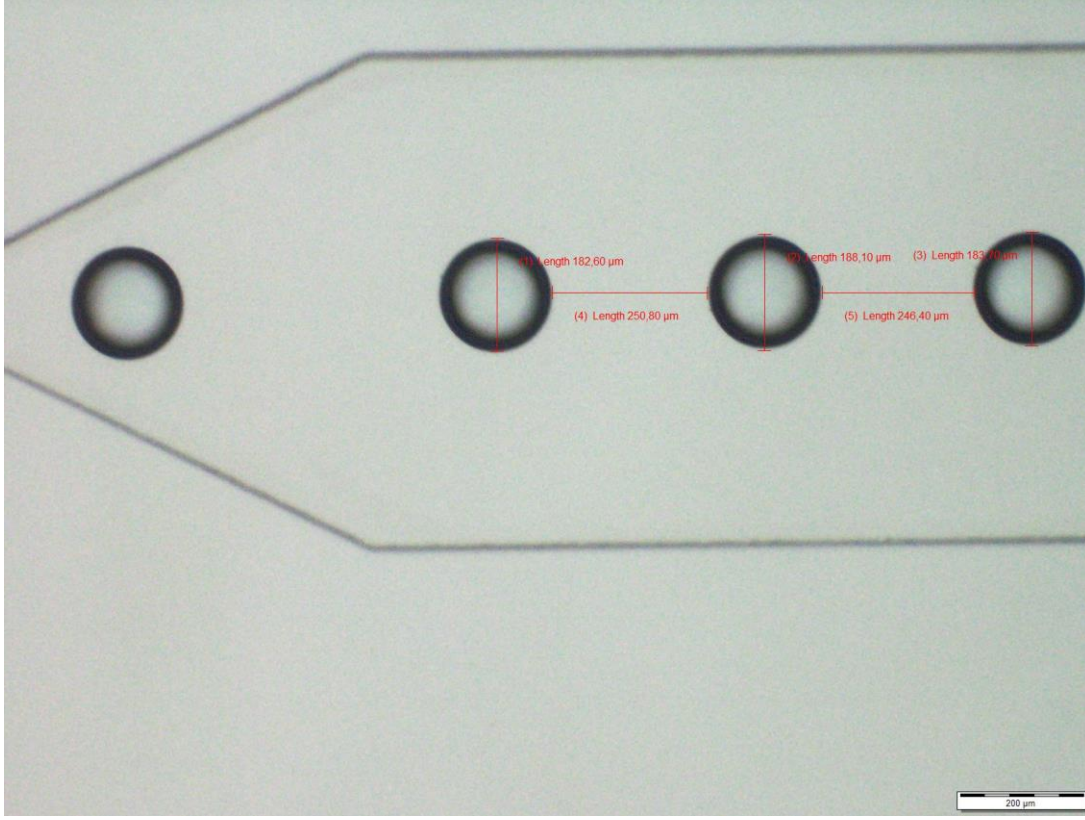
EK 1- Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Soya Fasulyesi Yağının Fiziksel Özellikleri

$\mu_{soybean,25^{\circ}C}$	0,0571 kg/m.s
$\mu_{soybean,40^{\circ}C}$	0,0313 kg/m.s
$\rho_{soybean,25^{\circ}C}$	915,7 kg/m ³
$\rho_{soybean,40^{\circ}C}$	903,3 kg/m ³
$\sigma_{soybean,25^{\circ}C}$	0,0313 kg/s ²
$\sigma_{soybean,40^{\circ}C}$	0,306 kg/s ²

EK 2- 50 μm Nozül Genişliğine Sahip X-kavşaklı Tip-1 Mikroakışkan Cihazda 0,5 $\mu\text{l}/\text{min}$ Su – 10 $\mu\text{l}/\text{min}$ Yağ Akış Hızı ile Üretilen Örnek Damlacık Görüntüsü



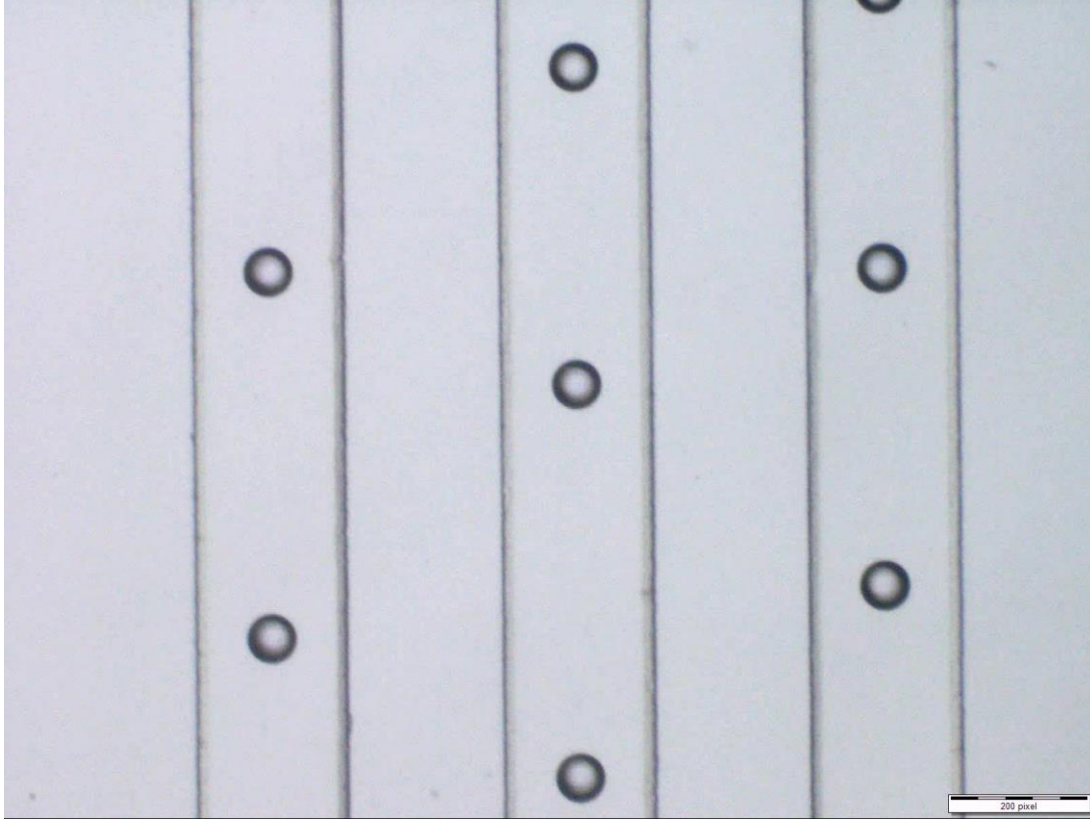
EK 3- 100 μm Nozül Genişliğine Sahip X-kavşaklı Mikroakışkan Cihazda 0,5 $\mu\text{l}/\text{min}$ Su – 10 $\mu\text{l}/\text{min}$ Yağ Akış Hızı ile Üretilen Örnek Damlacık Görüntüsü



EK 4- 100 μm Nozül Genişliğine Sahip X-kavşaklı Tip-2 Mikroakışkan Cihazda 0,5 $\mu\text{l}/\text{min}$ Su – 10 $\mu\text{l}/\text{min}$ Yağ Akış Hızı ile Üretilen Örnek Damlacık Görüntüsü



**EK 5- 50 μm Nozül Genişliğine Sahip X-kavşaklı Mikroakışkan Cihazda 0,5 $\mu\text{l}/\text{min}$
Su – 10 $\mu\text{l}/\text{min}$ Yağ Akış Hızı ile Üretilen Örnek Damlacık Görüntüsü**



EK 6- Laminer Akışta Kayıp Katsayısının Değerleri [20]

<i>Type of Fitting or Valve</i>	<i>Frictional Loss, Number of Velocity Heads, K_f</i>	<i>Frictional Loss, Equivalent Length of Straight Pipe in Pipe Diameters, L_e/D</i>
Elbow, 45°	0.35	17
Elbow, 90°	0.75	35
Tee	1	50
Return bend	1.5	75
Coupling	0.04	2
Union	0.04	2
Gate valve		
Wide open	0.17	9
Half open	4.5	225
Globe valve		
Wide open	6.0	300
Half open	9.5	475
Angle valve, wide open	2.0	100
Check valve		
Ball	70.0	3500
Swing	2.0	100
Water meter, disk	7.0	350

EK 7- Görüntü İşleme İçin Kullanılan Python Kodu (Yüksek lisans öğrencisi Anıl Hatiboğlu'nun izniyle)

```
C:\Users\gocme > gome > Desktop > Bahar Data > serpentin 50 > 0,4-8 > 8,5-0,4-8 > hot > droplet.py > main
Set as interpreter
1  #!/usr/bin/python
2  import cv2
3  import numpy as np
4  import imutils
5  import math
6  import matplotlib.pyplot as plt
7
8  dropletlist = []
9  distancelist = []
10
11
12
13 def main():
14     #for the webcam
15     #cap = cv2.VideoCapture(0)
16     #cap.open(0)
17     #print cap.isOpened()
18
19
20     ...ONEMLI !!!!!
21     videonun ismini buraya yazilmalidir...
22
23     cap = cv2.VideoCapture('droplet.avi')
24
25     scale = 1757.80 #4x kamera icin
26     #scale = 703.12 #10x kamera icin
27     #scale = 351.56 #20x kamera icin
28     #scale = 175.78 #40x kamera icin
29
30     totalFrame = int(cap.get(cv2.CAP_PROP_FRAME_COUNT))
31     print (totalFrame)
32     font = cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX
33     height = 1200
34     width = 1600
35     cnt = 0
36
37     ... ONEMLI !!!!!
```

Ln 15, Col 31 Spaces: 4 UTF-8 CRLF Python

```

'''ONEMLI !!!!!
videonun ismini buraya yazilmalidir'''
cap = cv2.VideoCapture('droplet.avi')

scale = 1757.80 #4x kamera icin
#scale = 703.12 #10x kamera icin
#scale = 351.56 #20x kamera icin
#scale = 175.78 #40x kamera icin

totalFrame = int(cap.get(cv2.CAP_PROP_FRAME_COUNT))
print (totalFrame)
font = cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX
height = 1200
width = 1600
cnt = 0

''' ONEMLI !!!!!
Algoritmanın daha hassas olcebilmesi için, ölçmek istedigimiz maximum ve minimum araligi daraltilmasi gerekmektedir.
Mikrometre cinsinden asagida duzenlenmelidir.
...
MaxOfInterest = 60 # in micrometers
MinOfInterest = 40 # in micrometers
...
''' ONEMLI !!!!!
4x kamera icin asagidaki max-minOfInterest yazan yerleri 1600/1757.80 ile carpiyoruz.
10x kamera icin asagidaki max-minOfInterest yazan yerleri 1600/703.12 ile carpiyoruz.
...
maxR = int(MaxOfInterest*1600/scale) # in pixels
minR = int(MinOfInterest*1600/scale) # in pixels
...
''' ONEMLI !!!!!
Asagidaki text dosyasina butun damlaciklarin diameterleri satir satir kayit edilecek. Uygun bir dosya ismi yeterli.
...
file1 = open("droplet-Droplet.txt", "w")
file2 = open("droplet-Distance.txt", "w")
while True:

```

```

size = open( 'droplet-distance.txt', 'w' )
while True:
    ret, frame = cap.read()
    cnt = cnt + 1

    frame = cv2.medianBlur(frame,5)

    cimg = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2GRAY)

    circles = cv2.HoughCircles(cimg, cv2.HOUGH_GRADIENT, 1, maxR, param1=50, param2=30, minRadius=minR, maxRadius=maxR)
    print ("-----")
    print ("Frame", cnt, "of", totalFrame)
    print (circles)

    if circles is not None:
        circles=circles
        circles=np.uint16(np.around(circles))
        count = 0
        tempList = []
        tempdiameter = []

        for i in circles[0,:]:
            cv2.circle(cimg, (maxR, maxR), minR, (0,0,0), 2)
            cv2.circle(cimg, (maxR, maxR), maxR, (0,0,0), 2)
            cv2.putText(cimg, str("Largest & Smallest"), (maxR+100, maxR), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.8, (0,255,0), 2)
            cv2.putText(cimg, str("detectable circles"), (maxR+100, maxR+50), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.8, (0,255,0), 2)
            # draw the outer circle
            cv2.circle(cimg, (i[0], i[1]), i[2], (0,0,0), 2)
            #draw the center of the circle
            cv2.circle(cimg, (i[0], i[1]), 2, (0,0,0), 3)

            diameter = (2*i[2]*scale/1600)
            displayDiameter = truncate(diameter,3)
            print ("Diameter: ", diameter)
            dropletList.append(diameter)

            distance = (i[0]*scale/1600)

```

```

C: > Users > gome > Bahar Data > serpentini 50 > 04-8 > 8,5-04-8 > hot > droplet.py > main
91
92 distance = (i[0]*scale/1600)
93 tempList.append(distance)
94 tempDiameter.append(diameter)
95 print(tempList)
96 tempList = sorted(tempList)
97 print(tempList)
98 cv2.putText(cimg, str(displayDiameter), (i[0]-60, i[1]-80), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.8, (0, 255, 0), 2)
99 cv2.putText(cimg, str("Droplet Diameter [um]"), (750, 60), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.8, (0, 255, 0), 2)
100 cv2.putText(cimg, str("_____"), (750, 65), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.8, (0, 255, 0), 2)
101 cv2.putText(cimg, str(displayDiameter), (750, count*50+90), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.8, (0, 255, 0), 2)
102 file1.write(repr(diameter)+"\n ")
103 count = count+1
104
105
106
107
108 for x in range(len(tempList)-1):
109
110     if abs(tempList[x+1]-tempList[x])<1500:
111         file2.write(repr(abs(tempList[x+1]-tempList[x]))+"\n ")
112         distanceList.append(abs(tempList[x+1]-tempList[x])-tempDiameter[0])
113         displayDistance = truncate(abs(tempList[x+1]-tempList[x])-tempDiameter[0], 3)
114         print ("Distance \n", abs(tempList[x+1]-tempList[x])-tempDiameter[0])
115         cv2.putText(cimg, str("Interdroplet Distance [um]"), (1150, 60), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.8, (0, 255, 0), 2)
116         cv2.putText(cimg, str("_____"), (1150, 65), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.8, (0, 255, 0), 2)
117         cv2.putText(cimg, str(displayDistance), (1150, x*50+90), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.8, (0, 255, 0), 2)
118
119
120 cv2.imshow('Frame', cimg)
121
122 if cnt == totalFrame-1:
123     break
124
125 if cv2.waitKey(3) & 0xFF == ord('q') | cnt==10:
126     break
127
128 cap.release()
129 cv2.destroyAllWindows()
130 file1.close()
131 file2.close()

```

```

C: > Users > gocm > Desktop > Bahar Data > serpentın 50 > 0,4-8 > 8,5-0,4-8 > hot > droplet.py > main
127 file1.close()
128 file2.close()
129 ... ONEMLI !!!!!
130 Asagıdaki text dosyasına toplam damlacık sayisi, ortalama deger gibi bilgiler kayıt edilecek. Uygun bir dosya ismi yeterli.
131 ...
132 file = open("droplet-Report.txt", "w")
133 file.write("Number of Frames: " + repr(totalFrame))
134
135 file.write("\n Average Droplet Size: " + repr(np.mean(dropletList)))
136 file.write("\n total droplet amount: " + repr(len(dropletList)))
137
138 file.write("\n Average Droplet Distance: " + repr(np.mean(distanceList)))
139 file.write("\n total droplet distance amount: " + repr(len(distanceList)))
140
141 file.close()
142
143 ... ONEMLI !!!!!
144 Asagıdaki resim dosyasına sonucun grafigi cikarılacak. Uygun bir dosya ismi yeterli.
145 ...
146 bins = np.linspace(MinOfInterest*2, MaxOfInterest*2, MaxOfInterest*2-MinOfInterest*2+1)
147 plt.hist(dropletList, bins, alpha=0.5, label='Droplets @ xxx Celcius')
148 plt.xlabel('Droplet Diameter [um]', fontsize=8)
149 plt.ylabel('Number of Droplets', fontsize=8)
150 plt.legend(loc='upper right')
151 plt.savefig("droplet.png")
152 plt.show()
153
154 def truncate(f, n):
155     '''Truncates/pads a float f to n decimal places without rounding'''
156     s = '{}'.format(f)
157     if 'e' in s or 'E' in s:
158         return '{0:.{1}f}'.format(f, n)
159     i, p, d = s.partition('.')
160     return '.'.join([i, (d+'0'*n)[n:]])
161
162 if __name__ == "__main__":
163     main()
164

```

EK 8- Teorik Damlacık Çapı Hesaplanması için Kullanılan MATLAB Kodu

```
function drop(Q1_uLmin,Size)

mu = 0.0571;      %Pa s
gamma = 31.3*10^-3; %N/m
rho = 915.7;      %kg/m^3
eta = mu/rho;     %m^2/s
Q1_uLmin=Q1_uLmin/2;
%% given values for flow
%Q1_uLmin = 10; % uL/minzzzz
Q2_uLmin = Q1_uLmin;% uL/min
QW_uLmin = Q1_uLmin/10; % uL/min

QW_total = Q1_uLmin+Q2_uLmin+QW_uLmin;

Q1 = Q1_uLmin*10^-9/60; %m^3/s
Q2 = Q2_uLmin*10^-9/60; %m^3/s
QW = QW_uLmin*10^-9/60; %m^3/s

Q_total = Q1+Q2+QW;      %m^3/s
ratio=10;
deviceSize = Size*10^-6;      %m
w = deviceSize*8; %m
h = 190*10^-6;      %m
L = 2000*10^-6;      %m
dia = 100*10^-6;      %m
d_device=2*h*w/(h+w)*10^6;
%% Upstream Velocity at narrow region
U = Q_total/(deviceSize*h); %m/s

%% Capillary number
Ca = mu*U/gamma;
%% Characteristic Drop Size
perimeter = deviceSize/Ca;
D = perimeter/pi;
%% Continuity should require

(gamma/(pi))/(mu*U/deviceSize)*10^6
A = w*h;
cnt=0;
for d = 1*10^-6:0.03*10^-6:w      % SEARCHING
DIAMETER RANGE OF [1-200microns]
for n = 1:0.5:fix(L/d)      % SEARCHING
NUMBER OF DROPLETS OBEYING VOLUME RELATIONS

V_water = n*4/3*pi*(d/2)^3;      %m^3
V_water_pico = V_water*10^15;      %pL

V_oil = (L-n*d)*w*h + n*(w*d*h)-V_water;
V_oil_pico = V_oil*10^15;      %pL

V_total=V_water+V_oil;      %m^3
v_avg = Q_total/(w*h);      %m/s
V_ratio = V_oil/V_water;
t = L/v_avg;      %s
n;
distance = (L-n*d)/(n-1)*10^6;
```

```

    if abs((V_ratio-ratio)/ratio)*100<10    % SEARCHING 10% ERROR RANGE
OF VOLUMETRIC RATIO
        SurfT = gamma/(pi*d);
        ViscousF = mu*U/deviceSize;

        if abs((SurfT-ViscousF)/ViscousF)*100<10 % SEARCHING 10% ERROR
RANGE OF FORCE BALANCE
            cnt = cnt+1;
            diameter(cnt) = d*10^6;
            interDropletDistance(cnt) = distance;
            count(cnt) = n;
            V_ratio;
            SurfTension(cnt) = SurfT;
            ViscousForce(cnt) = ViscousF;
            abs((V_ratio-ratio)/ratio)*100;
            n;
        end
    end
end
end
mean(diameter)
mean(interDropletDistance)

```


EK 9- X-Kavşaklı Tip-1 25 µm Nozül Genişliğine Sahip Cihazda Elde Edilen Damlacık Çapı ile Damlacıklar Arası Mesafe Teorik ve Deneysel Çalışmalarının Karşılaştırması İçin Kullanılan MATLAB Kodu

```
clc
clear
close all
load('25tkanaldatalar_yeni.mat') %

X=capillarynumber;%akis hizi( Boyutsuz Capilar sayisi ifadesi)%
Y=DDropletDdevice;%Droplet diameter/Device Diameter%
ERR=stdevdiametern;
y1 = oiltotlmin;
for i=1: numel(y1)

    [a,b,c,d]=drop(y1(i)/2,25);

    theo_dia(i)=a;
    dia_comp(i)=b;
    ca(i)=c;
    theo_dist(i)=d;
end

%new figure
figure
errorbar(X,Y,ERR,'horizontal');
hold on
plot(ca,dia_comp)
xlabel('Kapiler Sayisi');
ylabel('D_{droplet}/D_{h}');
title('25\mum Kanal Genisligindeki X-Kavsak Cihazda Kapiler Sayisi
Damlacik Capi Arasindaki Iliski ');
grid on
set(gca,'FontSize',10)

x = avgdropletdiametern;
y1 = oiltotlmin;
y2= waterlmin;
Err=stdevdiametern1;

%new figure
figure
hold on
[AX,H1,H2]=plotyy(x,y1,x,y2);

I = ~isnan(theo_dia);
scatter(theo_dia(I),y1(I),'b')
errorbar(x,y1,Err,'horizontal');
set(gca,'FontSize',10)
set(AX,'FontSize',10);
feature('DefaultCharacterSet')
xlabel('Damlacik Capi (D_{droplet}) (\mum)');
ylabel('Toplam Yag Akis Hizi (Q_{yag}) (\mul/min)');
ylabel(AX(2),'Su Akis Hizi (Q_{su}) (\mul/min)')
```

```

title('25\mum Kanal Genisligindeki X-Kavsak Cihazda Akis Hizlari ile
Damlacik Capi Arasindaki Iliski');
grid on
legend('Deneysel Sonuclar','Teorik Sonuclar')

%new figure
figure
hold on
x2=avgdistancem;
y2=avgdropletdiameterm;
scatter(x2,y2,55)
plot(theo_dist,theo_dia)
xlabel('Damlaciklar Arasi Mesafe (\mum) ');
ylabel('Damlacik Capi (D_{droplet}) (\mum)');
title('25\mum Kanal Genisligindeki X-Kavsak Cihazda Damlaciklar Arasi
Mesafe ile Damlacik Capi Arasindaki Iliski');
grid on

set(gca,'FontSize',10)
legend('Deneysel Sonuclar','Teorik Sonuclar')

```

EK 10- X-Kavşaklı Tip-1 50 µm Nozül Genişliğine Sahip Cihazda Elde Edilen Damlacık Çapı ile Damlacıklar Arası Mesafe Teorik ve Deneysel Çalışmalarının Karşılaştırması İçin Kullanılan MATLAB Kodu

```
clc
clear
close all
load('50tkanaldatalar_yeni.mat') %

X=capillarynumber;%akis hizi( Boyutsuz Capilar sayisi ifadesi)%
Y=DDropletDdevice;%Droplet diameter/Device Diameter%
ERR=stdevdiameterm;
y1 = flowrateoiltotlmin;

for i=1: numel(y1)

[a,b,c,d]=drop(y1(i)/2,50);

    theo_dia(i)=a;
    dia_comp(i)=b;
    ca(i)=c;
    theo_dist(i)=d;
end

%new figure
figure
hold on
errorbar(X,Y,ERR,'horizontal');
xlabel('Kapiler Sayisi');
ylabel('D_{droplet}/D_{h}');
title('50\mum Kanal Genisligindeki X-Kavsak Cihazda Kapiler Sayisi
Damlacik Capi Arasindaki Iliski');
grid on
plot(ca,dia_comp)

x = avgdropletiameterm;
y1 = flowrateoiltotlmin;
y2= flowratewaterlmin;
Err=STDVDIAMETER;
set(gca,'FontSize',10)

%new figure
figure
[AX,H1,H2]=plotyy(x,y1,x,y2);
set(AX,'FontSize',10);
hold on

I = ~isnan(theo_dia);
scatter(theo_dia(I),y1(I),'b')
errorbar(x,y1,Err,'horizontal');
xlabel('Damlacik Capi (D_{droplet}) (\mum)');
ylabel('Toplam Yag Akis Hizi (Q_{yag}) (\mul/min)');
ylabel(AX(2),'Su Akis Hizi (Q_{su}) (\mul/min)')
```

```

title('50\mum Kanal Genisligindeki X-Kavsak Cihazda Akis Hizlari ile
Damlacik Capi Arasindaki Iliski ');
grid on
set(gca, 'FontSize',10)
legend('Deneysel Sonuclar', 'Teorik Sonuclar')

%new figure
figure
hold on
x2=avgdistancem;
y2=avgdropletdiametterm;
scatter(x2,y2,55)
plot(theo_dist,theo_dia)
xlabel('Damlaciklar Arasi Mesafe (\mum) ');
ylabel('Damlacik Capi (D_{droplet}) ');
title('50\mum Kanal Genisligindeki X-Kavsak Cihazda Damlaciklar Arasi
Mesafe ile Damlacik Capi Arasindaki Iliski');
grid on
set(gca, 'FontSize',10)
legend('Deneysel Sonuclar', 'Teorik Sonuclar')

```

EK 11- X-Kavşaklı Tip-1 100 µm Nozül Genişliğine Sahip Cihazda Elde Edilen Damlacık Çapı ile Damlacıklar Arası Mesafe Teorik ve Deneysel Çalışmalarının Karşılaştırması İçin Kullanılan MATLAB Kodu

```
clc
clear
close all
load('100tkanaldataolar_yeni.mat') %

X=capillarynumber;%akis hizi( Boyutsuz Capilar sayisi ifadesi)%
Y=DdropletDdevice;%Droplet diameter/Device Diameter%
ERR=stdevdiametern;
y1 = flowrateoiltotlmin;

for i=1: numel(y1)

    [a,b,c,d]=drop(y1(i)*2,100);

    theo_dia(i)=a;
    dia_comp(i)=b;
    ca(i)=c/4;
    theo_dist(i)=d;
end

%new figure
figure
hold on
errorbar(X,Y,ERR,'horizontal');
plot(ca,dia_comp)
xlabel('Kapiler Sayisi');
ylabel('D_{droplet}/D_{h}');
title('100\mum Kanal Genisligindeki X-Kavsak Cihazda Kapiler Sayisi
Damlacik Capi Arasindaki Iliski');
grid on
set(gca,'FontSize',10)

x = avgdropletdiametern;
y1 = flowrateoiltotlmin;
y2= flowratewaterlmin;
Err=stdevdiametern1;

%new figure
figure
hold on
[AX,H1,H2]=plotyy(x,y1,x,y1);
I = ~isnan(theo_dia);
scatter(theo_dia(I),y1(I),'b')
set(AX,'FontSize',10);
errorbar(x,y1,Err,'horizontal');
xlabel('Damlacik Capi (D_{droplet}) (\mum)');
ylabel('Toplam Yag Akis Hizi (Q_{yag}) (\mul/min)');
ylabel(AX(2),'Su Akis Hizi (Q_{su}) (\mul/min)')
```

```

title('100\mum Kanal Genisligindeki X-Kavsak Cihazda Akis Hizlari ile
Damlacik Capi Arasindaki Iliski');
grid on
set(gca,'FontSize',10)
legend('Deneysel Sonuclar','Teorik Sonuclar')

%new figure
figure
hold on
x2=avgdistancem;
y2=avgdropletiameterm;
scatter(x2,y2,55)
plot(theo_dist,theo_dia)
xlabel('Damlaciklar Arasi Mesafe (\mum)');
ylabel('Damlacik Capi (D_{droplet}) (\mum)');
title('100\mum Kanal Genisligindeki X-Kavsak Cihazda Damlaciklar Arasi
Mesafe ile Damlacik Capi Arasindaki Iliski');
grid on
set(gca,'FontSize',10)
legend('Deneysel Sonuclar','Teorik Sonuclar')

```

EK 12- X-Kavşaklı Tip-1 Cihazda Elde Edilen Damlacık Çapı Teorik ve Deneysel Çalışmalarının Karşılaştırması İçin Kullanılan MATLAB Kodu

```
clear
close all

load('25tkanaldataalar_yeni.mat') %

X=capillarynumber;%akis hizi( Boyutsuz Capilar sayisi ifadesi)%
Y=DdropletDdevice;%Droplet diameter/Device Diameter%
ERR=stdevdiameterm;

%new figure
figure
%errorbar(X,Y,ERR,'horizontal');
plot(X,Y);
xlabel('Kapiler Sayisi');
ylabel('D_{droplet}/D_{h}');
title('Teorik Hesaplama ile Cihaz Performanslarinin Karsilastirilmesi');
grid on

hold on
clear
load('50tkanaldataalar_yeni.mat') %

X=capillarynumber;%akis hizi( Boyutsuz Capilar sayisi ifadesi)%
Y=DdropletDdevice;%Droplet diameter/Device Diameter%
ERR=stdevdiameterm;

%errorbar(X,Y,ERR,'horizontal');
plot(X,Y);

clear

load('100tkanaldataalar_yeni.mat') %

X=capillarynumber;%akis hizi( Boyutsuz Capilar sayisi ifadesi)%
Y=DdropletDdevice;%Droplet diameter/Device Diameter%
ERR=stdevdiameterm;

%errorbar(X,Y,ERR,'horizontal');
plot(X,Y);
set(gca,'FontSize',10)

load('theo_device_100_deneme.mat')
scatter(ca,dia_comp,'r')
load('theo_device_50.mat')
scatter(ca,dia_comp,'r')
load('theo_device_25.mat')
scatter(ca,dia_comp,'r')
legend('25\mum Cihaz','50\mum Cihaz','100\mum Cihaz','Teorik
```

