EKSTRA ÇIKIŞLI VE REZERVUARLI BİR PEM YAKIT HÜCRESİ KANALINDAKİ DAMLACIK HAREKETLERİNİN VOF YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Arın Göksel ALTINTAŞ

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKSTRA ÇIKIŞLI VE REZERVUARLI BİR PEM YAKIT HÜCRESİ KANALINDAKİ DAMLACIK HAREKETLERİNİN VOF YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Arın Göksel ALTINTAŞ
0000-0002-5531-2090

Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
TERMODİNAMİK ANABİLİM DALI

BURSA – 2021
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans

EKSTRA ÇIKIŞLI VE REZERVUARLI BİR PEM YAKIT HÜCRESİ KANALINDAKİ DAMLACIK HAREKETLERİNİN VOF YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Arın Göksel ALTINTAŞ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Termodinamik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ

Fosil yakıtlarına alternatif ve temiz enerji arayışında önemli bir konu haline gelen PEM Yakıt Pilleri enerji taşıyıcı olarak hidrojeni kullanmakta ve ürün olarak su çıkarmaktadır. Eğer su PEM'den uzaklaştırılmaz ise madde geçişi ve reaksiyon bölgeleri azalır hücrenin verimliliği düşer. Öte yandan PEM kurutulursa proton geçirgenliği azalır ve yine performans kaybı yaşanır. Dolayısıyla su tahliyesi devamlı ve kontrollü şekilde sağlanmalıdır. PEMFC de su yönetimini sağlamanın bir yolu da kanal geometrisi tasarımını geliştirmektir. Bu çalışmada PEM kanalına eklenmiş ekstra bir çıkışın damlacık hareketine etkisi incelenmiştir. Eklenen çıkışa farklı bağıl basınçlar uygulanarak ve çeşitli durumlar modellenerek HAD analizi, ANSYS Fluent ortamında gerçekleştirilmiştir. İncelenen durumlar sonucunda çıkışa yakın hareketsiz damlacıkların hemen tahliye olduğu, hareket halindeki damlacıkların ise yalnız düşük bağıl basınçlarında ekstra çıkıştan tahliye olduğu saptanmıştır Ayrıca yerçekimi yönünün su tahliyesinde az bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: PEMFC, VOF, ANSYS, Fluent, HAD, Su, Su Yönetimi, Su damlacığı, Kanal, Hidrojen, PEMFC tarih, Yakıt Hücresi, Yakıt Pili,

2021, xiii + 141 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF DROPLET MOTIONS IN A PEM FUEL CELL CHANNEL WITH AN EXTRA OUTLET AND A RESERVOIR BY THE VOF METHOD

Arin Goksel ALTINTAS

Bursa Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Thermodynamics

Supervisor: Prof. Dr. Irfan KARAGOZ

PEM Fuel Cell has become an important topic in the search of clean, renewable energy sources. It uses hydrogen as an energy carrier and it produce water and electricity. If the produced water can't be evacuated from the cell, the transformation across the PEM could be blocked and/or reaction area would be decreased. On the other hand, if the PEM completly dry out, its proton conductivity would be lowered. Therefore, water management with a steady evacuation must be achieved in order to work PEMFC efficiently. One of the ways of achieving such water management is designing flow channels accordingly. In this work the water droplet movement in a PEMFC channel with an extra outlet is investigated with CFD analysis. A water droplet in the channels with two outlets are modelled in ANSYS Fluent, varying one of the outlets pressure, droplet size or the direction of gravitational accelerations in each case. As a result,it is observed that only the stationary droplets which are close to the extra outlet is discharged in no time. Lowering the gage pressure of extra outlet is needed to discharge non-stationary droplets. In addition, little effect of the direction of gravitational acceleration is seen.

Key words: PEMFC, VOF, ANSYS, Fluent, CFD, Water, Water Management, Water Droplet, Channels, Hydrogen, PEMFC History, Fuel Cells

2021, xii + 141 pages.

TEŞEKKÜR

Çalışma süremin sonunda edindiğim tecrübelere en başta sahip olmayı dilerdim...

Her zaman dingin ve anlayışlı olan, hiçbir zaman desteğini esirgemeyen değerli hocam ve tez danışmanım sayın Prof. Dr. İrfan Karagöz'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmayı 118M485 numaralı proje ile destekleyen TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Bana her konuda inanan anne ve babama teşekkürlerimi sunarım.

Arın Göksel ALTINTAŞ
14/06/2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ v
ŞEKİLLER DİZİNİ vii
ÇİZELGELER DİZİNİ x
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 5
2.1. Yakıt Hücrelerinin Araştırma Konusu Olma Sebepleri 5
2.2. PEM Yakıt Hücresi Çalışma Prensibi 7
2.3. PEMFC'de Su Yönetimi 9
2.4. PEMFC'de Kanal Tasarımının Su Atımına Etkisi 16
3. MATERYAL ve YÖNTEM 20
3.1. U Formunda Ekstra Çıkışlı Kanal Modeli 24
3.2. I Formunda Ekstra Çıkışlı Kanal Modeli 29
3.3. Analitik Çözüm Örneği 37
4. BULGULAR 43
4.1. U Şeklindeki Kanala Rezervuar Çıkışının Etkisi 43
4.2. I Şeklindeki Kanala Rezervuar Çıkışının Etkisi 51
5. TARTIŞMA ve SONUÇ 93
5.1. Tartışma 94
5.2. Sonuç 98
KAYNAKLAR 100
EKLER 104
ÖZGEÇMİŞ 141

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A	Kesit Alanı, Amper
C	Celcius, Sutherland Sabiti, Coulomb, Su konsantrasyonu
cm	Santimetre
D,d_h	Hidrolik çap
D_w	Difüzyon katsayısı
E	Enerji
F	Faraday sabiti, Kuvvet
f, f	Sürtünme katsayısı
$\vec{g}$	Yerçekimi ivmesi
h, h	Basma yüksekliği
I	Akım yoğunluğu
J	Su akısı
K, K	Geçirgenlik, iletkenlik katsayısı, Kelvin
kg	kilogram
Kmol	kilomol
kPa	kilopakcal
KW	Kilowatt
m	metre
Mm	milimetre
Mtoe	Million Tonnes of Oil Equivalent
ms	milisaniye
mV	miliVolt
N	Newton
n	Mol sayısı
ṅ	Madde akısı
$\widehat{n_w}$	Duvar normali birim vektörü
P	Kesit Çevresi, Basınç
Pa	Paskal
S	Kaynak terimi
T	Sıcaklık
t	Zaman
T_o	Referans Sıcaklığı
$\widehat{t_w}$	Duvar tanjantı birim vektörü
v	Vektörel hız
V	Hız(Sürat)
Z	Yükseklik
θ_w	Kontak açısı
σ_{ij}	Yüzey gerilimi
α	Hacim Oranı (Volüme Fraksiyonu)
κ_i	Curvature terimi
ρ	Özkütle
μ, υ	Dinamik viskozite
υ_o	Referans sıcaklıktaki viskozite değeri

Kısaltmalar	Açıklama
CCD	Charge Coupled Device
CFD	Computational Fluid Dynamics
CPU	Central Process Unit
CSF	Continium surface force
CL	Catalyst Layer
EIS	Electrochemical impedance spectroscopy
EOD	Elektro osmotik drag
FC	Fuel Cell
FEP	Fluorinated etylene propylene
GDL	Gas Diffusion Layer
IEA	International Energy Agency
MEA	Membrane Elektron Assembly
MR	Magnetic Resonance
MPL	Mikro Porous Layer
Nfm	Non Frozen Water
PEM	Proton Exchange Membrane
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PRESTO!	PREssure STaggering Option
PTFE	Polytetrafluoroethylene
Re	Reynolds sayısı
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations
SWP	Sweep
TWh	Terrawatt hour
URF	Under relaxation factor
VOF	Volume of Fluid
wt	Weight

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Dünyadaki karbon salınımının son yüz yıl içerisindeki değişimi (IEA 2018 değiştirilerek alındı.) 6
Şekil 2.2 PEMFC çalışma prensibini gösteren bir şema 7
Şekil 2.3. Kompozitler farklı yapılarla oluşturulabilir. 9
Şekil 2.4. Kontak açısını açıklayan bir gösterim 10
Şekil 2.5. Kontak açısı ve hidrofobi ilişkisi 10
Şekil 2.6. Kanal tasarımları: A. Serpentine B. Paralel C. Interdigitated D.Pin 13
Şekil 2.7 . U kanalda su damlasının deformasyonu 17
Şekil 2.8. Büküm noktasında su biçiminin değişmesi a)t=1.95s b)t=2s 17
Şekil 2.9. Birden çok damlacığın büküme çarpma anında hız vektörleri 18
Şekil 2.10. Farklı açılar ve kesit alanları ile su tahliyesinin geliştirilmesi 18
Şekil 3.1. U şeklinde rezervuar çıkışlı geometri 24
Şekil 3.2. Analizde kullanılan Ağ yapısı 25
Şekil 3.3 Sınır tabaka isimlendirilmesi 27
Şekil 3.4. Yalnız rezervuar bölümü geometri 29
Şekil 3.5 Yalnız rezervuar ağ yapısı 30
Şekil 3.6. Ağ yapısı sınırları isimlendirmesi 31
Şekil 3.7. Hız profili oluşturma kullanılan ağ yapısı 33
Şekil 3.8. Inletten belirli uzaklıklarda oluşan hız profilleri 34
Şekil 3.9 Farklı eleman sayılarının aynı çözüm ayarlarıyla incelenmesi sonucunda inletteki ortalama basınç grafiği 35
Şekil 3.10 U Kanalda Genişletilmiş Bernouilli denkleminde kullanılan noktalar 40
Şekil 4.1. Farklı Rezervuar çıkışı basınçlarında damlacık hareketleri a) 0 Pa b) -20 Pa c) -30 Pa d) -50 Pa 43
Şekil 4.2. Farklı rezervuar basınçları için Inletteki ortalama basıncın zaman bağlı değişimi (p:pressure) 45
Şekil 4.3. Farklı rezervuar basınçlarında damlacık yüzeyinde ortalama hız grafiği 46
Şekil 4.4 Farklı basınçlar için hız vektörlerinin farklı zamanlarda karşılaştırılması. a) 1ms b) 2ms c) 3ms d) 4ms 47
Şekil 4.5. Farklı rezervuar çıkışı basınçları için büküm eğrisindeki hız vektörleri a) 0 Pa b) -20 Pa c) -30 Pa d) -50 Pa 48
Şekil 4.6. Farklı rezervuar basınçlarında bölge geçiş noktalarındaki basınç kontürleri a)0 Pa b) -20 Pa c) -30 Pa d) -50 Pa 48
Şekil 4.7. Farklı rezervuar basınçlarında damlacık hareketi a) 50 Pa b) –(1/5) x Ana çıkış basıncı c) -2000 Pa d) -5000 Pa 49
Şekil 4.8. Rezervuar çıkışı 0 Pa iken damlacık hareketi 51
Şekil 4.9. Kanal merkezindeki basınç konturları a) 1ms'de b)4ms'de c) 6ms'de d) 8 ms'de 52
Şekil 4.10 Damlacık yüzeyi ve Sınır tabakalardaki hız ve basınç değişimi a) Hız b) Basınç 53
Şekil 4.11. Damlacık rezervuar bölgesindeyken oluşan hız vektörleri 53
Şekil 4.12. Rezervuar çıkışı 0 Pa iken akım çizgileri 54
Şekil 4.13. Rezervuar çıkışı 0 Pa iken damlacık hareketi (yukarı yerçekimi ivmesi) 55
Şekil 4.14. Rezervuar çıkışı 0 Pa iken Sınır Tabaka Hızları (Yukarı yerçekimi ivmesi) 56
Şekil 4.15. Rezervuar çıkışı 0 Pa iken Sınır Tabaka Basınçları (Yukarı yerçekimi ivmesi) 56

Şekil 4.16. Rezervuar çıkışı 0 Pa iken akım çizgileri (Yukarı yerçekimi ivmesi) 56
Şekil 4.17. Outlet-1 bağıl basıncı -250 Pa iken damlacık hareketi-1 57
Şekil 4.18. Outlet-1 bağıl basıncı -250 Pa iken damlacık hareketi-2 57
Şekil 4.19. Outlet-1 bağıl basıncı -250 Pa iken damlacık hareketi-3 58
Şekil 4.20. Outlet-1 bağıl basıncı -250 Pa iken hız vektörleri 59
Şekil 4.21. Outlet-1 bağıl basıncı: -250 Pa için sınır tabaka basınçları 60
Şekil 4.22. Outlet-1 bağıl basıncı: -250 Pa için sınır tabaka hızları 60
Şekil 4.23. Rezervuar çıkışı -250 Pa iken akım çizgileri 61
Şekil 4.24. Outlet-1 bağıl basıncı -500 Pa iken damlacık hareketi 62
Şekil 4.25. Outlet-1 bağıl basıncı -500 Pa'da basınç kontürü ve hız vektörleri 62
Şekil 4.26. Outlet-1 bağıl basıncı -500 Pa'da belirli zamanlardaki hız vektörleri 63
Şekil 4.27. Outlet-1 bağıl basıncı -500 Pa'da belirli zamanlardaki hız vektörleri-2 63
Şekil 4.28. Outlet-1 bağıl basıncı -500 Pa'da sınır tabaka hızları 64
Şekil 4.29. Outlet-1 bağıl basıncı -500 Pa'da sınır tabaka basınçları 64
Şekil 4.30. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi 65
Şekil 4.31. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken basınç kontürü 66
Şekil 4.32. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken belirli zamanlardaki hız vektörleri 67
Şekil 4.33. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka basınçları 68
Şekil 4.34. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka hızları 68
Şekil 4.35. Rezervuar çıkışı -1000 Pa iken akım çizgileri 68
Şekil 4.36. Outlet-1 bağıl basınç = -1000 Pa iken damlacık hareketi(damlacık tepede) 69
Şekil 4.37. -1000 Pa'da sınır tabaka basınçları (damlacık tepede) 69
Şekil 4.38. Outlet1: -1000 Pa'da sınır tabaka hızları (damlacık tepede) 69
Şekil 4.39. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi (damlacık dipte) 70
Şekil 4.40 Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka hızları (damlacık dipte) 70
Şekil 4.41 Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka basınçları (damlacık dipte) 70
Şekil 4.42. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi (yerçekimsiz) 71
Şekil 4.43. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken belirli zamanlardaki hız vektörleri(yerçekimsiz) 71
Şekil 4.44. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken basınç kontürü (yerçekimsiz) 71
Şekil 4.45. Rezervuar çıkışı -1000 Pa iken akım çizgileri (Yukarı yerçekimi ivmesi) 72
Şekil 4.46. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka basınçları (Yukarı yerçekimi ivmesi) 72
Şekil 4.47. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka hızları (Yukarı yerçekimi ivmesi) 72
Şekil 4.48. Outlet-1 bağıl basıncı -2000 Pa iken damlacık hareketi 73
Şekil 4.49. Outlet-1 bağıl basıncı -2000 Pa iken sınır tabaka basınçları 73
Şekil 4.50. Outlet-1 bağıl basıncı -2000 Pa iken sınır tabaka hızları 73
Şekil 4.51. Rezervuar çıkışı -2000 Pa iken akım çizgileri 74
Şekil 4.52. Outlet-1 bağıl basıncı 0 Pa iken damlacık hareketi 75
Şekil 4.53. Outlet-1 bağıl basıncı 0 Pa iken hız kontürü (inlet: Pressure inlet 5 Pa) 76
Şekil 4.54. Outlet-1 bağıl basıncı 0 Pa iken belirli zamanlardaki hız vektörleri (inlet: Pressure inlet 5 Pa) 76
Şekil 4.55. Outlet-1 bağıl basıncı 0 Pa iken sınır tabaka basınçları (Inlet: Pressure-inlet 5 Pa) 76
Şekil 4.56. Outlet-1 bağıl basıncı 0 Pa iken sınır tabaka hızları (Inlet: Pressure-inlet 5 Pa) 76

Şekil 4.57. Outlet-1 bağıl basıncı 0 Pa iken damlacık hareketi-1 (Damlacık yarıçapı 0.6mm) 77
Şekil 4.58. Outlet-1 bağıl basıncı 0 Pa iken damlacık hareketi-2(Damlacık yarıçapı:0.6mm) 77
Şekil 4.59. Outlet-1 bağıl basıncı 0 Pa iken sınır tabaka basınç ve hız kontürleri ve hız vektörleri (Damlacık yarıçapı 0.6 mm) 78
Şekil 4.60 Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi (Damlacık yarıçapı: 0.6mm) 79
Şekil 4.61. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi-2 (Damlacık yarıçapı: 0.6mm) 80
Şekil 4.62. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi-3 (Damlacık yarıçapı: 0.6mm) 80
Şekil 4.63. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi-4 (Damlacık yarıçapı: 0.6mm) 81
Şekil 4.64. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi t=38ms (Damlacık yarıçapı: 0.6 mm) 81
Şekil 4.65. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi ve hız vektörleri (Damlacık yarıçapı: 0.6mm) 82
Şekil 4.66. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken basınç kontürü(Damlacık yarıçapı: 0.6mm) 83
Şekil 4.67. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka basınçları (Damlacık yarıçapı: 0.6mm) 83
Şekil 4.68 Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka hızları 83
Şekil 4.69. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi-1 (Damlacık yarıçapı: 0.3mm) 84
Şekil 4.70. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi-2 (Damlacık yarıçapı: 0.3mm) 84
Şekil 4.71. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi ve hız vektörleri (Damlacık yarıçapı: 0.3mm) 85
Şekil 4.72. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken basınç kontürü (Damlacık yarıçapı: 0.3mm) 85
Şekil 4.73. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka basınçları (Damlacık yarıçapı: 0.3mm) 86
Şekil 4.74. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka hızları (Damlacık yarıçapı: 0.3mm) 86
Şekil 4.75. Outlet-1 bağıl basıncı 0 Pa iken damlacık hareketi (Birden fazla damlacık) 87
Şekil 4.76. Outlet-1 bağıl basıncı 0 Pa iken belirli zamanlardaki hız vektörleri (Birden fazla damlacık) 88
Şekil 4.77. Outlet-1 bağıl basıncı 0 Pa iken basınç kontürü ve hız vektörü 88
Şekil 4.78. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi (birden fazla damlacık) 89
Şekil 4.79 Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka hızları (Birden fazla damlacık) 90
Şekil 4.80. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi (su bandı) 91
Şekil 4.81. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken belirli zamanlardaki hız vektörleri (Su bandı) 92
Şekil 4.82. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka hızları (Su Bandı) 93
Şekil 4.83. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka basınçları (Su Bandı) 93

Şekil 5.1. Farklı basınçlarda kanaldaki su miktarının zamana bağlı değişimi 95
Şekil 5.2. Outlet-1 Bağıl basıncı -1000 Pa iken farklı koşullar için kanaldaki su miktarının zamana bağlı değişimi 96
Şekil 5.3. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken farklı damlacık boyutları için kanaldaki su miktarının zamana bağlı değişimi 97
Şekil EK1.1. Hidrojen üretim yöntemleri 107
Şekil EK2.1. William Robert Grove 108
Şekil EK2.2. Gaz Voltaik Pili 109
Şekil EK2.3. Grove Deneyi.....109
Şekil EK2.4. Christian Friedrich Schoenbein 110
Şekil EK2.5. Friedrich Wilhelm Ostwald 111
Şekil EK2.6. Ludwig Mond 111
Şekil EK2.7. Charles R. Alder Wright ve C. Thompson 112
Şekil EK2.8. Jacquesin Karbon pili 112
Şekil EK2.9. Emil Baur.....113
Şekil EK2.10. Francis Thomas Bacon 113
Şekil EK3.1. PEMFC ile çalışan bir otobüs.....114
Şekil EK3.2. HELIOS Hava Aracı.....115
Şekil EK3.3. Alkali Yakıt Hücresi.....116
Şekil EK3.4. Molten Carbonate Fuel Cell 116
Şekil EK3.5 Siemens Katıoksit Yakıt Jeneratör Sistemi 118
Şekil EK4.1. Transparan bir pil hücresi.....119
Şekil EK4.2. Nötron resimlemesi 120
Şekil EK4.3 MR Sağlık alanında yaygın olarak kullanılır.....121
Şekil EK4.4. Yakıt hücresinde su yönetimini geliştirmek için sıcaklığı düzenlemek a) Sıcaklığı değiştirerek voltaj kontrolü b ve c) Elde edilen pil rezistans eğrileri 124
Şekil EK4.5. Sıcaklık kontrolü ile geliştirilmiş pilin kontrolsüz pille voltaj karşılaştırılması 125
Şekil EK4.6. Basınç düşüşü ile pil su yönetimi kontrolü a) Basıncı değiştirerek su yönetimi b) Elde edilen pil rezistans noktaları c) Elde edilen pil rezistans eğrileri.....126
Şekil EK4.7. PEMFC hücresinin giriş bağıl nemliliği ile kontrolü a) Nemliliği değiştirerek pil kontrolü b) Elde edilen rezistans sonuçları 127
Şekil EK5.1. Bir hava aracına uygun ağ yapısı oluşturulması.....128
Şekil EK5.2. Ağ yapısı kalite parametreleri a) Orthogonal quality b) Skewness c) Aspect Ratio 128
Şekil EK5.3 Ağ yapısı etkisi incelemede kullanılan geometri.....130
Şekil EK5.4. Ağ yapısı elemanlarına bağlı bükümdeki kesit alanı görünümleri.....131
Şekil EK5.5 Geometrideki sınır tabakalarının isimlendirilmesi 132
Şekil EK5.6. Damlacık yolu 133
Şekil EK5.7. Inletin ortasındaki bir noktada farklı ağ yapıları için basınç değişimi 133
Şekil EK5.8. Tüm durumlar için çözücü ayarları 134
Şekil EK5.9. Aynı eleman sayılı ağ yapısının farklı çözücü ayarları ile verdiği sonuçlar 135
Şekil EK5.10 Farklı ağ yapısı eleman sayısındaki sonuçların incelenmesi 136
Şekil EK5.11 Ağ yapısı A: Shared Topology 490974 node sayılı ağ yapısı 137
Şekil EK5.12 Ağ yapısı B: Non-shared Topology 497813 node sayılı ağ.....137
Şekil EK5.13 Ağ yapısı A ve Ağ yapısı B karşılaştırılması 139

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Enerji üretiminde ve yalnız elektrik enerjisi üretiminde kullanılan kaynakların payları, zamana bağlı değişimi ve 2017-18 yıllarındaki büyüme oranları (IEA 2018'den değiştirilerek alınmıştır.) 5
Çizelge 2.2. Quan ve diğerlerinin tarafından incelenen durum koşulları 16
Çizelge 2.3. Liu ve diğerleri tarafından incelenen durumlar 19
Çizelge 3.1. Ağ yapısı kalite değerleri 26
Çizelge 3.2 Yalnız rezervuar Ağ yapısı kalite değerleri 30
Çizelge 3.3 İncelenen durumlar için çözücü ayarları, başlangıç ve sınır koşulları 36
Şekil 4.1 Damlacık yüzeyi ve Sınır tabakalardaki hız ve basınç değişimi a) Hız b) Basınç 53
Çizelge 4.2. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka basınçları (Damlacık yarıçapı: 0.6mm) 83
Çizelge 4.3 Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka hızları 83
Çizelge 4.4. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka hızları (Su Bandı) 93
Çizelge 4.5. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka basınçları (Su Bandı) 93
Çizelge 5.1 Outlet bağıl basıncı 0 Pa için analitik ve numerik çözümlerin karşılaştırılması 94
Çizelge EK5.1.Eleman sayısının eleman boyutuna göre değişimi 131
Çizelge EK5.2. İncelenen durumlar için kalite parametreleri 131
Çizelge EK5.3. Aynı eleman sayılı ağ yapısından farklı çözücü ayarları ile analiz gerçekleştirilmesi 134
Çizelge EK5.4 Ağ yapısı eleman sayısına bağlı sonuç değişimi incelemesi: Çözücü ayarları 136
Çizelge EK5.5 Ağ yapısı A ve Ağ yapısı B kalite değerleri 138

1. GİRİŞ

Yirmi birinci yüzyılın başlarında -halen-, toplam enerji ihtiyacı büyük oranla fosil yakıtlarından karşılanmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansının (IEA, *International Energy Agency*) yayınladığı 2018 verilerine göre, dünyanın enerji talebinin yalnızca yüzde on beşi[1] yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Geriye kalan kalan yüzde seksen beşlik dilim[2] yenilenebilir olmayan kaynaklardan karşılamaktadır. Yalnızca elektrik enerjisinin üretiminde kullanılan kaynakların yüzde altmış dördü yenilenebilir olmayan kaynaklardır. (International Energy Agency, 2019)

Oysa yenilebilir enerjiye yönelim bir gerekliliktir. Öte yandan fosil yakıtlarına yalnızca belirli ülkeler sahiptir ki bu durum diğer ülkeleri alternatif enerji kaynakları arayışına itmiştir. Ayrıca fosil yakıtlarının bir süre sonra tükeneceğini öngörenler de vardır. (Singh & Singh, 2012)

1960'lı yılların sonunda, karbon salınımının dünyamız için büyük bir tehdit olduğu anlaşılmıştır. Hava kirliliği, sanayi devrimiyle birlikte hızla artmıştır.

Bu konudaki farkındalığın artması için çeşitli kampanyalar yürütülmüş ve sonucunda hükümetlerce karbon salınımı konusunda belirli kısıtlamalar getirilmiştir. Bazı uluslararası antlaşmalar ile karbon artışının kontrolde tutulması hedeflenmektedir. Örneğin: Türkiye Cumhuriyeti 2015 yılında emisyonu azaltmayı ve yenilenebilir enerjiye yönelmeyi hedefleyen Paris Antlaşmasını katılmıştır. Ne yazık ki, alınan tüm önlemlere rağmen, 2018 yılında dünya ekonomisinin büyümesi ile karbon salınımı da yılda yüzde iki oranında artarak son beş yıllın en yüksek değişim oranına ulaşmıştır. (Boden, Marland, & Andres, 2019)

[1] Yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji üretimindeki payları şu şekildedir: %10 biokütle ve atık, %3 hidrolik enerji, %2 diğer kaynaklar. (IEA 2018)

[2] Yenilenebilir olmayan enerji kaynaklarının toplam enerji üretimindeki payları şu şekildedir: yüzde yirmi altı kömürden elde edilen enerji, yüzde otuz bir petrol enerjisi, yüzde yirmi üç doğal gaz enerjisi, yüzde beş nükleer enerji. (IEA 2018)

Yenilenebilir enerjinin günümüze hemen adapte edilememesinin ana sebebi, bu kaynakların fosil yakıtları gibi sürekliliğinin sağlanamamasıdır. Açıklamak gerekirse, bir varil petrol kolayca depolanıp istenildiği zaman kullanılabilirken, rüzgâr enerjisiyle üretilen elektrik uzun süre depolanamamaktadır. Ayrıca bu kaynaklardan elde edilen enerji miktarları değişkendir ve kolaylıkla tahmin edilememektedir.

Enerji konusunda aşılması gereken iki ana zorluk vardır. Birincisi, üretilen enerjiyi minimum kayıpla ve azami miktarda depolayabilmektir. İkincisi ise, fosil yakıtlarına alternatif olacak daha temiz ve ulaşılabilir bir yakıt bulabilmektir. İşte bu misyon ile alakalı olarak yakıt hücreleri son yirmi yılın en çok araştırılan konularından biri olmuştur.

Yakıt hücreleri, enerji taşıyıcı olarak hidrojen kullanan, elektrolizi tersine çalıştırma mantığıyla su oluşturarak elektrik enerjisi üreten araçlardır. Fosil yakıtlarına göre doğaya karşı zararsızlardır. Ancak günlük hayatta bireysel olarak kullanılabilmeleri için tasarımsal olarak daha fazla geliştirilmeleri gerekmektedir.

Geliştirmeye açık pek çok noktaları bulunmaktadır; materyal, geometri, verimli operasyon parametreleri ve kontrol metotları bu noktalara örnektir.

Yakıt hücrelerinin (FC, *Fuel Cells*) çeşitli türleri vardır. Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) bunlardan biridir. PEMFC'ler diğer FC'lere göre daha düşük sıcaklıkta çalışırlar ve portatiflerdir. Ayrıca soğuk başlangıç yapabilmektedirler. Bu yüzden özellikle ulaşım endüstrisinde kullanılmak üzere geliştirilmektedirler.

PEMFC'ler de diğer FC'ler gibi ürün olarak su ve enerji oluşturmaktadır. Ancak düşük çalışma sıcaklığı nedeniyle oluşan su sıvı halde hücre içerisinde birikebilmektedir. Bu durum PEMFC'lerin verimliliklerinin düşmesine hatta zaman içerisinde boğulup çalışmamalarına sebep olabilmektedir. Öte yandan PEMFC'lerin ana parçalarından biri olan Membrane (*Zar*) (*teknik ismi Proton Exchange Membrane*) nemli tutulmadığında (kuruduğunda) proton geçirme özelliğini kaybetmektedir. Bu da PEMFC'de performans düşüşüne sebep olmaktadır.

Sonuç olarak PEMFC'de oluşan su atımının, devamlılığı ve yeterliliği sağlanmalıdır. Ancak seçilen yöntem sonucunda su atımı hücreyi kurutacak derecede şiddetli olmamalıdır.

Bu su atımını sağlamak için önce PEMFC'deki su oluşumunu ve aksamlar arasındaki su transferini iyice anlamak gerekmektedir. Ijaodola ve diğerleri, PEMFC de su döngüsü konusunda geniş çaplı bir çalışma yapmışlar ve su oluşumunu etkileyen faktörlerden, su oluşumunun tespit ve takip metotlarına kadar pek çok konuya çalışmalarında yer vermişlerdir. (Ijaodola, ve diğerleri, 2019)

Bu bahsedilen faktörlerden biri kanal tasarımıdır. Kanal tasarımında en popüler üç metot sırasıyla serpentine (*yılansı*, dallanma olmayan tasarım), paralel(kanal sonlarında dallanma ve geçiş olan tasarım) ve interdigitated(çok sayıda dallanma olan geçişsiz tasarım)'dır. Serpentine metodu en az basınç kaybı sağlanan tasarımlardan biri olduğu için zamanın en popüler tasarımıdır.[3]

Quan ve diğerleri, U formunda[4] bir kanalda damlacık hareketini CFD ortamında incelemişler ve büküm noktasının damlacık hareketlerini ciddi bir şekilde etkilediğini gözlemlemişlerdir. (Quan, Zhoua, Sobiesiak, & Liu, 2005)

Liu ve diğerleri, kanalın büküm noktasındaki geometriyi değiştirerek, bu değişikliklerin su atımını nasıl etkilediğini incelemişler ve büküm noktasındaki dış duvara hafif bir eğim vermenin su atımına yardımcı olabileceğini gözlemlemişlerdir. (Liu, Tan, Cheng, & Yang, 2018)

Bao ve Gan, kanal duvarı yapısının hidrofobisinin ve pürüzlülüğünün su atımına etkisini incelemişler ve suyun -zamansal ve biçimsel manalarda- oluşma, gelişme, yuvarlanma kalkma, parçalanma gibi çeşitli evrelerde incelenmişlerdir. Onlar pürüzlü yapıdaki kanalların su atımına pozitif etkide bulunduğunu gözlemlemişlerdir. (Bao & Gan, 2020)

PEMFC'lerin optimize edilmesi için bu ve benzeri tasarımsal çalışmalara ihtiyaç vardır. Bu çalışmada PEMFC'ler hakkında bilgiler derlenmiş, PEMFC'lerde su aktarım mekanizmaları ve su yönetiminin neden önemli olduğu açıklanmaya çalışılmıştır. Su yönetiminin sağlanabileceği öne sürülen metotlara değinilmiştir.

[3] Serpentineden daha başarılı olduğu iddia edilen ancak daha az popüler olan metotlar vardır. (Örneğin Akım kanalı olarak Metal Foam Kullanılması)

[4] U formu serpentine kanalın yapıtaşıdır. Serpentine kanal birden çok U formundaki kanalın uç uca eklenmesiyle oluşmaktadır

Bu metotlardan biri olabilecek bir yöntem olarak kanala ekstra bir rezervuar çıkışı konulması tahmin edilmiş, bu konulan çıkışın damlacık hareketine ne şekilde etki ettiği ANSYS FLUENT ortamında ‘Computational Fluid Dynamics’ (CFD) analizleri yapılarak incelenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Yakıt Hücrelerinin Araştırma Konusu Olma Sebepleri

Dünyanın enerji ihtiyacının çoğu fosil yakıtlarından karşılanmaktadır. Aşağı verilen tablo (Çizelge 2.1) IEA web sitesinden alınmıştır. Çizelge 2.1'den görülebileceği üzere yenilebilir enerji kaynaklarının ve nispeten temiz olan doğalgazın toplam enerjiyi karşılamadaki payında bir artış gözlenmektedir. Ancak temiz enerji kullanım oranı halen düşüktür.

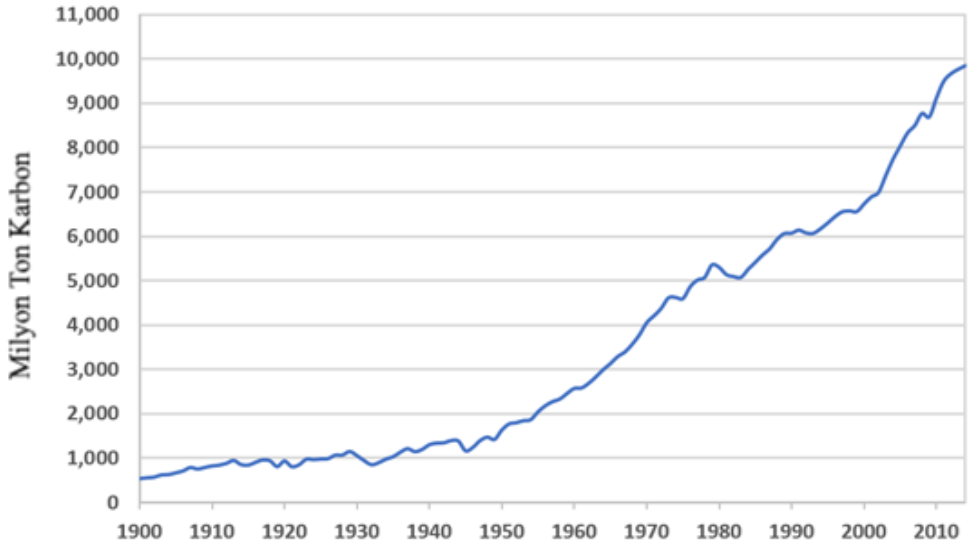
Çizelge 2.1. Enerji üretiminde ve yalnız elektrik enerjisi üretiminde kullanılan kaynakların payları, zamana bağlı değişimi ve 2017-18 yıllarındaki büyüme oranları (IEA 2018'den değiştirilerek alınmıştır.)

Küresel enerji talebi ve elektirik üretiminin kaynaklara göre dağılımı

Enerji Talebi (Mtoe)		Büyüme Oranı (%)	Payı (%)	
	2018	2017-2018	2000	2018
Toplam birincil Enerji Talebi	14 301	2.3%	100%	100%
Kömür	3 778	0.7%	23%	26%
Petrol	4 488	1.3%	36%	31%
Doğal Gaz	3 253	4.6%	21%	23%
Nükleer	710	3.3%	7%	5%
Hidro	364	3.1%	2%	3%
Biokütle ve atık	1 418	2.5%	10%	10%
Diğer yenilenebilirler	289	14.0%	1%	2%

Elektrik Üretimi (TWh)		Büyüme Oranı (%)	Payı(%)	
	2018	2017-2018	2000	2018
Toplam Üretim	26 672	4.0%	100%	100%
Kömür	10 116	2.6%	39%	38%
Petrol	903	-3.9%	8%	3%
Doğal Gaz	6 091	4.0%	18%	23%
Nükleer	2 724	3.3%	17%	10%
Hidro	4 239	3.1%	17%	16%
Biokütle ve atık	669	7.4%	1%	3%
Rüzgar	1 217	12.2%	0%	5%
Güneş Enerjisi	570	31.2%	0%	2%
Diğer Yenilenebilirler	144	4.2%	0%	1%

Fosil yakıtlarının belirli ülkelerin kontrolü altında bulunması, diğer ülkeleri alternatif enerji arayışına itmiştir. Bundan da önemlisi fosil yakıtları tüketiminde gerçekleşen karbon salınımıdır. Şekil 2.1 incelenerek son asırda artan enerji ihtiyacı ile karbon salınımının ne kadar ciddi boyutlara ulaştığı görülebilir (IEA 2018).



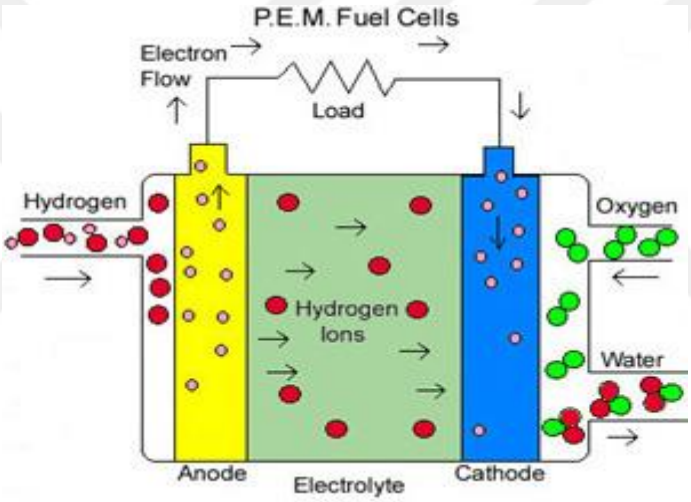
Şekil 2.1 Dünyadaki karbon salınımının son yüz yıl içerisindeki değişimi (IEA 2018 değiştirilerek alındı.)

FC'lerin çalışması sonucunda çıkan ürün sudur. Bu yüzden FC'ler çevre dostudur denebilir. Standart bataryalara göre daha yüksek spesifik güç sağlamaktadırlar.[5] FC'ler yakıt olarak hidrojen kullanırlar. Hidrojen yer yüzünde en bol bulunan elementlerden biri olduğu halde (bir diğeri karbondur), saf halde doğada bulunmamaktadır. Ama pek çok maddede bileşik olarak bulunmaktadır. Periyodik tablonun başında yer alan hidrojen kütlesel olarak en yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Ancak hidrojen bir yakıttan ziyade, bir enerji taşıyıcı olarak düşünülmelidir. (Avcıoğlu, 2017) Hidrojen hakkında bazı kısa bilgilere ulaşmak için EK-1 kısmına bakılabilir.

[5] Enerji yoğunluğu hidrojen 140MJ/kg, benzin 48.6MJ/kg. Hacimsel olarak ise hidrojen enerji oranı düşüktür: hidrojen 8451MJ/m3, benzin 31150MJ/m3.

2.2. PEM Yakıt Hücresi Çalışma Prensibi

FC'lerden biri olan Proton Exchange Membrane (veya Proton Electrode Membrane: PEM) yakıt hücresinin çalışma prensibi şu şekildedir: Şekil 2.2'de anot ile katot arasındaki elektrolit olarak gözüken kısım Membrane Electrode Assembly (MEA) şeklinde isimlendirilir. Membrane yarı geçirgen (seçici) zar şeklinde, yalnızca pozitif yüklü protonların geçmesine olanak sağlar. Elektronları ve ağır gazları geçirmeyen özel bir yapıdadır. Anottan bu özel Membrane yapısına gelen hidrojen atomları burada proton ve elektronlarına ayrılır. Protonlar MEA'dan geçerek katotta oksijen ile birleşir ve suyu oluşturur. Elektronlar da dışarıdan bir devre ile katoda geçer ve kimyasal denge sağlanır. İşte bu elektron akışı devrede bir elektrik yükü oluşturmaktadır.



Şekil 2.2 PEMFC çalışma prensibini gösteren bir şema

Gerçekleşen reaksiyonlar şöyledir:

Anot kısım: $H_2 \longrightarrow 2H^+ + 2e^-$

Katot kısım: $\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2O$

Toplam reaksiyon: $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow H_2O$

Bu reaksiyonlar sonucunda kullanılabilir bir akım (veya voltaj) elde edilmektedir.

EK 2 kısmında FC'lerin ortaya çıkışı hakkında ayrıntılı bilgiye ulaşılabilir.

Elektrolit olarak Membrane'i kullanan PEMFC diğer yakıt pillerine göre nispeten düşük bir sıcaklıkta (yaklaşık seksen derece sıcaklıkta) çalışır. Katalizör olarak Membrane'in her iki yanında da platinyum kullanılmaktadır. Hidrojen anotta elektronlarını bırakmış pozitif yüklü bir iyon (proton) olarak Membrane'den katoda geçer. Elektronlar da dış devre ile katoda geçer.

Oksijen, hidrojen ve katot kimyasal reaksiyonla su oluştururken dış devreden de elektrik gücü sağlanmış olur.

PEMFC'nin verimliliği yüzde kırk ile elli arasındadır. Düşük sıcaklıkta çalıştığı için hidrojeni doğrudan bir hidrokarbon yakıtından çekemez, hidrojenin önceden ayrı bir yöntemle ayırılması gerekir. Kullanılan PEMFC üniteleri 50 kW güçle çalışabilirken, 250kW'a kadar güç sağlayan üniteler de geliştirilmektedir.

PEMFC'nin kullanıldığı çalışmalar ve diğer FC'ler ile karşılaştırılması konusunda ek bilgilere EK-3 kısmında ulaşılabilir.

PEMFC'nin avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Yüksek güç yoğunluğu
- Hızlı başlangıç
- Değişken yüklere karşı seri duyarlılık
- Düşük çalışma sıcaklığı
- Soğuk başlangıç koşullarına uyum
- Sıfır emisyon
- Basit tasarım
- Portatiflik

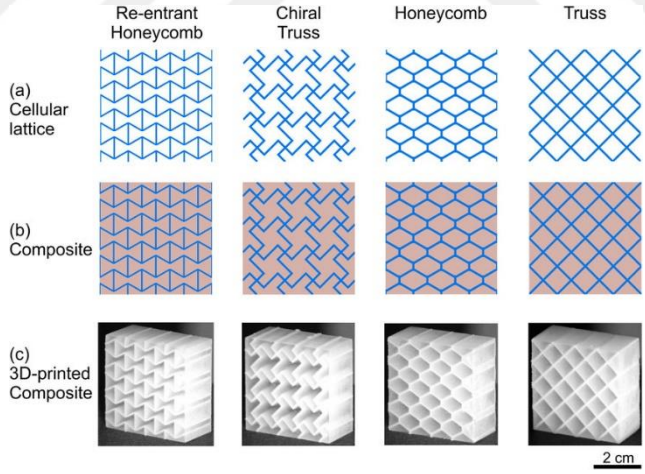
Bu özelliklerden dolayı otomotiv ve taşınabilir enerji talep eden diğer sektörler için gözde güç kaynaklarından biri olacağı tahmin edilmektedir. Öte yandan PEMFC'nin yaygınlaşması için performansının arttırılması ve maliyetin düşürülmesi gerekmektedir. Bunu başarmak için PEMFC her yönüyle optimize edilmeye çalışılmaktadır.

2.3. PEMFC'de Su Yönetimi

Membrane bölümü ancak doygun nemli ortamlarda iyi bir proton aktarımı sağlamaktadır. Bir yandan Membrane'in pozitif iyon iletimi sağlaması için nemli tutulması gerekmekteyken, diğer yandan suyun, Gas Diffusion Layer (GDL, Gaz difüzyon tabakası)'de fazla birikmesi neticesinde gözenekli yapı kısmen veya tamamen kapanabilmektedir. GDL'deki gözenekler tıkandığı zaman tepkimeye girecek moleküller, katalizör katmanına ulaşamamakta ve PEMFC performansı ciddi şekilde düşmektedir.

Bir PEMFC hücresinin optimum şekilde çalışması için hem su tahliyesi devamlı olarak sağlanmalı hem de Membrane kurutulmamalıdır. Bu yüzden PEMFC'de su aktarımı üzerine araştırmalar yürütülmektedir. Çünkü su dengesini optimize etmek için kanallardaki su dinamiklerini iyice anlamak gerekmektedir.

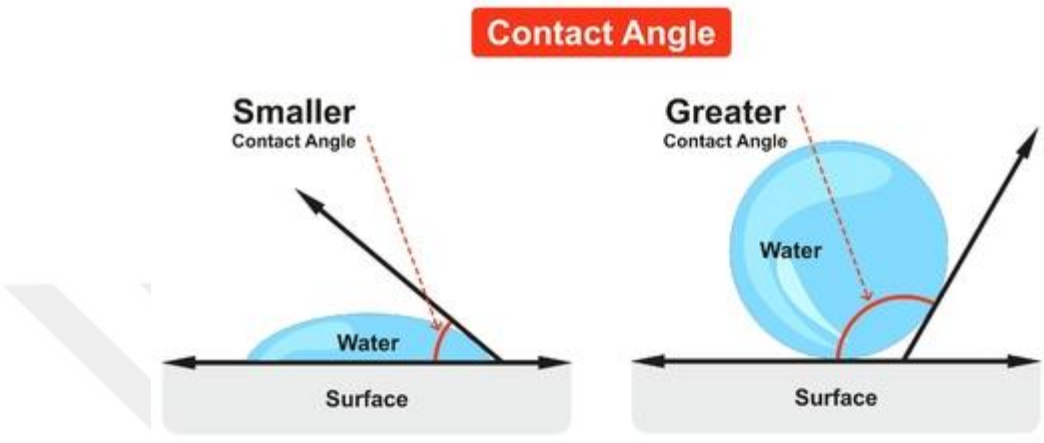
Ijaodola ve diğerleri, yakıt pillerinde su iletimi konusunda pek çok çalışmayı derleyip kapsamlı bir çalışma ortaya koymuşlardır. (Ijaodola, ve diğerleri, 2019) Bu bölümde yaptıkları çalışmadan yararlanılıp PEMFC yakıt hücresindeki su yönetimi konusunda bilgiler verilmiştir.



Şekil 2.3. Kompozitler farklı yapılarla oluşturulabilir.

GDL ve kanalı oluşturan materyalin fiziksel özellikleri su atımını etkiyebilir. GDL bir kompozit olarak üretildiğinde mikro yapısı "crisscross", "directional", "parallel", "orthogonal" şekiller de oluşturulabilir. Şekil 2.3'de bazı kompozit yapı örnekleri gösterilmiştir.

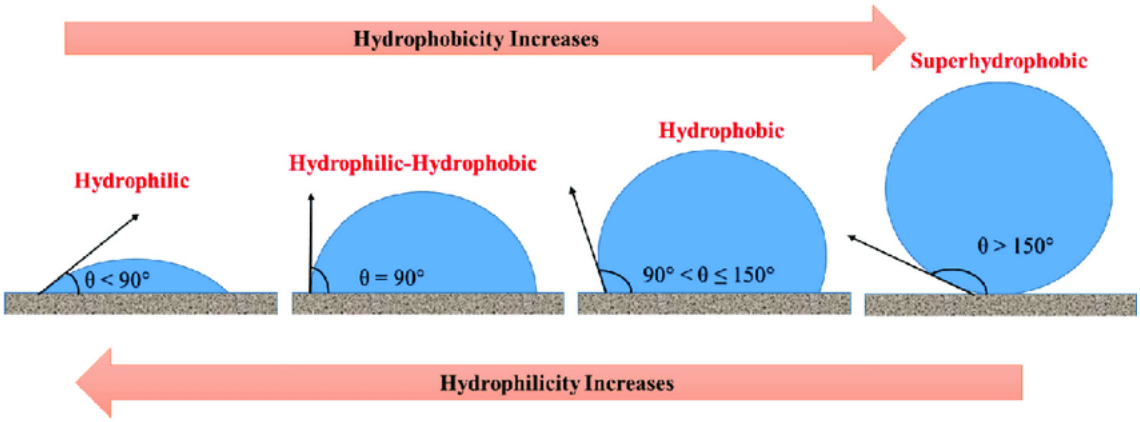
Fiziksel parametrelerden hidrofobi (ve hidrofili) su aktarımını etkimektedir. Hidrofobik materyaller suyu bulundukları bölgeden iterken, hidrofilikler suyu üzerlerine çekmektedir. Bu özellikler sayesinde su hareketi yönlendirilebilmektedir.



Şekil 2.4. Kontak açısını açıklayan bir gösterim

Bir materyalin ıslanırlığı (*wettability*), o materyal yüzeyindeki su damlasının sınır tabakasının, materyal yüzeyi ile oluşturduğu kontak açısına bağlıdır. Bu açı geniş olduğu zaman su damlası yüzeyden çok daha kolay uzaklaştırılabilmektedir.

Suyla daha yüksek kontak açıları oluşturabilmesi için GDL Polytetrafluoroethylene (PTFE) veya Fluorinated etylene propylene (FEP) gibi maddelerle kaplanabilir. Bu maddeler su damlaları ile yüzey arasındaki kontak açısını arttırarak su atımını kolaylaştırır ve damlacık oluşumunu etkiler. PTFE kaplaması damlacıkların daha ufak şekilde atılmasına yardımcı olur.



Şekil 2.5. Kontak açısı ve hidrofobi ilişkisi

Kullanılan materyal özellikleri dışında, hava akım hızı, sıcaklık, basınç ve reaktanların nem oranları gibi operasyon parametreleri de su dinamikleri üzerinde etkilidir.

Son olarak geometrik özellikler su atımını doğrudan etkilemektedir. Özellikle kanal modeli (pin, paralel, serpentine, integrated, interdigidated vb.) ve diğer tasarım parametreleri su atımının sağlanmasında etkilidir.

Katot kısımda gerçekleşen reaksiyon sonucunda su oluşmaktadır.

Katot kısım: $\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2O$

Bu su anottan katoda geçen protonlarla birlikte sürüklenerek katotta birikebilmektedir. Su tahliyesi yeteri kadar hızlı olmadığı zaman su birikmekte ve sızmaya başlamaktadır. Bunun sonucunda GDL'deki gözenekler kısmen veya tamamen tıkanabilmekte ve dolayısıyla reaktanlar kataliz bölgeye ulaşamamaktadır.

PEMFC'de su iletim mekanizmaları şunlardır:

- Geriye Difüzyon
- Hidrolik Permutasyon
- Termal Ozmotik Sürüklenme
- Elektro Ozmotik Sürüklenme

Katotta biriken fazla suyun anoda geçişi geriye difüzyon (*back diffusion*) denen terim ile açıklanır. Suyun katotta anottan daha fazla bulunması sebebiyle su, membraneden anota geçebilmektedir. Geriye difüzyon, su gradyeninin yanı sıra, membrane kalınlığı ve basınç gibi diğer değişkenlere bağlı değişmektedir. Hidrolik permutasyon (*Hydrolic permutation)* anot ve katot arasındaki basınç farkından dolayı suyun membraneden geçişidir. Eğer membrane yeterli mekanik kuvvete sahipse ve hidrolik permutasyon kullanılarak da katottaki su miktarı azaltılabilir.

Protonlar membraneden katoda geçerken su moleküllerini sürükler. Buna elektro ozmotik sürüklenme (EOD, *electro-osmotic drag*) denir. Yoğunluk ve basınç farkı olmadan bir mol protonun kaç mol suyu beraberinde geçirdiği EOD katsayısını verir. EOD katsayısını belirlemek için Nafion Membrane'de (-en yaygın kullanılan Membrane türü Nafiondur-) çalışmalar yapılmıştır. EOD katsayısının su miktarına ve sıcaklığa bağlı olarak değiştiği

görülmüştür. Yüksek sıcaklıkta bu katsayının daha da yüksek olduğu tespit edilmiştir. Termal osmotik sürüklenme (*Thermal Osmotic Drag)* sıcaklık farkından dolayı gerçekleşen su transferidir. Yapılan çalışmalarda suyun soğuk bölgelerden sıcak bölgelere doğru geçtiği görülmüştür. Özellikle pilin başlama ve bitiş zamanlarında belirli hale gelmektedir. (Ijaodola, ve diğerleri, 2019)

Membranedeki su akısı $J_{nmw,hyd}$ (kmol m^{-2} s^{-1}) Denklem 2.1'de basınç gradyeni ile bağdaştırılmıştır.

$$J_{nfw,hyd} = -c_{nfw}\frac{K_{nfw}}{\mu_{nfw}}\nabla p_{nfm} \tag{2.1}$$

c_{nfw} = Donmamış su konsantrasyonu

K_{nfw} = Geçirgenlik

μ_{nfw} = Dinamik viskozite

p_{nfm} = Basınç

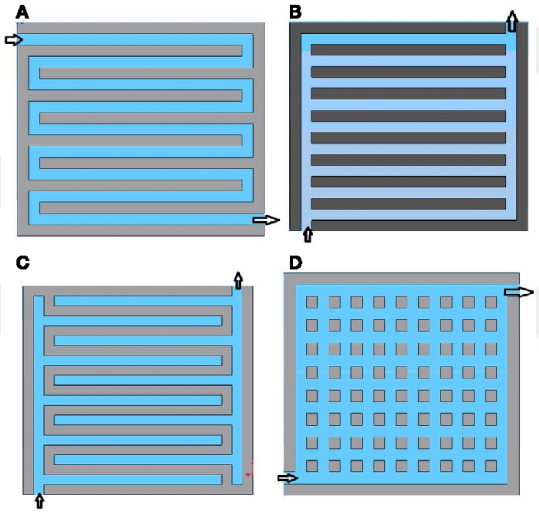
Denklem 2.1'den anlaşılabileceği üzere basınç gradyeni değişiminin büyüklüğü ve geçirgenlik, su akısını arttırmaktadır. Suyun viskozitesinin yüksek olması ise akıyı düşürmektedir. Ayrıca karışımdaki su oranı yükseldikçe akı artar. Formüldeki eksi işaret suyun yüksek basınç bölgelerinden düşük basınç bölgelerine geçmesi sebebiyle konulmuştur.

PEMFC çalıştıkça su miktarı zamanla artmaktadır. Diğer pil hücrelerine kıyasla düşük sıcaklıkta çalışan PEMFC'nin bu niteliği suyun atımını daha da zor hale getirmektedir. Çünkü su sıvı halde daha da zor tahliye edilmektedir. Yüz derece altındaki çalışma koşullarında su katot GDL kısımda birikmektedir. Suyun birikmesi ile hem oksijen alımı azalmakta hem de reaksiyon bölgeleri (kataliz bölgeleri) bloke olmaktadır. Bu da akım ve voltaj düşüklüğüne sebep olmaktadır. Bu yüzden suyun, GDL'den kanala geçmesi ve buradan atılması gerekmektedir.

Su birikimini engellemek için tedbirler alınmalıdır ancak bu tedbirler hücreyi tamamen kurutacak bir düzeyde olmamalıdır.

Su birikimi kanallarda olabilmektedir. Kanallardaki su birikimini etkileyen bazı faktörler şunlardır: Kanalın yapıldığı materyal, operasyon koşulları, kanalın tasarımı.

Kanal tasarımlarındaki en popular üç metot paralel, interdigitated ve serpentinedir. Paralel tasarımda kanallar GDL boyunca çeşitli kollara ayrılmaktadır. Bu kollar çıkış tarafında birleşmektedir. Bu tasarımda giriş kısmından giren madde doğrudan pek çok yöne dağılmaktadır. Bu da ciddi basınç düşümüne sebep olmaktadır. Dolayısıyla su atımı da zorlaşmaktadır. Ayrıca maddenin kanallara eşit olarak dağılımını sağlamak da zordur. Bu yüzden paralel tasarım genelde akımın fazla olduğu basınç düşüşünün istendiği durumlarda tercih edilmektedir.



Şekil 2.6. Kanal tasarımları: A. Serpentine B. Paralel C. Interdigitated D.Pin

Interdigidated kanalda kanallar birbirine seri bir şekilde bağlı değildir. Paralel dizayndan farklı olarak giriş ve çıkıştan ayrılan kolların hepsi değilse çoğunluğu kapalı bitimlere sahiptir. Bu tasarımda konveksiyon yoluyla reaktanların kataliz bölgeye taşınması sağlanmaktadır. Basınç düşüşü oldukça fazladır. Kanalda ilerledikçe de reaktan konsantrasyonu azalmaktadır. Su atımı da zayıftır.

Serpentine tasarımda ise kanal tek bir yolu takip ederek çıkışa ulaşmaktadır. Dallanma olmadığı için basınç kaybı azdır. Bu durum su atımı daha güçlü hale getirmektedir. Bu sebeple en çok tercih edilen tasarımlardan biridir. Ancak kanal boyunca ilerlendikçe hem basınç düşmekte hem de reaktan konsantrasyonu azalmaktadır.

Membrane ’de su aktarımı çeşitli mekanizmalar ile gerçekleşmektedir. Elektrolitteki asit grubu H^+ iyonlarını çekmektedir. Bu iyonlar membraneden geçerken suyu da sürüklemektedirler. Öte yandan elektrolitte asit grubunun (H^+) fazla olması membrane’in mekanik özelliklerinin zayıflamasına yol açmaktadır.

Hücrede su oluşumu hızlı olduğunda, bir miktar su membrane’e çekilmektedir. Bu su, proton geçimine karşı direnç oluşturmaktadır.

Su, hem gaz hem sıvı olarak Membrane geçebilmektedir.

Su direk membrane üzerinde de oluşabilmektedir. Su, katottan anoda difüzyon ile, anottan katoda ise elektro-ozmotik basınç ile geçmektedir. Membrane ’deki su aktarımının başrolündeki difüzyondaki kütle transferi aşağıda verilen Fick Kanunu ile ifade edilebilir.

$$\dot{n}_{H_2O,m,backdiff} = D_w \frac{dc_w}{dy} = \frac{1}{t_m} \int_{c_w^{anot}}^{c_w^{katot}} D_w dy \tag{2.2}$$

D_w[cm^2s^{-1}] difüzyon katsayısı, c_w[mol cm^{-3}] su konsantrasyonu, t_m[cm] de dik uzaklıktır.

Anottan katoda su geçimine sebep olan elektro ozmotik sürüklenme ise şöyle ifade edilebilir.

$$\dot{n}_{H_2O,m,osmotic} = n_d \frac{i}{F} \tag{2.3}$$

n_d [$mols^{-1}cm^{-2}$] bir proton tarafından geçirilen su miktarı

F[$Cmol^{-1}$] Faraday sabiti

i[Acm^{-2}] akım yoğunluğudur.

Su sıvı halde olduğunda ozmotik sürüklenme çok olmaktadır. Ayrıca EOD katsayısı su miktarı arttıkça artmaktadır.

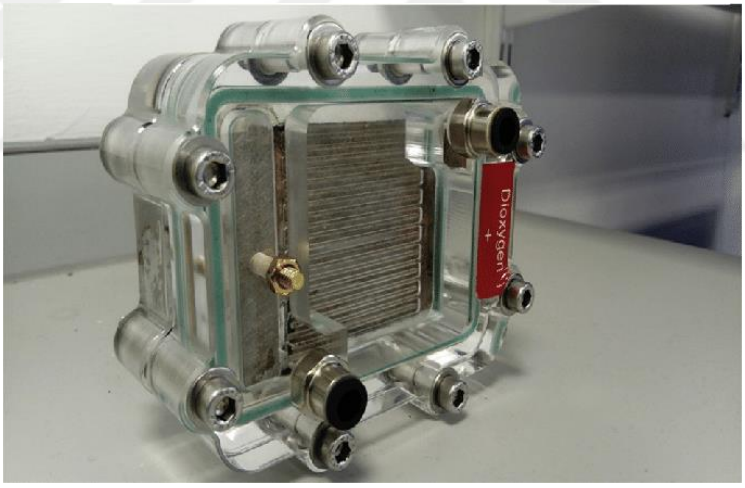
Kısaca Membrane'deki su transferi şu şekilde ifade edilebilir.

$$\dot{n}_{H_2O,m} = \dot{n}_{\mathrm{H_2O,m,osmotic}} - \dot{n}_{\mathrm{H_2O,m},backdiff}$$

(2.4)

Su birikiminin ne zaman nerede gerçekleşeceğini tespit eden bir teknoloji henüz yoktur. Su birikimi giren yakıtın nem oranı, sıcaklık, basınç, materyal, geometri gibi pek çok değişkene bağlıdır. Su hareketini incelemek için çeşitli ampirik veriler elde etmek gereklidir. Bu yüzden su birikimini tespit edebilecek bazı metotlar geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları şunlardır:

- Doğrudan Gözlemleme (*Direct Visualization*)
- Nötron resimlemesi (*Neutron imaging*)
- MR (*Nuclear magnetic resonance imaging*)
- X-ray resimlemesi (*X-ray imaging)*



Şekil 2.6. Transparan bir pil hücresi

Doğrudan gözlemleme, PEM hücresinde transparan dış levhalar kullanarak görüntü alma işlemidir. Bu işlem yüksek hızlı kameralarla, dijital kayıt cihazları, CCD kamera ve kızılötesi tespit cihazları ile sağlanabilir. Bu sayede su oluşumu, damlacık gelişimi ve hareketleri incelenebilir. Ge ve Wang, hidrofobik ve hidrofilik kanallarda su oluşumunu bu yöntemle incelemişlerdir. Düşük akıntıda suyun hidrofobik kısımda yoğunlaşmaya daha meyilli olduğunu; yoğunlaşan suyun da hidrofilik kısımda birikip kanalları kapadığını gözlemlemişlerdir. (Ge & Wang, 2007)

Literatürde bu bahsedilen gözlemleme metotlarının kullanıldığı deneyler bulunmaktadır. Bu deneylerden bazılarına EK-4'te ulaşılabilir. Su atımını etkileyen parametreler ve su yönetimini sağlamak için yapılan bazı çalışmalara yine EK-4'te ulaşılabilir.

2.4. PEMFC'de Kanal Tasarımının Su Atımına Etkisi

Kanalın farklı bölgelerinde oluşan basınç farkları, hava akımından dolayı oluşan gerilim kuvvetleri, damlacık ve yüzey arasındaki kontakta oluşan adezyon kuvvetler, su ve hava arasındaki yüzey gerilimi kuvvetleri, eylemsizlik, yerçekimi, viskozite su damlacığı oluşumunu ve şeklini etkilemektedir.

Yılansı (Serpentine) kanal U-formunda kanalların birleşmesinden oluşmuştur. U formundaki kanallarda su atım mekanizmasını incelendiği çalışmalar mevcuttur. Quan ve diğerleri tarafından PEMFC kanal yapısını Fluent ortamında modellenmiştir. Analizlerinde U-formundaki kanalda, Volume of Fluid (VOF) metodu kullanarak, -beş farklı durumda- büküm bölümünün su atımına etkisini incelenmiştir. Büküm noktasının su atımına yüksek etkisi olduğu sonucuna varmışlardır. (Quan, Zhoua, Sobiesiak, & Liu, 2005)

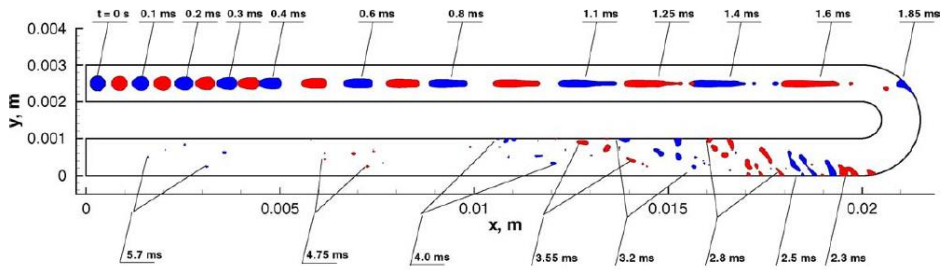
Yaptıkları çalışmada elektrokimyasal reaksiyonlar dikkate alınmadan basit bir yaklaşımla mikro kanallardaki su hareketlerini incelenmişlerdir. Gaz kanalında reaksiyon hesaba katılmayarak model basitleştirilmiştir.

Sınır koşulları olarak: kaymazlık (*no-slip*) sınır koşulları seçilmiş ve 10 ms^{-1} hızda hava girişi modellemişlerdir. Bir milimetrekare kesit alanına sahip U formunda kanalda tek damlacık, damlacık serisi, duvara bağlı damlacık serileri, GDL de ince sıvı film ve tüm sınır tabakada sıvı film olmak üzere beş farklı durum incelemişlerdir.

Çizelge 2.2. Quan ve diğerlerinin tarafından incelenen durum koşulları

Case no.	Inlet velocity ($m\,s^{-1}$)	Initial water (mm^3)	Initial water distribution	Corresponding PEM fuel cell operating condition
1	10	3.35×10^{-2}	Single spherical droplet ($r = 0.2$ mm) freely suspended at micro-channel inlet	Fundamental study of droplet deformation inside the airflow micro-channel
2	10	1.81	A series of droplets ($r = 0.2$ mm) freely suspended along a micro-channel centerline	Feeding reactant flow with liquid water for saturation
3	10	1.53	A series of droplets ($r = 0.2$ mm) attached to a side wall of micro-channel (distance between droplet center and wall is 0.1 mm)	Small amount of liquid water generated or condensed on the surface of MEA sidewall
4	10	9.20	A liquid water film with thickness of 0.2 mm covering the imaginary MEA surface	Large amount of liquid water generated or condensed on the surface of MEA side wall
5	10	16.10	A liquid water film with thickness of 0.1 mm covering all interior surfaces of the micro-channel	Extreme case—large amount of liquid water, due to electrochemical reaction, water condensation or reactant feeding, covering all interior surfaces

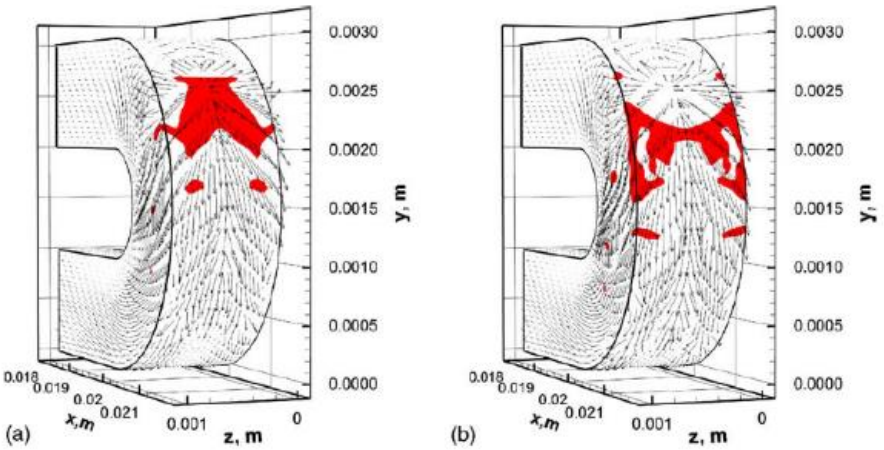
Çalıştıkları ilk durumda damlacığın, kanal boyunca deformasyona uğradığı görülmüştür. Bu deformasyon sebebinin hava akışının oluşturduğu kayma gerilmesinin dağılımı olduğunu öne sürmüşlerdir. Bir süre sonra damlacığın parçalara ayrıldığını gözlemlemişler, bunun sebebinin ise damlacığın yüzey geriliminin onu bir parça halinde tutmak için yeterli olmaması olduğunu belirtmişlerdir. Yerçekimi kuvvetinin atalet kuvveti yanında ihmal edilebilir olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.7 . U kanalda su damlasının deformasyonu

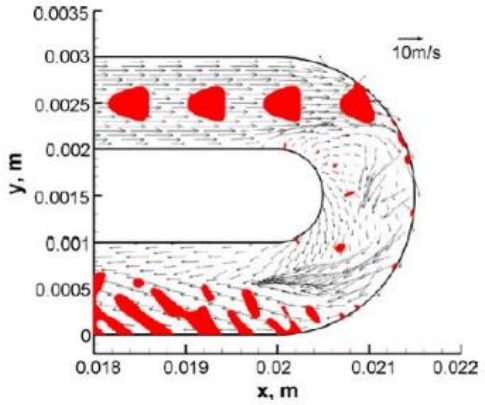
Büküm noktası civarında hız gradyeninin aniden değiştiğini, damlacığın çarpma anında birden yüksek basıncı bölgesi olarak görüldüğünü; bunun da ani momentum değişiminden dolayı olduğunu öne sürmüşlerdir.

Genişleyen hava akımıyla birlikte damlacıklar köşe kenarlara doğru yayıldığı, böylece su ile duvar arasındaki adezyon kontak alanın genişlediğini belirtmişlerdir. Yüksek hız gradyeninin su dağılımına sebep olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.8. Büküm noktasında su biçiminin değişmesi a)t=1.95s b)t=2s

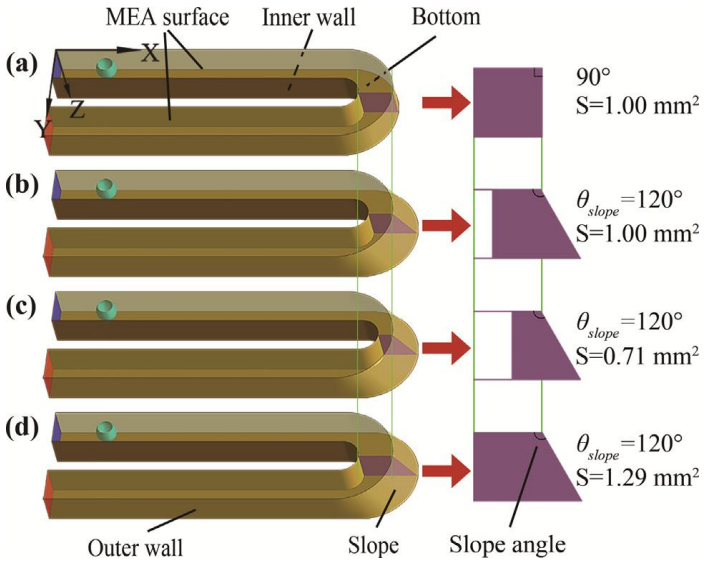
Damlacığın çarpma etkisiyle küçük parçalara ayrıldığını belirtilmişlerdir. Ayrıca büküm bölümünde ikinci bir akım (vorteks) oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Bu vorteksin suyun homojen dağılmasına yardımcı olarak hava akımını kolaylaştırdığı öne sürmüşlerdir.



Şekil 2.9. Birden çok damlacığın büküme çarpma anında hız vektörleri

Bu çalışmalarının sonucunda büküm bölgesinin yılansı kanallarda kritik etkiye sahip olduğunu; su davranışının kayma gerilimi, duvar adezyonu ve yüzey gerilimlerine bağlı olarak değiştiğini belirtmişlerdir.

Liu ve diğerleri, büküm bölümündeki kesit alanını ve dış duvar eğim açısını Şekil 2.10'daki durumlarda değiştirerek damlacık tahliyesini geliştirmeyi hedeflemişlerdir. (Liu, Tan, Cheng, & Yang, 2018)



Şekil 2.10. Farklı açılar ve kesit alanları ile su tahliyesinin geliştirilmesi

İnceledikleri on üç farklı durumda farklı büküm kesit alanı büyüklükleri, GDL yüzeyinde farklı kontak açısı değerleri (farklı ıslanırlık değerleri) farklı damlacık boyutları ve birden fazla damlacık durumunun birbirleri ile etkilerini incelemişlerdir.

Çizelge 2.3. Liu ve diğerleri tarafından incelenen durumlar

Cases	Sectional area	Slope angle θ_{slope} (°)	Contact angle θ_{wall}(°)	Droplet diameter (mm)	Droplet number	Droplet distance (mm)
Conv. case	–	–	140	0.6	1	–
Case 1	Normal	120	140	0.6	1	–
Case 2	Small	120	140	0.6	1	–
Case 3	Large	120	140	0.6	1	–
Case 4	Normal	135	140	0.6	1	–
Case 5	Normal	105	140	0.6	1	–
Case 6	Normal	120	120	0.6	1	–
Case 7	Normal	120	160	0.6	1	–
Case 8	Normal	120	140	0.4	1	–
Case 9	Normal	120	140	0.8	1	–
Case 10	Normal	120	140	0.6	3	1.5
Case 11	Normal	120	140	0.6	3	2.0
Case 12	Normal	120	140	0.6	3	2.5

Yaptıkları çalışma sonucunda, büküm bölümünde dik açıdan farklı olan optimum bir açı olduğu sonucuna varmışlardır. Bu açının, su damlacığını GDL yüzeyine geri sekmesini engelleyecek kadar geniş ancak su aktarımını zayıflatacak ve basınç düşüşünü arttıracak kadar da geniş olmaması gerektiğini ileri sürmüşlerdir. Büküm bölümündeki kesit alanında daralmanın su tahliyesini hızlandırdığını; ancak (damlacık geçerken) anlık olarak yüksek basınç değişimlerine sebep olmasından dolayı buradaki kesit alanının aynı tutulmasının avantajlı olduğunu iddia etmişlerdir. Kontak açısının GDL yüzeyinde yüksek olmasının avantajlı olduğunu belirtip 120° eğim açısı ve 160° kontak açısının en başarılı durum olarak tespit etmişlerdir.

Yılansı gaz kanalları üzerine yapılan çalışmalar halen yetersiz sayılabilir. Bu yüzden, bu çalışmada PEMFC akım kanalına bir rezervuar çıkışı konularak bu çıkışın damlacık hareketine etkisi ANSYS Fluent ortamında incelenmiştir.

3.MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizini gerçekleştirmek için ANSYS Fluent Programının VOF (Volume of Fluid) metodu kullanılmıştır. VOF metodunda karışmayan (birbiri içine nüfuz etmeyen) akışkanlar tek bir set momentum denkleminin iki faz içinde paylaşılıp çözülür ve fazlar arasındaki yüzey takip edilir. Hacim oranı α (*Volume Fraction*) 0 ile 1 arasında değişir. Örneğin; iki fazlı bir gaz-sıvı için -sıvının volüm fraksiyonu- $\alpha_{f,l} = 0$ olduğunda ağ yapısı hücresi ilk faz ile doludur(ilk faz genelde gaz seçilir), $\alpha_{f,l} = 1$ olduğunda ise ikinci faz ile doludur(genelde sıvı seçilir). (ANSYS, Inc, 2009)

Öz kütle ve dinamik viskozite gibi parametreler volüm fraksiyon ağırlıklı ortalamalar alınarak hesaplanır. Örneğin iki akışkandan oluşan bir karışım için:

$$\alpha_g + \alpha_l = 1 \tag{3.1}$$

$$\rho = \rho_l \alpha_l - \rho_g(1 - \alpha_l) \tag{3.2}$$

$$\mu = \mu_l \alpha_l + \mu_g(1 - \alpha_l) \tag{3.3}$$

Bu metoda göre bir hücre için üç ihtimal vardır:

- $\alpha_l = 0$ Ağ yapısı hücresi tamamen gazla kaplıdır.
- $\alpha_l = 1$ Ağ yapısı hücresi tamamen sıvı ile kaplıdır.
- $0 < \alpha_l < 1$ Ağ yapısı hücresinin üzerinde gaz ile sıvı arasındaki ara yüzey (*interface*) vardır.

Burada:

α_l Sıvının volüm fraksiyonu

α_g Gazın volüm fraksiyonu

ρ Madde yoğunluğu (öz kütle) (kg/m^3)

μ Dinamik viskozitedir. (pa.s)

Süreklilik denklemi ve NS momentum denklemleri de tüm akışkanlara uygulanır.

Süreklilik denklemi

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \tag{3.4}$$

Süreklilik denkleminin VOF metoduna uygulanması

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \alpha_q = \frac{S_{\alpha_q}}{\rho_q} \tag{3.5}$$

Volüm Fraksiyon toplamının bir olması durumu

$$\sum_{q=1}^{n} \alpha_q = 1 \tag{3.6}$$

Burada:

t zamanı (s)

$\vec{v}$ Vektörel hızı (m/s)

S_{α_q} Kütle oluşumdaki kaynak terimi ifade eder (varsayılan olarak sıfırdır) (1/s)

N-fazlı bir karışım için öz kütle $\rho = \sum \alpha_q \rho_q$ 'dir.

Buna benzer bütün karışım özellikleri bu formül ile hesaplanır. (Örneğin: viskozite)

Tek bir momentum denklemi bütün karışım için uygulanır. Öz kütle ve viskozite gibi özellikler α ye bağlı olarak çıkarılır.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu \left(\nabla \vec{v} + \nabla \overrightarrow{v^T}\right)\right] + \rho \vec{g} + \vec{F} \tag{3.6}$$

Burada p basınç (pa)

$\vec{g}$ Yerçekimi ivmesi (m/s^2)

F de kayma gerilmesi sonucu oluşan kuvvettir. (N)

Enerji denklemi de benzer şekilde tek bir denklem olarak çözülür.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot \left(\vec{v}(\rho E + p)\right) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + S_h \tag{3.7}$$

E Enerji (kj)

K_{eff} Efektif termal iletkenlik.

S_h Kaynak terimidir.

$$E = \frac{\sum_{q=1}^{n} \alpha_q \rho_q E_q}{\sum_{q=1}^{n} \alpha_q \rho_q} \tag{3.8}$$

Ardından Formül (3.8) tüm fazlar için tek tek çözülür.

Bu çalışmada Continuum Surface Force (CSF) model kullanılmıştır. Bu modelde yüzey gerilimi bir kaynak değeri *(source term)* olarak momentum denklemine eklenir.

Yüzey gerilimi CSF modeli ile bir katı, bir sıvı faz arasında hesaplandığında Denklem 3.9 kullanılır.

$$F_{\text{vol}} = \sigma_{ij} \frac{\rho \kappa_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)} \tag{3.9}$$

Burada

F_{vol} hacimsel kuvvet (N)

κ_i Curvature terimi

$\kappa = \nabla \cdot \hat{n}$ $\hat{n}$ Yüzey normali birim vektörü

σ_{ij} Herhangi bir taraf için yüzey gerilimidir. (N/m)

Yüzey gerilimi denklemi

$$p_2 - p_1 = \sigma\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \tag{3.10}$$

R doğrusal yöndeki uzaklıklardır.

Yüzey gerilimi etkileri ve duvar adezyonu çift fazlı mikro akışlarda oldukça önemli bir rol alır.

Adezyon kuvveti denklemi

$$\hat{n} = \widehat{n_w} \cos \theta_w + \widehat{t_w} \sin \theta_w \tag{3.11}$$

$\widehat{n_w}$ Duvar normali birim vektörü

$\widehat{t_w}$ Duvar tanjantı birim vektörü

θ_w Kontak açısıdır.

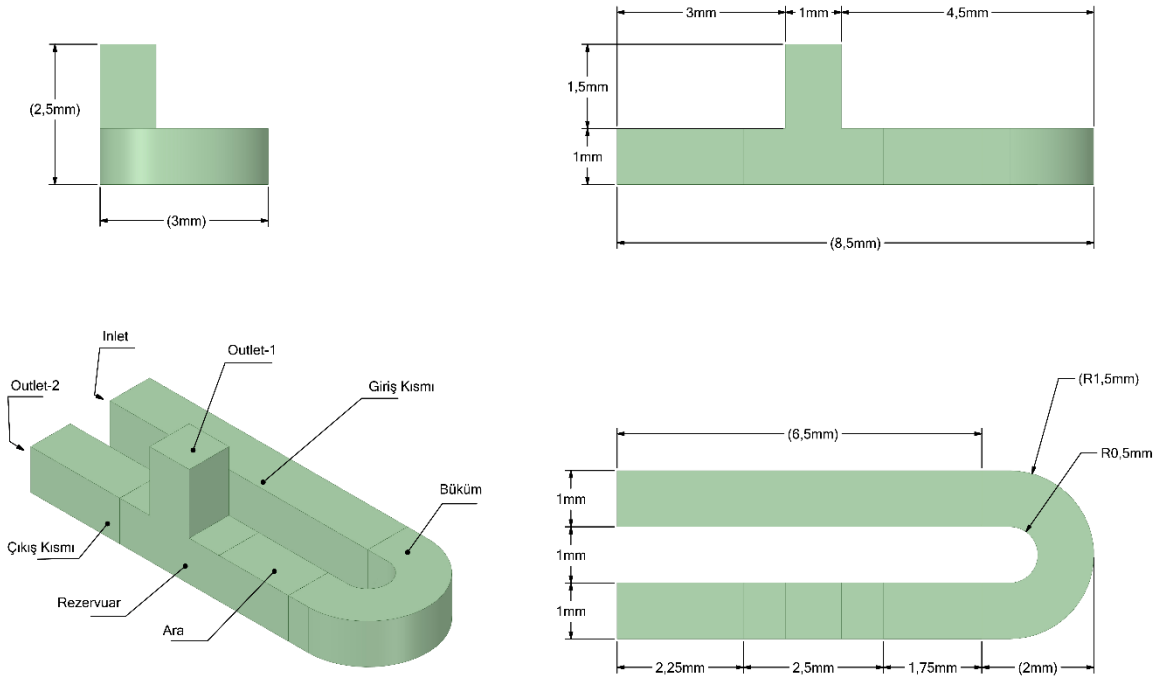
Çalışmada duvara 140° "Wall Adhesion" açısı tanımlanmış CSF modeliyle birlikte çözücü ayarlarında kullanılmıştır.

Basınç düşümünün en az, su tahliyesinin en başarılı olduğu kanal tasarımı yılansı tasarımdır. Bu sebeple yılansı kanal tasarımı gözde bir araştırma konusudur. Yılansı kanal tasarımının yapıtaşı U şeklinde kanaldır(U-shape).

Bu çalışmada akım kanalarına ekstra bir çıkışı konulduğunda su atımının nasıl etkileneceği incelenmiştir. Bu amaçla iki yeni tasarım yapılmıştır. İlk tasarımda su tahliyesini sağlamak için U şeklinde bir yakıt pili akım kanalı üzerine, dallanma şeklinde ekstra bir ara çıkış eklenmiştir. İkinci tasarımda ise dönüş ve öncesi bölüm ihmal edilerek düz bir kanala ekstra bir ara çıkış eklenmiştir. Eklenen bu çıkışların hücrede biriken fazla suyu hücre üzerine yerleştirilen bir rezervuara aktardığı varsayılmıştır.

3.1. U Formunda Ekstra Çıkışlı Kanal Modeli

Birinci tasarımda; U şeklinde bir PEMFC akım kanalı çıkışına (outlet-2, ana çıkış) yakın bir bölgeye rezervuar çıkışı (outlet-1) konulmuştur. Bu rezervuar çıkışına atanan farklı basınçların damlacık hareketine etkisi incelenmiştir. Kullanılan model geometrisi Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. U şeklinde rezervuar çıkışlı geometri

Kullanılan modelde kanalın merkez ekseni 16,15 mm uzunluğundadır. Kanal 1x1 mm^2 kesit alanına sahiptir. Giriş (Inlet) ve çıkış (outlet-2) kısımları altı buçuk milimetre düz bölgeye sahiptir. Kanalın orta kısmında ise yarım milimetrelik raduslu bir büküm vardır. Outlet-1 olarak Outlet-2'nin (Ana Çıkışın) üç milimetre gerisine ekstra bir çıkış konulmuş. Bu çıkış kısmı bir buçuk milimetre yükseltilmiştir.



Şekil 3.2. Analizde kullanılan Ağ yapısı

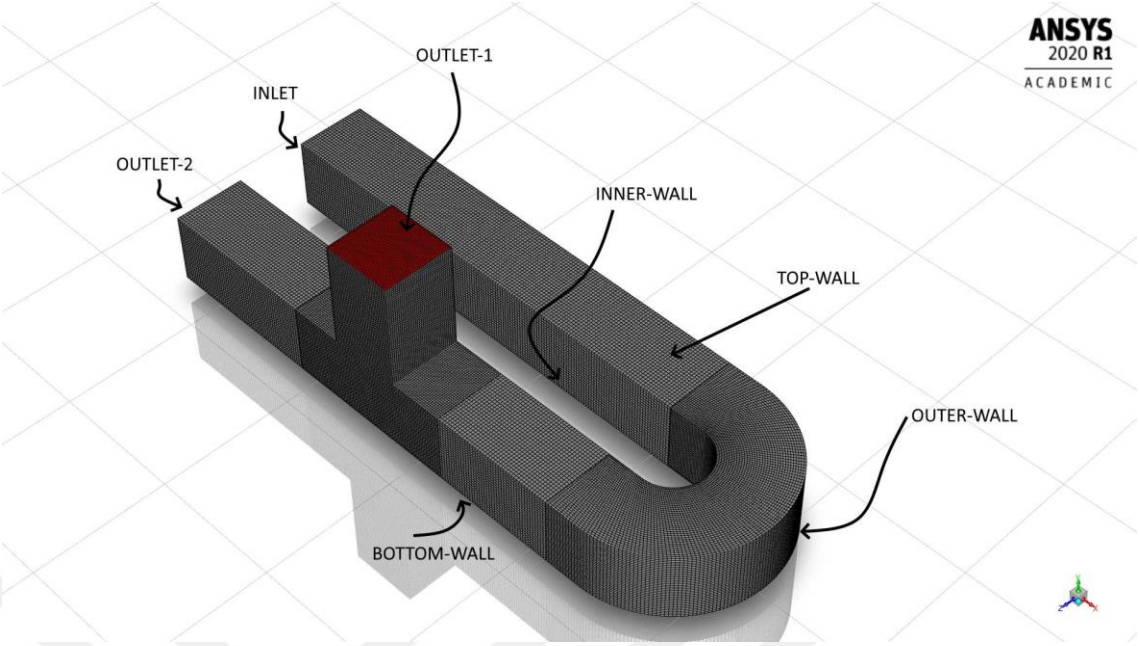
Tasarlanan kanalda girişten devamlı ve sabit 4 m/s hızda hava akışı sağlanırken inlete yakın bir bölgeye yerleştirilen su damlacığının hareketi, değişik Outlet-1 basınçları ile karşılaştırılmıştır. Bu damlacığın özellikle büküm noktasında ve rezervuar civarlarında dağılması beklendiği için bu bölümlere daha yoğun ağ yapısı(*Mesh)* kullanılmıştır. Başka bir değişle diğer kısımlarda daha kaba ağ yapısı kullanılarak işlemci yükünün hafifletilmesi hedeflenmiştir. Kullanılan ağ yapısı detaylı olarak Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

Toplam 470 bin eleman ve 506 bin noddan oluşan ağ yapısı ANSYS Meshing uygulaması ile oluşturulmuştur. Elemanların tamamı altı yüzeylidir (hexahedraldir). İki nod arasındaki ortalama mesafe ANSYS Meshing ayarlarında 0,042mm olarak ayarlanmış iken, rezervuar ve büküm çevrelerinde 0,028mm ye ayarlanmış böylece bu bölgelerdeki ağ yapısı sıklaştırılmıştır. Geometri oluşturulurken bölümleri arasında shared topology *(ortak topoloji)* kullanılmamıştır.

Ağ yapısı kalite değerleri Çizelge 3.1'de görülebilir. Kalite değerleri hakkında bilgilere EK-5'te bulunabilir.

Çizelge 3.1. Ağ yapısı kalite değerleri

Mesh Metric	Element Quality
Min	0,77944
Max	1,
Average	0,97909
Standard Deviation	3,7589e-002
Mesh Metric	**Skewness**
Min	1,3057e-010
Max	0,36668
Average	4,2418e-002
Standard Deviation	7,3178e-002
Mesh Metric	**Aspect Ratio**
Min	1,
Max	1,7621
Average	1,0994
Standard Deviation	0,16239
Mesh Metric	**Orthogonal Quality**
Min	0,84663
Max	1,
Average	0,99168
Standard Deviation	1,8792e-002



Şekil 3.3 Sınır tabaka isimlendirilmesi

Giriş (inlet) bölümünden 4 m/s hızında hava akımı devamlı olarak sağlanmaktayken Outlet-2 atmosfer basıncına açılmaktadır. Yer çekimi ivmesi y- yönünde 9,81 m/s^2 verilmiştir. Çözümde multiphase (çok fazlı) metotlarından biri olan Volume of Fluid metodu kullanılmıştır.

Bu çalışmaya yerçekimi etkisi dahil edildiği için, "*Implicit Body Force Formulation*" seçeneği aktif hale getirilmiştir. Fazlar arasında ara yüz modelleme *"sharp"* (keskin) olarak ayarlanmıştır. Hava birinci faz olarak su ise ikinci faz olarak ayarlanmıştır. Hava ile su arasında oda sıcaklığında sabit yüzey gerilimi alınmıştır. (Oda sıcaklığında 0.073 N/m, yalnızca rezervuarın incelendiği çalışmada ise 80°'de 0.063 N/m kullanıldı). *"Wall adhesion"* ve *"Jump Adhesion"* seçenekleri de aktifleştirlimiştir.

Hava akımı laminer akım olarak tanımlanmıştır. Sıcaklık etkisi incelenmediğinden enerji modeli açılmamıştır. Bütün duvarların su ile kontak açısı 140 derece olarak tanımlanmıştır.

Inletin tam bir milimetre ilerisinde 0,6 milimetre çapında bir küre bölgesi işaretlenmiş ve çözüm yüklendikten sonra bu bölge sıvı su olarak tanımlanmıştır. Bölgede ekstradan herhangi bir hız ve basınç değişikliği yapılmamıştır. Dolayısıyla başlangıçta *4 m/s* hızında ve hava ile eş basınçta tam küre bir damlacık modellenmiştir.

Çözüm metodu olarak SIMPLE metodu hızlı olduğu için PISO metoduna tercih edilmiştir. 'Spatial Discretization' seçeneklerinden *"gradient"* için *'Least Square Node based'* ve basınç için *'Presto!'*, momentum için *'second order upwind'*, ve *"Volume Fraction"* için de 'Compressive' seçenekleri kullanılmıştır.

Kontrol metotlarında URF'ler şu şekildedir: 'Pressure 0,3; Density 1; Body Forces 0,8; Momentum 0,7; Volume Fraction 0,5'tır.

Çözüm boyunca sistemdeki kütle dengesi ve girişteki ortalama basınç takip edilmiştir. Basınç için 0,001; kütle için 0,01 oranında yakınsama kriterlerine tanımlanmıştır.

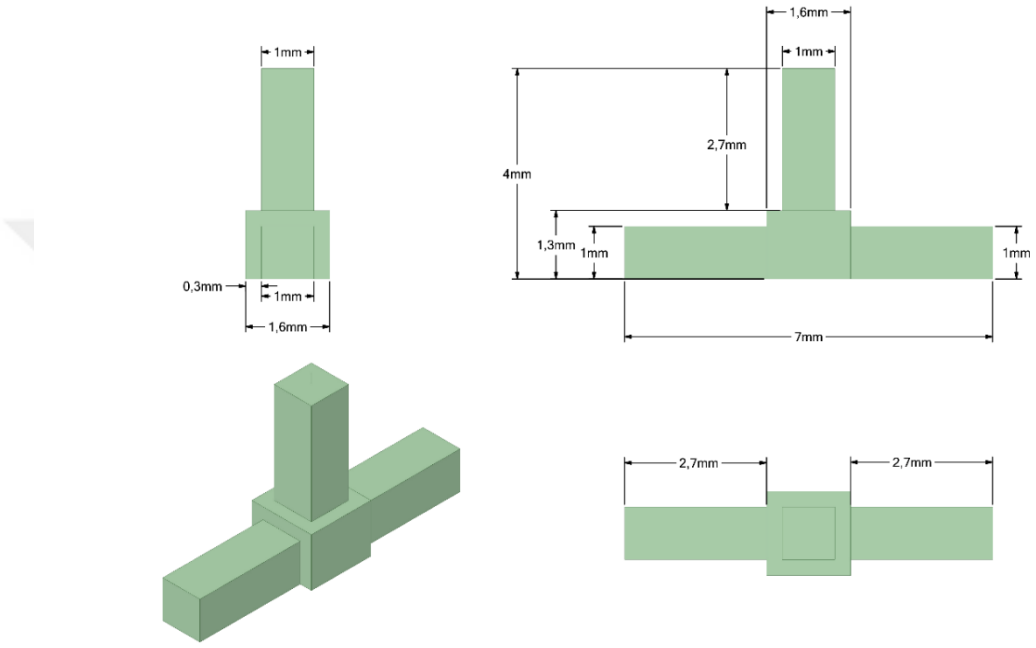
Residualler için 10^{-4} yakınsama koşullu verilmiştir. Çözümde *"Adaptive time step"* metodu kullanılmıştır. Courant sayısı 0,5 olarak alınmıştır. Fluent, Courant sayısı kullanılarak analizde uygulanacak zaman adımının boyutunu analiz süresince otomatik olarak değiştirmektedir.

Rezervuar bağıl basıncı (outlet-1) dört farklı durum incelemesinde 0 Pa, -20 Pa, -30 Pa, -50 Pa olarak alınmıştır. Ek olarak da 50 Pa, -2000 Pa ve -5000 Pa ve parametrik -{P_dynamic_Outlet-2}/5 durumları incelenmiştir. Damlacın başlangıç hızı hava hızına denk tutulmuştur.

3.2. I Formunda Ekstra Çıkışlı Kanal Modeli

İncelenen ikinci tasarımda, dönüş kısmı ihmal edilmiş, I şeklindeki bir kanal üzerine bir rezervuar çıkışı eklenmiştir. Bu sayede daha az eleman sayısına sahip ancak yoğun ağ yapısı elde edilmiştir. Ayrıca rezervuar çıkışı, ana çıkış ve giriş uzunlukları eşit tutulmuştur.

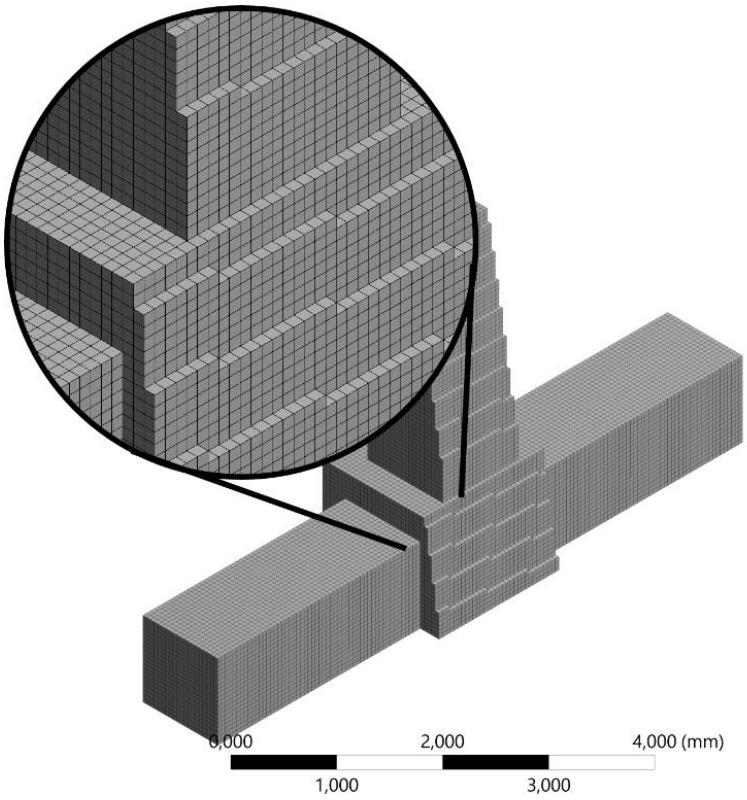
Tasarıma ait model Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Yalnız rezervuar bölümü geometri

Yedi milimetre uzunluğunda kanal bir milimetrekare kesitinin tam ortasına rezervuar çıkışına yerleştirilmiştir. Rezervuarın kanala eklendiği kısımda da 0,3 milimetrelik bir çıkıntı bulunmaktadır. Bu simülasyonda rezervuar çıkışı uzunluğu ile outlet-2 çıkışı uzunluğu eşit tutulmuştur.

Kullanılan ağ yapısı Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Yalnız rezervuar ağ yapısı

Çizelge 3.2 Yalnız rezervuar Ağ yapısı kalite değerleri

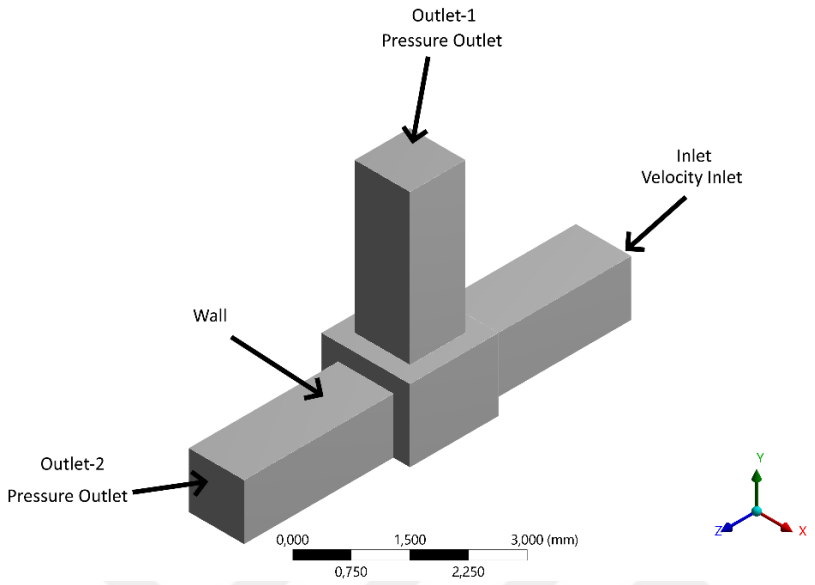
Statistics	
Nodes	100845
Elements	91424
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Target Skewness	0,3
Smoothing	High
Mesh Metric	Element Quality
Min	0,99981
Max	1,
Average	1,
Standard Deviation	8,3549e-006
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Target Skewness	0,3
Smoothing	High
Mesh Metric	Orthogonal Quality
Min	0,99985
Max	1,
Average	1,
Standard Deviation	4,8905e-006
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Target Skewness	0,3
Smoothing	High
Mesh Metric	Skewness
Min	1,3061e-010
Max	1,3307e-002
Average	1,9433e-004
Standard Deviation	6,635e-004
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Target Skewness	0,3
Smoothing	High
Mesh Metric	Aspect Ratio
Min	1,
Max	1,0198
Average	1,0009
Standard Deviation	1,3556e-003

Ağ yapısının kalite özellikler Çizelge 3.2'de gösterilmiştir. Tanımlanan sınırlar Şekil 3.6'ta gösterilmiştir.

Giriş kısmına 4m\s hızda tam gelişmiş akım profili tanımlanmıştır. Duvar kısmında no-slip kondisyonu kullanılmıştır.

İlk faz olarak sabit öz kütlede hava, ikincil faz olarak sıvı su kullanılmıştır. Fazlar arasındaki yüzey gerilmesi 0.062N/m (80° de) olarak ayarlanmıştır. Laminer Akım modellenmiştir.

Yer çekimi ivmesi -y yönünde 9,81 m/s^2 olarak belirlenmiştir. Operasyon basıncı 1 Atm olarak ayarlanmıştır. Suyun duvar ile kontak açısı 120° olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3.6. Ağ yapısı sınırları isimlendirmesi

Çözüm metotları ve kontrol parametreleri Fluent'in varsayılan değerleri olarak bırakılmıştır. Bunlar: SIMPLE metotu, Gradient olarak *"Least squares Cell Based"*; Basınç *"PRESTO!";* Momentum *"Second Order Upwind"* ve Volume Fraction *"Geo-Reconstruct"*'tır. Transient formulasyonu *"First Order Implicit"* kullanılmıştır.

Under-Relaxation Factors (URF): Pressure 0,3; Density 1; Body Forces 1; Momentum 0,7 olarak bırakılmıştır. Giriş ve Çıkışlar üzerinden kütle transferi ve girişteki basınç takip edilmiş ve sırasıyla 0,005 ve 0,001 olarak yakınsama kriterleri tanımlanmıştır. Çözüm sürecinde CFD-Post ortamına 4E-5 saniyede bir olmak üzere çıktı alınmıştır.

"*Velocity inlet*" profilinin oluşturulması için şu işlemler gerçekleştirilmiştir.

Reynolds sayısı Denklem 3.12 ile hesaplanır:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho V_f d_h}{\upsilon} \tag{3.12}$$

V_f = Akışkanın hızı

ρ = Akışkanın özkütlesi

d_h = Hidrolik çap

υ = Dinamik viskozite

$$\upsilon = \upsilon_o \frac{\mathrm{T_o} + \mathrm{C}}{\mathrm{T} + \mathrm{C}} \left(\frac{\mathrm{T}}{\mathrm{T_o}}\right)^{3/2} \tag{3.13}$$

$\upsilon = \mathrm{T}$ sıcaklığı*ndaki viskozite değeri*$(Pa.s)$

$\upsilon_o = T_o$ sıcaklığı*nda viskozite değeri*

$\mathrm{T} =$ Sıcaklık(K)

$T_o =$ Referans sıcaklığı(K)

$\mathrm{C} =$ Sutherland sabiti

Hava için:

$\upsilon_o = 1{,}827\mathrm{E} - 5$

$T_o = 291{,}15$

$\mathrm{C} = 120$

$\mathrm{T} = 370$ için

Denklem 3.13'e yerleştirildiğinde

$$\upsilon = 1{,}827\mathrm{E} - 5 \frac{291{,}15 + 120}{370 + 120} \left(\frac{370}{291{,}15}\right)^{3/2}$$

Dinamik viskozite $\upsilon \approx 2{,}2\mathrm{E} - 5$ Pa. s olarak bulunur.

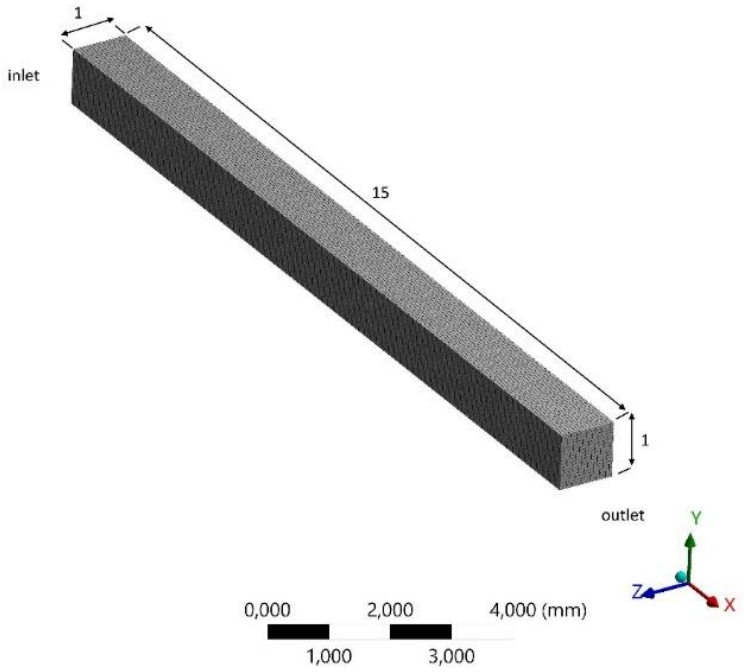
$$d_h = \frac{4A}{P}$$

A = Kesit Alanı, P = Kesit $Çevresi$

A = 1 mm^2, P = 4mm, d_h = 1mm olarak bulunur.

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho V_f d_h}{\upsilon} \tag{3.14}$$

hava için: $\rho \approx 1\mathrm{kg/m^3@80°}C$ olarak alınmıştır.



Şekil 3.7. Hız profili oluşturma kullanılan ağ yapısı

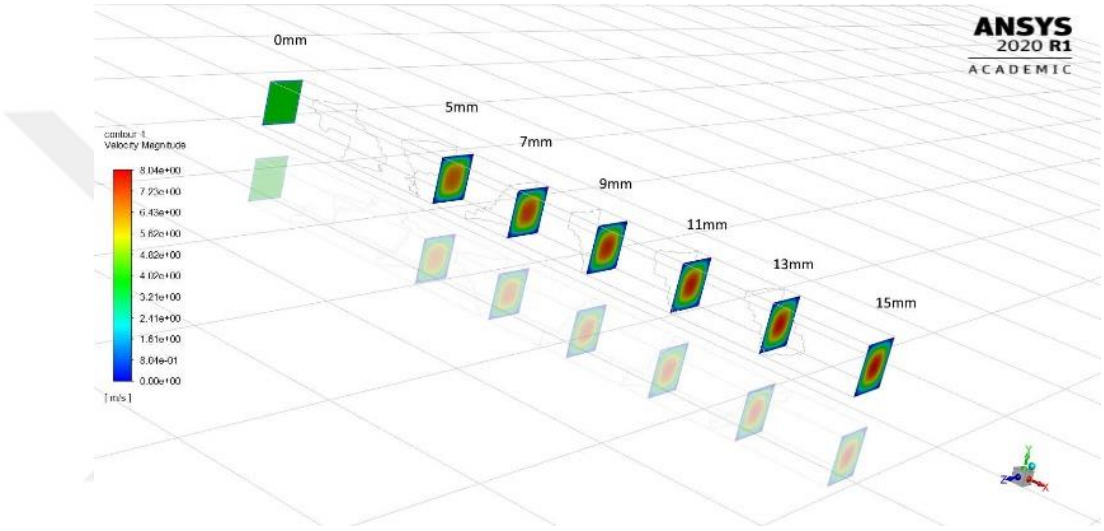
$$\mathrm{Re} = \frac{1(kg/m^3)4(m/s)(0{,}001m)}{2{,}2E-5\left({}^{kg}/_{m.s}\right)}$$

$Re = 182$

$Re < 2000$ Laminar akış için hidrodinamik giriş uzunluğu

$$L_{h,laminer} = 0{,}06Red_h \tag{3.15}$$

$$L_{h,laminer} = 0{,}06x182x1mm \approx 10{,}9mm$$



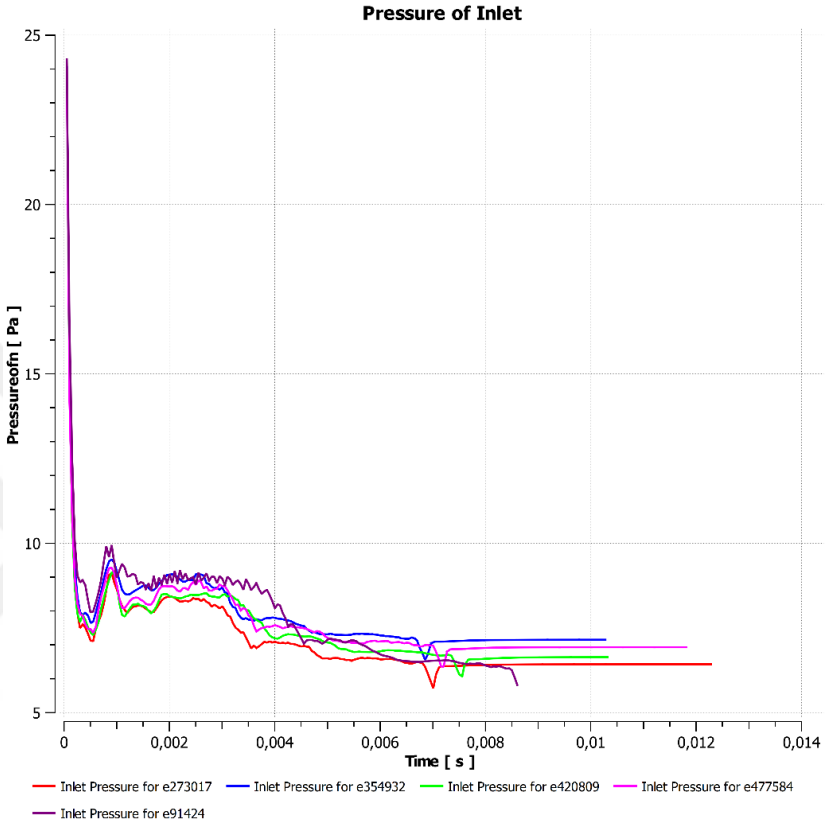
Şekil 3.8. Inletten belirli uzaklıklarda oluşan hız profilleri

1x1 kesit alanına sahip bir mikro kanalda hidrodinamik tamamen gelişmiş akımın hız profilini elde etmek 15mmlik bir kanal modeli oluşturularak 4mm giriş hızıyla simüle edilmiş ve başlangıçtan 13mm ilerideki kesit alanı alınmıştır.

13mm uzaklıkta elde edilen profil giriş koşulu olarak inlete eklenmiştir.

Kullanılan Ağ yapısının ne derece hassas sonuç verdiğini ölçmek için beş farklı eleman sayısında ilk analiz gerçekleştirilmiştir. Analizde 0,3 mm çapa sahip bir küre su kütlesi olarak geometrinin 0,5 mm ilerisine konulmuştur. Farklı eleman sayıları için inlet alanındaki ortalama basınç grafiği Şekil 3.9'te verilmiştir.

Şekil 3.9'te farklı ağ yapısı durumları için eğrilerin benzer bir yol izlediği görülebilir. Yüksek eleman sayılı analizler daha pürüzsüz bir şekilde ilerlerken düşük sayıda pürüzler mevcuttur. Damlacığın tahliye zamanında da bazı farklar mevcuttur. İkinci çalışmada 91 bin elemanlı ağ yapısı yeterli bulunup tercih edilmiştir.



Şekil 3.9 Farklı eleman sayılarının aynı çözüm ayarlarıyla incelenmesi sonucunda inletteki ortalama basınç grafiği

İncelenen iki geometri başlangıç, sınır koşulları ve çözücü ayarlarıyla birlikte Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3 İncelenen durumlar için çözücü ayarları, başlangıç ve sınır koşulları

U Şeklindeki Kanala Rezervuar çıkışının Etkisi

Çalışma 1 / Durum		Outlet-1 Basıncı (pa)	Damlacık Boyutu (çap,mm)	Diğer Özellikler	
1	p0	0	0,6		**Contact Angle:** 140°
2	p20	-20	0,6	**Inlet:** 4m/s	**Surface Tension:** 0.073 N/m
3	p30	-30	0,6	**Outlet-2:** 0Pa	**Model Hacmi:**18,6mm^2
4	p50	-50	0,6	**Damlacık Boyutu:** 0.6	**Eleman Sayısı:** 470 426
5	p**	-2/5* Outlet-2	0,6	**Yerçekimi:** -9.81m/s^2	**Pressure URF:** 0.3
6	p2000	-2000	0,6	**Gradient:** Least Square Node Based	**Density URF:** 1
7	p5000	-5000	0,6	**Pressure:** PRESTO!	**Body Forces URF:** 0.8
				Momentum: Second Order Upwind	**Momentum URF:** 0.7
				Volume Fraction: Compressive	**Courant Number:** 0.5
					Bubble Start Velocity: 4m/s

I Şeklindeki Kanala Rezervuar Çıkışının Etkisi

Çalışma 2 / Durum		Outlet-1 Basıncı (Pa)	Damlacık Boyutu (çap,mm)	Damlacık niteliği	YerÇekimi Yönü (g= 9,81m/s^2)	Inlet Durumu	Diğer Özellikler
1	p0	0	0,3	Merkezde	Aşağı	Profil 4m/s	**Model Hacmi:** 12,3 mm^2
2	p0upgrav	0	0,3	Merkezde	Yukarı	Profil 4m/s	**Eleman Sayısı:** 91 424
3	p250	-250	0,3	Merkezde	Aşağı	Profil 4m/s	**Outlet-2:** 0 Pa
4	p500	-500	0,3	Merkezde	Aşağı	Profil 4m/s	**Contact Angle** 120°
5	p1000	-1000	0,3	Merkezde	Aşağı	Profil 4m/s	**Surface Tension:** 0.062 N/m
6	p1000top	-1000	0,3	Tepede	Aşağı	Profil 4m/s	**Gradient:**
7	p1000bot	-1000	0,3	Dipte	Aşağı	Profil 4m/s	Least Square Cell Based
8	p1000nograv	-1000	0,3	Merkezde	Yok	Profil 4m/s	**Pressure:** PRESTO!
9	p1000up	-1000	0,3	Merkezde	Yukarı	Profil 4m/s	**Momentum:**
10	p2000	-2000	0,3	Merkezde	Aşağı	Profil 4m/s	Second Order Upwind
11	p5inlet	0	0,3	Merkezde	Aşağı	Inlet 5Pa	**Volume Fraction:**
12	p0D1.2	0	1,2	Merkezde	Aşağı	Profil 4m/s	Geo-Reconstruct
13	p1000D1.2	-1000	1,2	Merkezde	Aşağı	Profil 4m/s	**Pressure URF:** 0.3
14	p1000D0.6	-1000	0,6	Merkezde	Aşağı	Profil 4m/s	**Density URF:** 1
15	p0multi	0	0,3	Merkezde Çok Sayıda	Aşağı	Profil 4m/s	**Body Forces URF:** 1
16	p1000multi	-1000	0,3	Merkezde Çok Sayıda	Aşağı	Profil 4m/s	**Momentum URF:** 0.7
17	p1000band	-1000	0,3	Tepede Band şekli	Aşağı	Profil 4m/s	**Courant Number:** 0.5
							Bubble Start Velocity: 0m/s

3.3. Analitik Çözüm Örneği

Yapılan numerik çözümün doğrulanması amacıyla bu çalışmada modellenen kanal sistemlerinde analitik çözüm yapılarak hızlar ve basınç kaybı hesaplanmıştır. Analizde kullanılan T bağlantı sisteminde ana akım, iki ayrı dala ayrıldığı için; sistem bir paralel sistemdir. Problemde ana akımdan geçen su debisi bilinirken; diğer dallardan geçen su debisi ve basınç kaybı hesaplanmak istenmektedir. Bu yüzden problem ikinci sınıf bir paralel sistem olarak tanımlanabilir.

Problemde çıkış basınçları ile giriş hızı bilinmektedir. Çıkış hızları ve giriş basıncı ise bilinmemektedir. Laminer akım için, basma yüksekliği kaybını hesaplamakta kullanılan, sürtünme katsayısı yalnızca Reynolds sayısına bağlıdır. Dolayısıyla bilinmeyen olarak çıkış hızları ve giriş basıncı yazılan denklemler birlikte çözülerek, bilinmeyenlere ulaşılabilir.

Uygulanacak çözüm prosedürü şu şekildedir: Sistem inlet, outlet-1 ve outlet-2 olmak üzere 3 ayrı kola ayrılacaktır. Bu kollar için ayrı ayrı hesaplamalar yapılacaktır.

Ardından bulunan basma yükseklikleri ile iki adet genişletilmiş Bernouilli denklemi çözülecektir.

İki nokta arasında genişletilmiş Bernouilli denklemi Denklem 3.16'daki gibidir.

$$\frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 = \frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 - h_{f1-2} \tag{3.16}$$

P ilgili noktanın basıncı (Pa)

V ilgili noktadaki akım hızı (m/s)

Z ilgili noktanın referansa göre yüksekliği (m)

ρ özkütle (kg/m^3), g yerçekimi ivmesi (m/ s^2) , h_{f1-2} ise iki nokta arasında gerçekleşen basma yüksekliği kaybıdır.

Reynolds sayısı Denklem 3.17 ile hesaplanabilir.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \tag{3.17}$$

ρ özkütle (kg/m^3)
V akım hızı (m/s)
D Efektif çap (m)
μ dinamik viskozite (kg/(m s))

Laminar akımda sürtünme katsayısı, kare kanal için Denklem 3.18 kullanılarak hesaplanabilir.

$$f = 56{,}92/Re \tag{3.18}$$

f sürtünme katsayısı, Re Reynolds sayısıdır.

Bernouilli denkleminde kullanılan iki nokta arasındaki toplam basma yükseklik kaybı Denklem 3.19'daki gibi hesaplanır.

$$h_{f1-2} = h_{m1} + h_{m2} + h_{sudden,exp,1} + h_{sudden,cont,2} + h_{bend} + h_{tee} \tag{3.19}$$

İki noktadaki ana basma yüksekliği Denklem 3.20 ile hesaplanır.

$$h_{m1,2} = f_{1,2} \frac{L_{1,2}}{d} \frac{V_{1,2}^2}{2g} \tag{3.20}$$

L kanal uzunluğudur. (m)

Ardından diğer basma yükseklikleri bulunur.

Kesit alanında ani genişlemeden dolayı oluşacak kayıp $h_{sudden,exp}$ dir.

$$h_{sudden,exp,1} = k_{suddenexp} \frac{V_1^2}{2g} \tag{3.21}$$

Ani daralmadan oluşan kayıp $h_{sudden,con}$ benzer şekilde hesaplanır.

$$h_{sudden,con,1} = k_{suddencon} \frac{V_1^2}{2g} \tag{3.22}$$

Bükümden dolayı oluşan basma gerilimi h_{bend} de hesaplanabilir.

$$h_{bend} = f_{1,2} \left(\frac{L}{d}\right) \frac{V_{1,2}^2}{2g} \tag{3.23}$$

T bağlantıdan dolayı oluşan basma gerilimi h_{tee} de hesaplanabilir.

$$h_{tee1,2} = f_{1,2} \left(\frac{L}{d}\right) \frac{V_{1,2}^2}{2g} \tag{3.24}$$

T bağlantıda $\left(\frac{L}{d}\right)$ yön değiştirmeyen akımlar için, yön değiştiren akımlardan daha düşük bir katsayı alınır.

Sonunda kütle korunumundan elde edilen Denklem 3.25 ile genişletilmiş Bernouilli denklemleri bilinmeyenler için çözülür

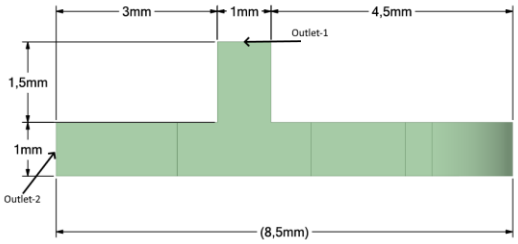
$$V_{inlet} = V_{outlet-1} + V_{outlet-2} \tag{3.25}$$

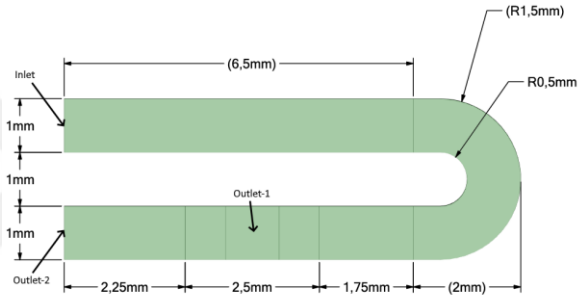
Ya da kısaltılmış şekilde

$V_{inlet} = V_1 + V_2$

U şeklindeki kanal için örnek çözüm:

Çıkış bağıl basınçlarının 0 olduğu durum için Denklem 3.16 kullanılarak iki denklem şu şekilde elde edilir:





Şekil 3.10 U Kanalda Genişletilmiş Bernouilli denkleminde kullanılan noktalar

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_{inlet}}{\rho g} + \frac{V_{inlet}^2}{2g} + z_{inlet} - h_{finlet-1}$$

$$h_{finlet-1} = \frac{p_{inlet}}{1{,}225 \ * \ 9{,}81} + \frac{4^2 - V_1^2}{2 * 9{,}81} + 0{,}002$$

$$\frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 = \frac{p_{inlet}}{\rho g} + \frac{V_{inlet}^2}{2g} + z_{inlet} - h_{finlet-2}$$

$$h_{finlet-2} = \frac{p_{inlet}}{1{,}225 \ * \ 9{,}81} + \frac{4^2 - V_2^2}{2 * 9{,}81}$$

Denklem 3.17 kullanılarak tüm bağlantıları için Reynolds sayısı hesaplanır.

$$Re_{inlet} = \frac{1{,}225 * 4 * 0{,}001}{1{,}7894e - 05} = 273{,}83$$

$$Re_{outlet-1} = \frac{1.225 * V_1 * 0{,}001}{1{,}7894e - 05} = 68{,}46 * V_1$$

$$Re_{outlet-2} = \frac{1{,}225 * V_2 * 0{,}001}{1{,}7894e - 05} = 68{,}46 * V_2$$

Denklem 3.18 kullanılarak sürtünme katsayıları hesaplanır.

$$f_{inlet} = 56{,}92/273{,}84 = 0{,}2079$$

$$f_{outlet-1} = 56{,}92/68{,}46 * V_1 = 0{,}8314/V_1$$

$$f_{outlet-2} = 56{,}92/68{,}46 * V_2 = 0{,}8314/V_2$$

Ana basma yüksekliği kayıpları Denklem 3.20 kullanılarak hesaplanır.

$$h_{inlet} = f_{inlet}\frac{L_{inlet}}{d}\frac{V_{inlet}^2}{2g} = 0{,}2079\frac{0{,}009}{0{,}001}\frac{4^2}{2 * 9{,}81} = 1{,}5226$$

$$h_{outlet-1} = f_{outlet-1}\frac{L_{outlet-1}}{d}\frac{V_1^2}{2g} = (0{,}8314/V_1)\frac{0{,}0015}{0{,}001}\frac{V_1^2}{2 * 9{,}81} = 0{,}0636 * V_1$$

$$h_{outlet-2} = f_{outlet-2}\frac{L_{outlet-2}}{d}\frac{V_2^2}{2g} = (0{,}8314/V_2)\frac{0{,}003}{0{,}001}\frac{V_2^2}{2 * 9{,}81} = 0{,}1271 * V_2$$

Büküm bölgesindeki kayıplar Denklem 3.23 kullanılarak hesaplanır (L/d) katsayısına bu geometri için 20 verilebilir

$$h_{bend} = f_1\left(\frac{L}{d}\right)\frac{V_1^2}{2g} = 0{,}2079(20)\frac{4^2}{2 * 9{,}81} = 3{,}3908$$

T bağlantıdaki kayıplar Denklem 3.24 kullanılarak hesaplanır. (L/d) katsayısı outlet-1 için 35, outlet-2 için 0,3 alınabilir.

$$h_{tee1} = f_1\left(\frac{L}{d}\right)\frac{V_1^2}{2g} = (0{,}8314/V_1) * (35)\frac{V_1^2}{2 * 9{,}81} = 1{,}4832 * V_1$$

$$h_{tee2} = f_2\left(\frac{L}{d}\right)\frac{V_2^2}{2g} = (0{,}8314/V_1) * (0{,}3)\frac{V_1^2}{2 * 9{,}81} = 0{,}0127 * V_2$$

Bulunan değerler Denklem 3.19 e konulduğunda

$$h_{finlet-1} = 1{,}5226 + 0{,}0636 * V_1 + 1{,}4832 * V_1 + 3{,}3908$$
$$= 1{,}5468 * V_1 + 4{,}9158$$
$$h_{finlet-2} = 1{,}5226 + 0{,}1271 * V_2 + 0{,}0127 * V_2 + 3{,}3908$$
$$= 0{,}1398 * V_2 + 4{,}9158$$

Bu değerler de Denklem 3.16 ya yazıldığında iki adet üç bilinmeyenli denklem sistemi elde edilir

$$1{,}5468 * V_1 + 4{,}9158 = \frac{p_{inlet}}{1{,}225 \ * \ 9{,}81} + \frac{4^2 - V_1^2}{2 * \ 9{,}81} + \ 0{,}0020$$

$$0{,}1398 * V_2 + 4{,}9158 = \frac{p_{inlet}}{1{,}225 \ * \ 9{,}81} + \frac{4^2 - V_2^2}{2 * \ 9{,}81}$$

Ayrıca kütle korunumundan çıkarılan denklem 3.26 ya hızlar yerleştirildiğinde üçüncü denklem elde edilmiş olur.

$$4 = V_1 + V_2$$

Son üç denklem üç bilinmeyenler için çözüldüğünde

$$V_1 = 0{,}66\ m/s$$

$$V_2 = \ 3{,}34\ m/s$$

$$p_{inlet} = 61{,}8\ Pa$$

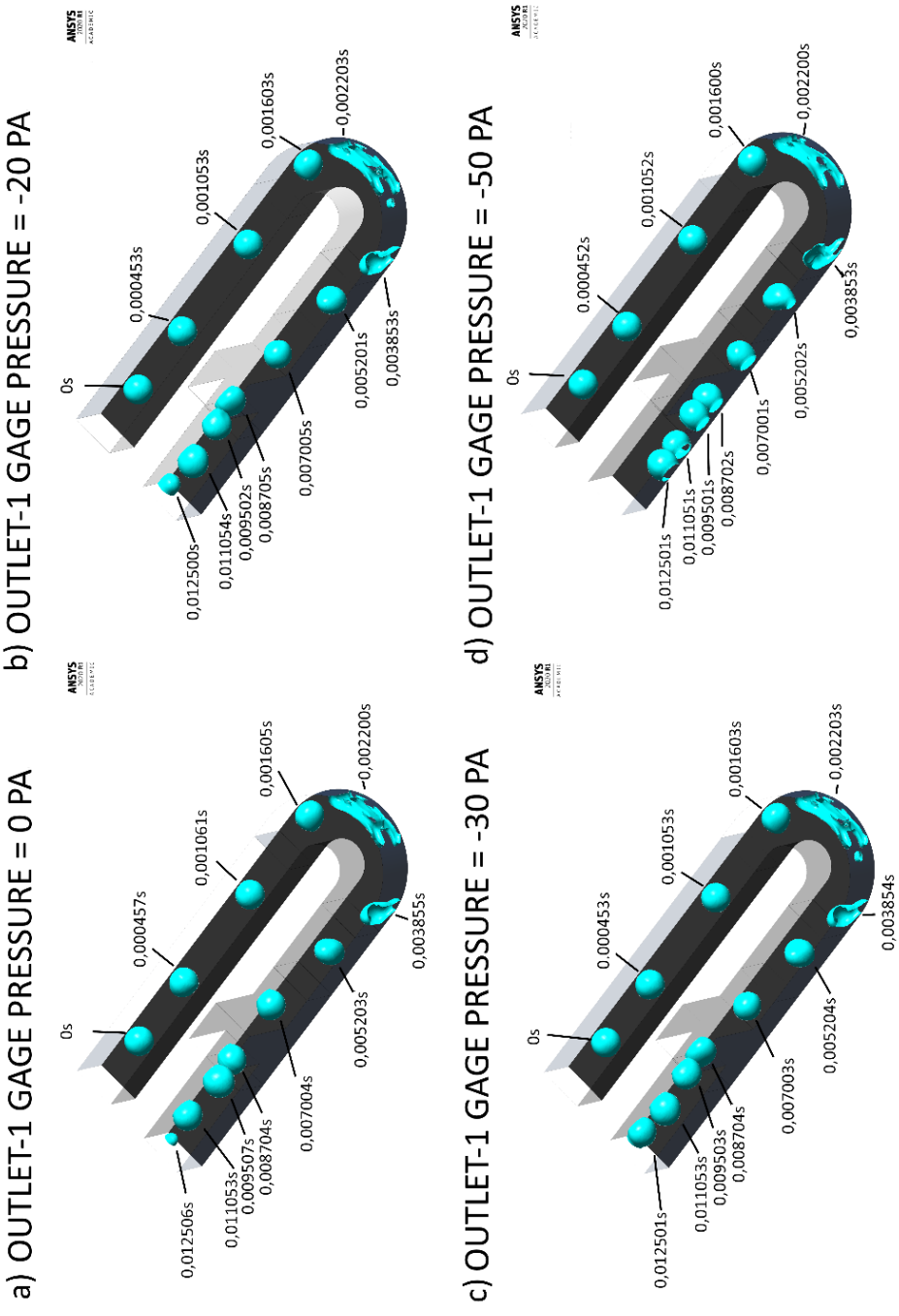
Olarak elde edilir.[6]

[6] Denklemler ve bazı katsayılar için (AKSEL, 2011) , katsayılar interpolasyon, T bağlantı katsayıları ise deneme yanılma yöntemleriyle elde edilmiştir.

4.BULGULAR

4.1. U Şeklindeki Kanala Rezervuar Çıkışının Etkisi

Birinci tasarımda U şeklinde modellenen kanalda girişten 4m/s hava girişi tanımlanmış; outlet-2'ye (ana çıkış) ise 0 bağıl basınç verilmiştir. Outlet-1 (rezervuar çıkışı) bağıl basıncı 0 Pa, -20 Pa, -30 Pa ve -50 Pa olmak üzere dört durum için kanala yerleştirilen 0,6mm çapında bir damlacığın hareketleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.1. Farklı Rezervuar çıkışı basınçlarında damlacık hareketleri
a) 0 Pa b) -20 Pa c) -30 Pa d) -50 Pa

Şekil 4.1 incelendiğinde, Outlet-1 basıncının büküm öncesindeki gelen akımına (upstream akıma) etkisi olmadığı görülmüştür. Damlacık tüm durumlarda 1.6 milisaniyede büküm noktasına ulaşmış ve bu süreçte çok az bir deformasyona uğramıştır. 0.22 milisaniyede, damlacık büküm duvarına çarpmış ve mevcut hareket yönündeki (+x yönü) tüm hızını kaybetmiştir. Hızını kaybeden damlacık yükselen iç basıncını, deforme olarak ve yüzey alanını arttırarak dengelemiştir.

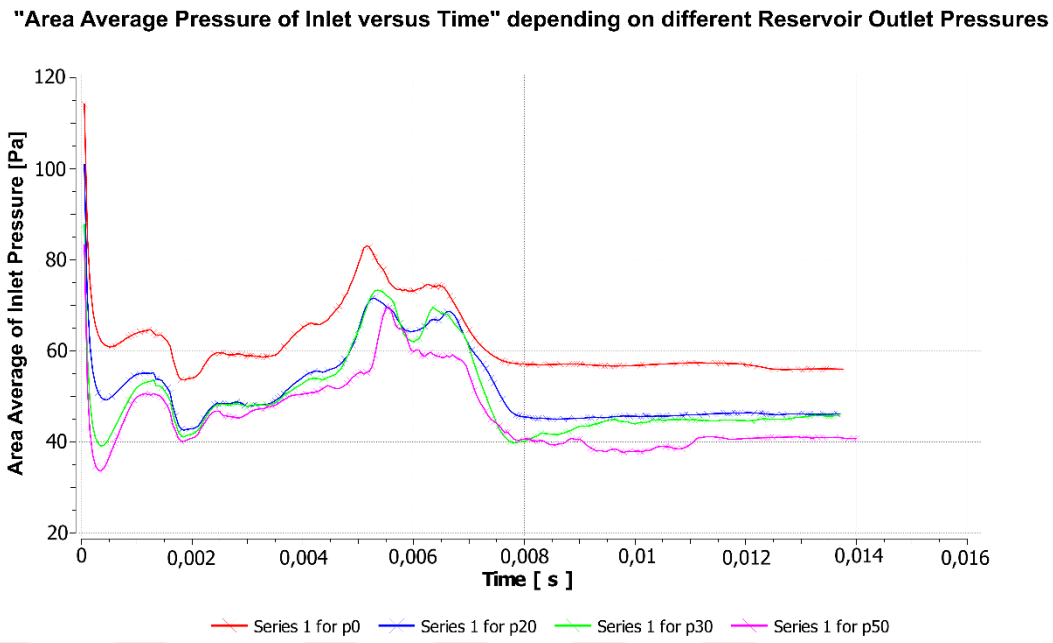
Yalnızca "-30 Pa" ve "-40 Pa" durumlarda ufak bir parçanın damlacıktan koptuğu gözlemlenmiştir. Bu kopan parça bulunduğu konumda asılı kalmış ve süre boyunca tahliye olamamıştır.

Damlacık büküm boyunca dış duvarla temas halinde kalmıştır. 3,85 milisaniyede damlacık büküm noktasından çıkmıştır. Bu zaman noktasında da tüm durumlar için dış duvarla temas halindedir. 5.2 milisaniyede "-50 Pa" durumu hariç damlacık dış duvardan ayrılmış ve kanal ortasında seyir haline devam etmiştir. "-50 Pa" durumunda ise damlacık dış cidarla temas halinde kalmıştır. Bu da sürtünme kuvvetleri (adezyon) nedeniyle damlacığın daha da yavaş tahliye olmasına sebep olmuştur.

7 milisaniyede farklı rezervuar basıncının etkileri tüm durumlar için hissedilmektedir. "0 Pa" durumu içerisinde damlacık bu bölgeye en hızlı şekilde varmıştır. "-20 Pa" ve "-30 Pa" durumlarında fark kesin olarak gözetilememektir ancak bu basınçlarda "0 Pa" durumuna kıyasla damlacık biraz geç kalmıştır. "-50 Pa" içinse diğer durumlara göre görünür bir geç kalınma söz konusudur. 8,7 milisaniyede "-50 Pa" durumu dış duvara bağlı kalırken diğer durumlarda iç duvara bağlanmıştır.

12,5 milisaniyede damlacık "0 Pa" için tahliye olmuştur; "-20 Pa" durumu için kısmen tahliye olmuş; "-30 Pa" içinse çıkış sınırına henüz girmiştir. "-50 Pa" durumunda ise damlacık fark edilir düzeyde geride kalmıştır.

Bu süreç boyunca inletteki ortalama basınç değerleri Şekil 4.2'de görülebilir.



Şekil 4.2. Farklı rezervuar basınçları için Inletteki ortalama basıncın zaman bağlı değişimi (p:pressure)

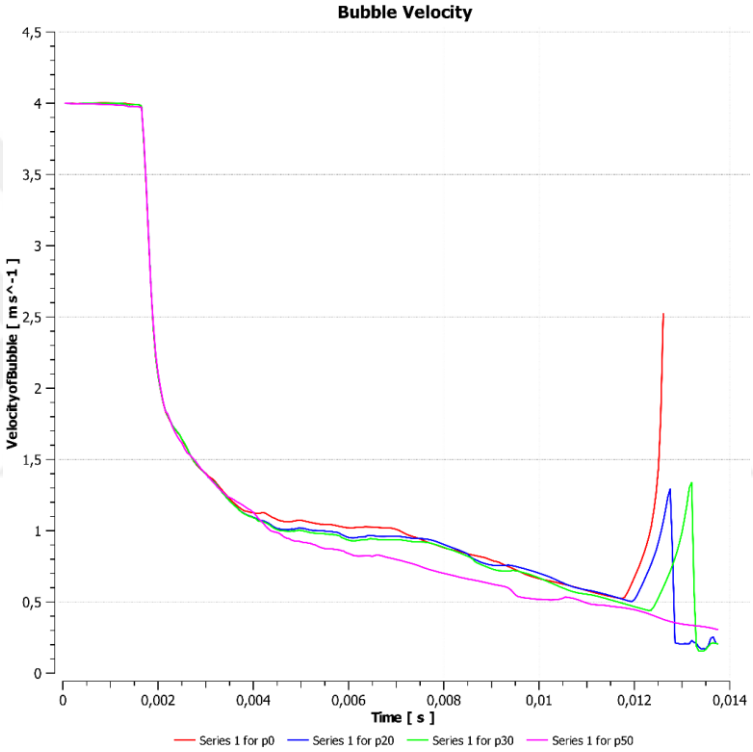
Şekil 4.2'ye bakıldığında inletteki basınç "p0" durumu için en yüksek, sonra sırasıyla outlet-2'deki basıncı "p20", "p30" ve "p50" olmak üzere sıralanmıştır. Bu beklenen bir durumdur çünkü outlet-1'deki basınç düşüşü doğrusal olarak inleti de etkilemektedir. Outlet-1'deki basınç ne kadar düşük ise inletteki basınçta o derece düşmektedir. Ayrıca p0 durumu için bulunan inletteki basıncın analitik çözümden %5 daha düşük olduğu görülmüştür.

Bütün eğriler için ortak trend incelenecek olursa başlangıçta oldukça yüksek bir basınçtan düşme söz konusudur. Bunun sebebi başlangıçta havanın damlacığa takılmasından ötürü hız kaybetmesidir. Bunun sonucunun inlete yüksek basınç olarak yansımasıdır. Damlacığın ilerlemesi ile inletteki basınç düşmüş, zamanla basınç denge konumuna doğru yavaş yavaş yükselmiştir. 1,7 milisaniyede damlacık büküm cidarına çarptığında hızlı bir basınç kaybı gözlenmiştir. Bu basınç kaybı, damlacık dış cidara yapıştığında hava akımı için daha fazla alan açılması sebebiyle gerçekleşmiştir.

2 milisaniyede yani tam çarpma anında inlette basınç bölgesel olarak en düşük değere ulaşmıştır. Ardından damlacığın dairesel formunu tekrar kazanmasıyla basınç yükselmiştir. 5 milisaniyede basınç maksimum değere ulaşmıştır. Bu zaman noktasının özelliği damlacığın kesit alanını çoğunlukla kapatması ve sürat olarak yavaş olmasıdır.

5 milisaniye ile 7 milisaniye arasında basınç bölgesel olarak yüksek bir seyirde dalgalanmıştır. 7 milisaniyenin sonunda damlacık rezervuar bölümüne ulaştıktan hemen sonra basınç hızla düşmüştür. Ardından sabit bir seyirde damlacık tahliye olana kadar sürmüştür. Grafiği her durum için ayrı ayrı inceleyecek olursak, outlet-1'deki basınç düştükçe inletteki basıncında aynı oranda düştüğü görülebilir. Inlet basınç grafiğinin outlet-1 basınç durumlarına göre bir trend değişikliği söz konusu değildir.

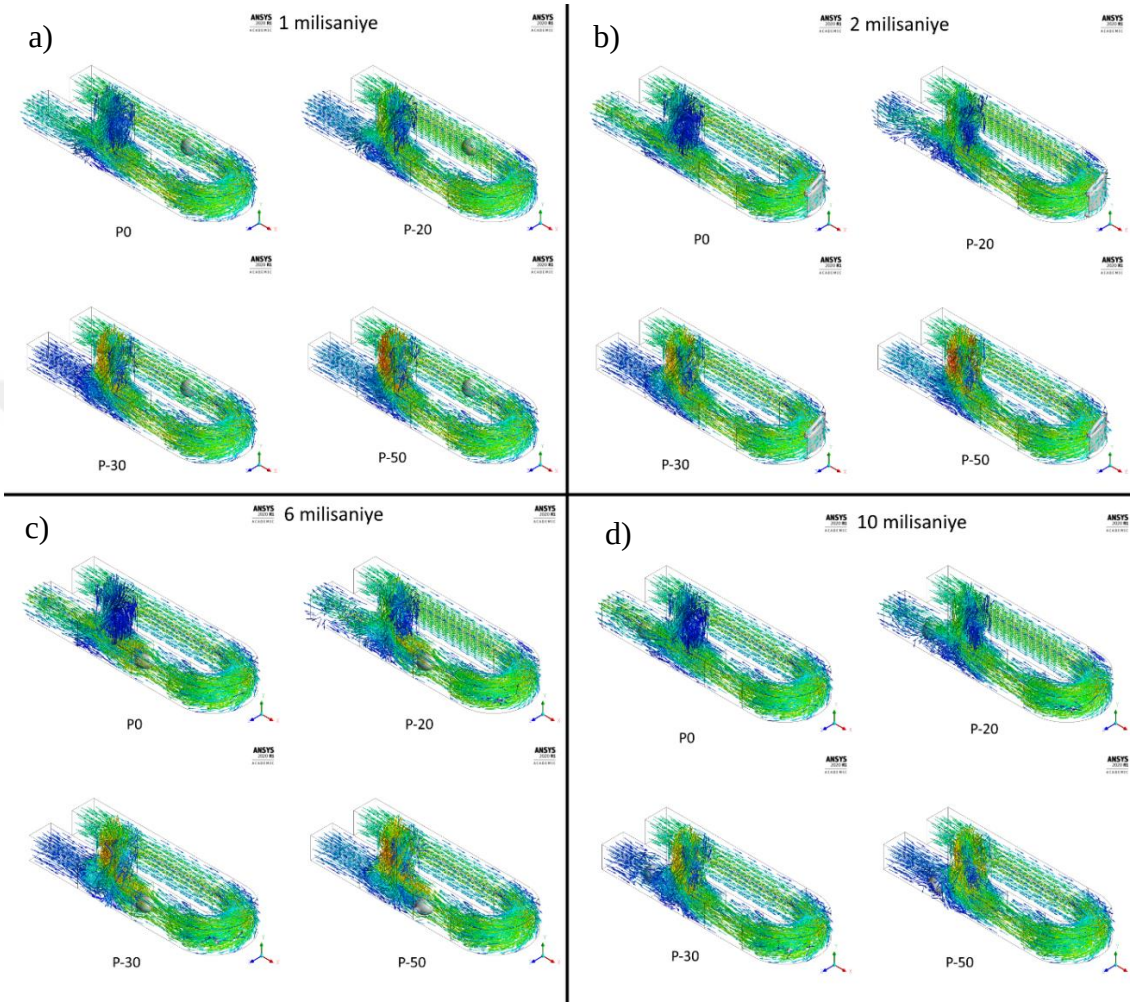
Sistemdeki sıvı suyun süratinin hacimsel ortalamaya göre grafiği tüm durumlar için Şekil 4.3'deki gibidir.



Şekil 4.3. Farklı rezervuar basınçlarında damlacık yüzeyinde ortalama hız grafiği

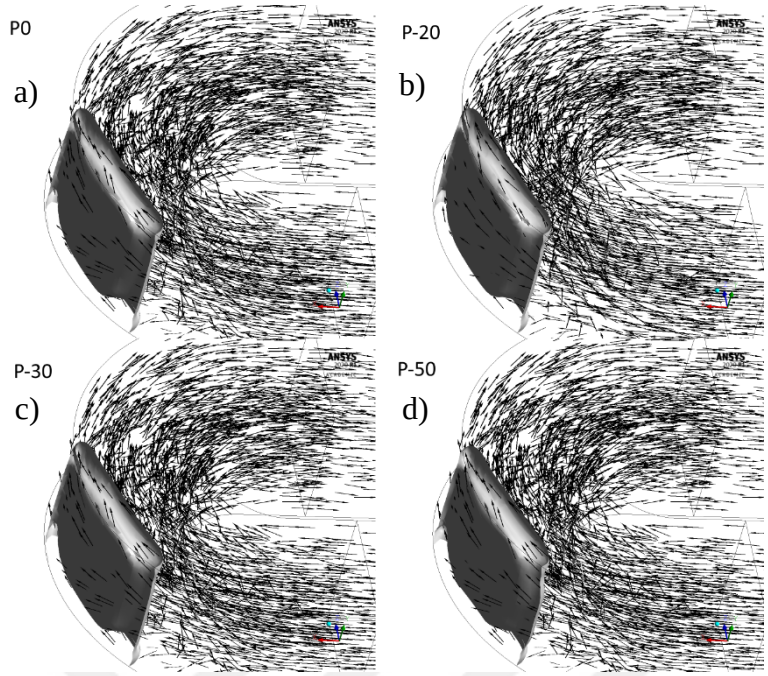
Şekil 4.3'ten damlacık hızının, outlet-1 basıncının düşmesine paralel olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak bu düşüş kayda değer bir seviyede değildir. Damlacık hızının tahliye süresi boyunca devamlı azaldığı görülmüştür. Damlacık rezervuar kısmını geçtikten hemen sonra basınç düşüşünden kaynaklı daha keskin bir hız kaybı yaşanmıştır.

Basınç kaybı, reaktan yoğunluğunun yüksek değerde sebep olmaktadır. Aynı zamanda su tahliyesini yavaşlatır. Bu yüzden özellikle düşük basıncın hedeflendiği durumlar hariç, paralel kanal tasarımının tercih edilmemektedir.



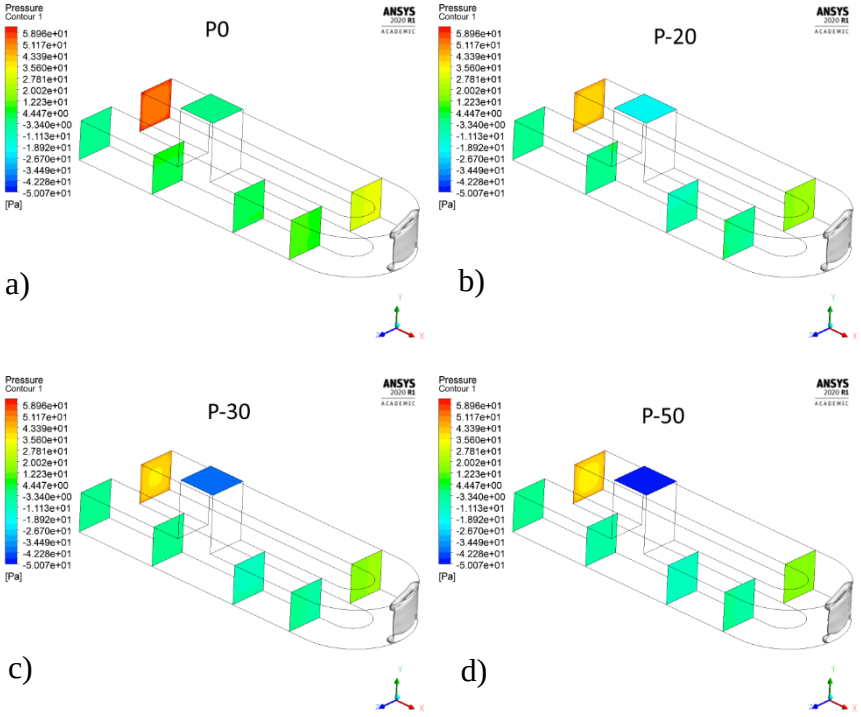
Şekil 4.4 Farklı basınçlar için hız vektörlerinin farklı zamanlarda karşılaştırılması. a) 1ms b) 2ms c) 3ms d) 4ms

Şekil 4.4'de belirli zaman noktalarında tüm durumlar için hız vektörleri gösterilmiştir. Outlet-1 bağıl basıncı sıfır iken rezervuar çıkışından az bir hava dışarı çıkmaktadır. -20 Pa'dan daha düşük outlet-1 basınçlarında: outlet-2'den outlet-1 'e bir geri akım oluşmaktadır. Ancak geri akım olması dahi damlacığın hareketi üzerinde ciddi bir değişikliğe sebep olmamıştır.



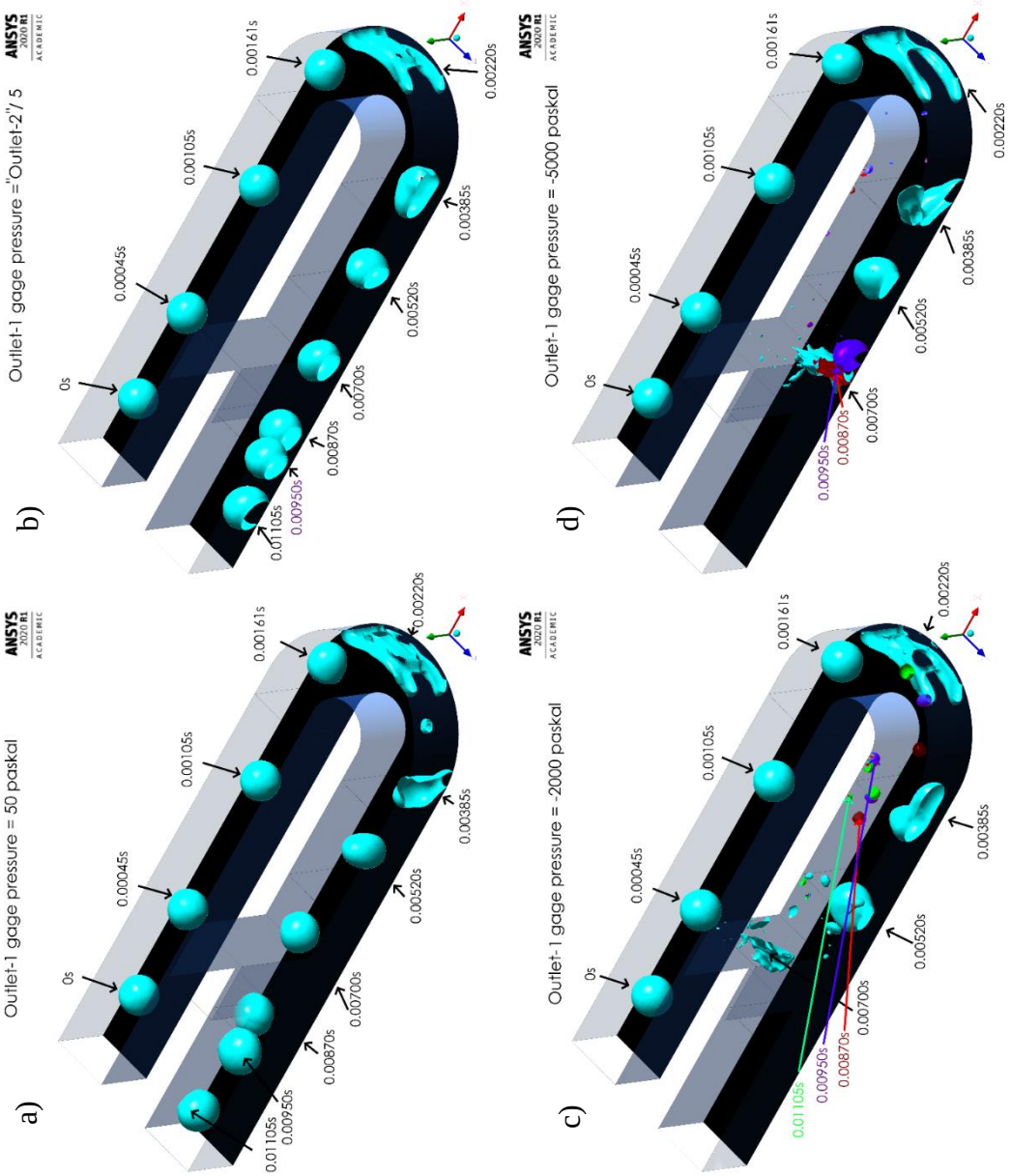
Şekil 4.5. Farklı rezervuar çıkışı basınçları için büküm eğrisindeki hız vektörleri a) 0 Pa b) -20 Pa c) -30 Pa d) -50 Pa

Şekil 4.5'te çarpma anında farklı durumlar için hız vektörleri incelendiğinde outlet-1 basıncının büküm noktasına ve gerisine etkisinin olmadığı görülmektedir.



Şekil 4.6. Farklı rezervuar basınçlarında bölge geçiş noktalarındaki basınç kontürleri a)0 Pa b) -20 Pa c) -30 Pa d) -50 Pa

Bazı kritik bölgelerdeki basınç konturları Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Outlet-2 (ana çıkış) kısmındaki basınçların outlet-1'e bağlı olarak fazla değişmediği ancak inlet tarafındaki basınçların ise outlet-1 (rezervuar çıkışı) basıncına bağlı olarak değiştiği görülebilir.



Şekil 4.7. Farklı rezervuar basınçlarında damlacık hareketi a) 50 Pa b) –(1/5) x Ana çıkış basıncı c) -2000 Pa d) -5000 Pa

Bu durumlara ek olarak daha yüksek basınçlarda damlacık hareketleri incelenmiştir.

Şekil 4.7'de bu durumlar görülebilir. Şekil 4.7.a'da outlet-1 bağıl basıncı +50 Pa, Şekil 4.7.b'de "outlet-2 basıncına bağlı ve bu basıncın beşte biri" olarak ayarlanmıştır.

Outlet-1 basıncı Şekil 4.7.c'de -2000 Pa, Şekil 4.7.d'de -5000 Pa olarak ayarlanmıştır. Damlacığın bir önceki çalışmadaki gibi belirli zamanlarda konumları incelenmiştir.

Şekil 4.7'den anlaşıldığı üzere inletten büküm bölgesine kadar olan bölümde basınca bağlı hareket değişmemektedir.

Ancak rezervuar bölgesine gelindiğinde rezervuar çıkışındaki (outlet-1) bağıl basıncının etkisi gözlenmiştir. 7 milisaniyede outlet-1 bağıl basıncının pozitif olduğu durum için damlacık en öndedir. Ardından outlet-1 bağıl basıncının outlet-2 basıncından biraz eksik tutulduğu durum gelmektedir. Outlet-1 bağıl basıncı -2000 Pa iken ise outlet-2'den outlet-1'e güçlü bir geri akım oluşmuştur. Bu geri akımın etkisiyle aniden değişen basınç gradyeni ile damlacık hız kaybetmiş ve deforme olmuştur. Bunun sonucunda bir miktar su outlet-1 yönünde ilerlemiş ancak aksi yönde bir ivmeye maruz kalmıştır. Damlacıktan kopan bazı parçalar ani momentum değişimi ile akımın geldiği yere doğru fırlamıştır. Outlet-1 bağıl basıncı -5000 Pa durumunda ise, outlet-2 yönünden gelen akım daha güçlüdür. Bu yüzden damlacık bu yöne neredeyse hiç ilerleyememiş, damlacıktan kopan bazı ufak parçalar üst akım yönüne hızla geri dönmüştür. Diğer kalan su kütlesi ise rezervuar dibinde asılı kalmıştır.

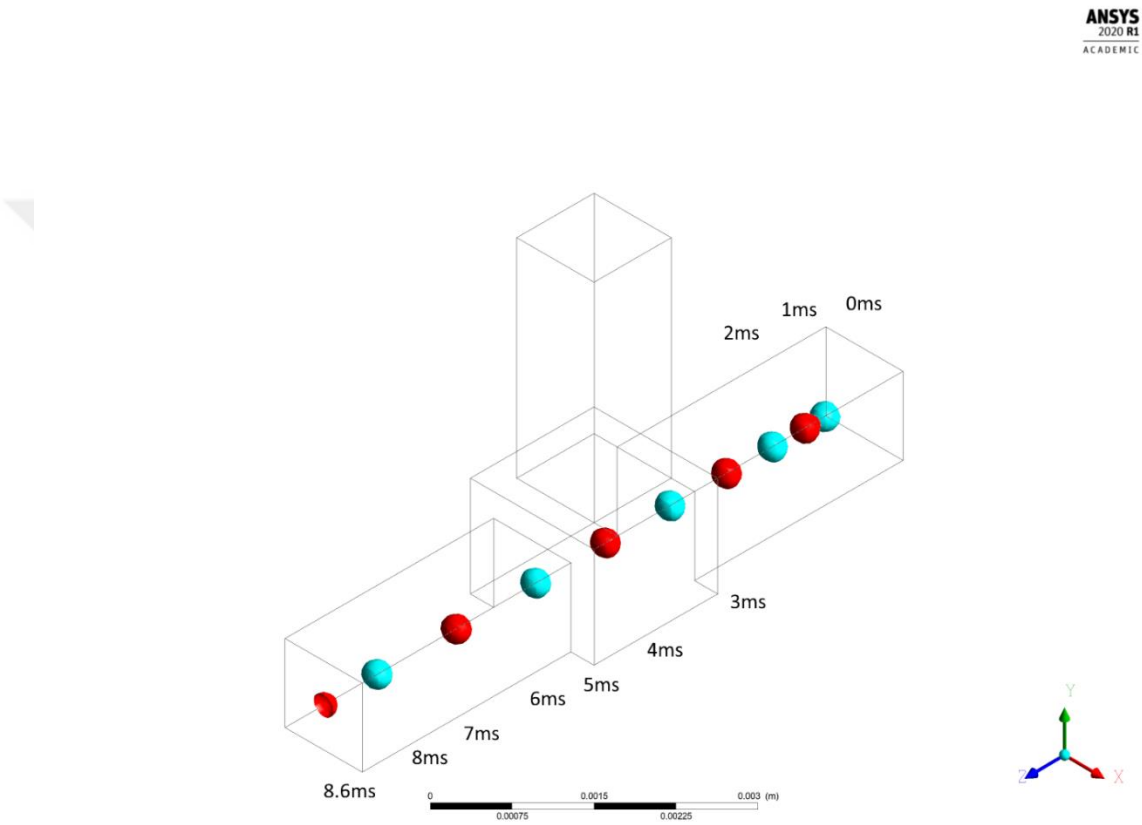
Damlacık en hızlı şekilde Şekil 4.7.a'da tahliye olmuştur. Bu açıdan kalan yolu içerisinde bir basınç yükselmesi damlacık tahliyesini belirli şekilde hızlandırabilmektedir. Diğer durumlarda ise rezervuardan hemen sonra yaşanan basınç düşüklüğü damlacığın geliş yönüne doğru ivmelenmesine sebep olmuştur. Şekil 4.7.b'de bu yüzden damlacık tahliyesi ilk resimden daha geç gerçekleşmiştir. Şekil 4.7.c'de Outlet-2'den gelen ters akım daha şiddetli olduğu için bir süre sonra damlacık x+ yönündeki tüm hızını kaybetmiştir. Ters yöne ilerleyip outlet-1'den tahliye olmuştur. Şekil 4.7.d'de ise ters akım daha da şiddetli olduğundan damlacık iki akımın karşılaştığı yerde asılı kalmış ve yavaş yavaş azalarak tahliye olmuştur.

Sonuç olarak ekstra eklenen bir rezervuar çıkışının olumlu bir etkisine rastlanmamıştır. Günümüzde pek çok PEM hücresinde yılansı kanal yapısının paralel kanal yapısına karşın tercih edilmesi de bu yüzdendir. Tabi buradaki ana faktör inletin 'velocity inlet' olarak tanımlanmasıdır. Inlet sabit hızla kısıtlandığı için rezervuar çıkışının upstreama etkisi de çok azalmaktadır.

4.2. I Şeklindeki Kanala Rezervuar Çıkışının Etkisi

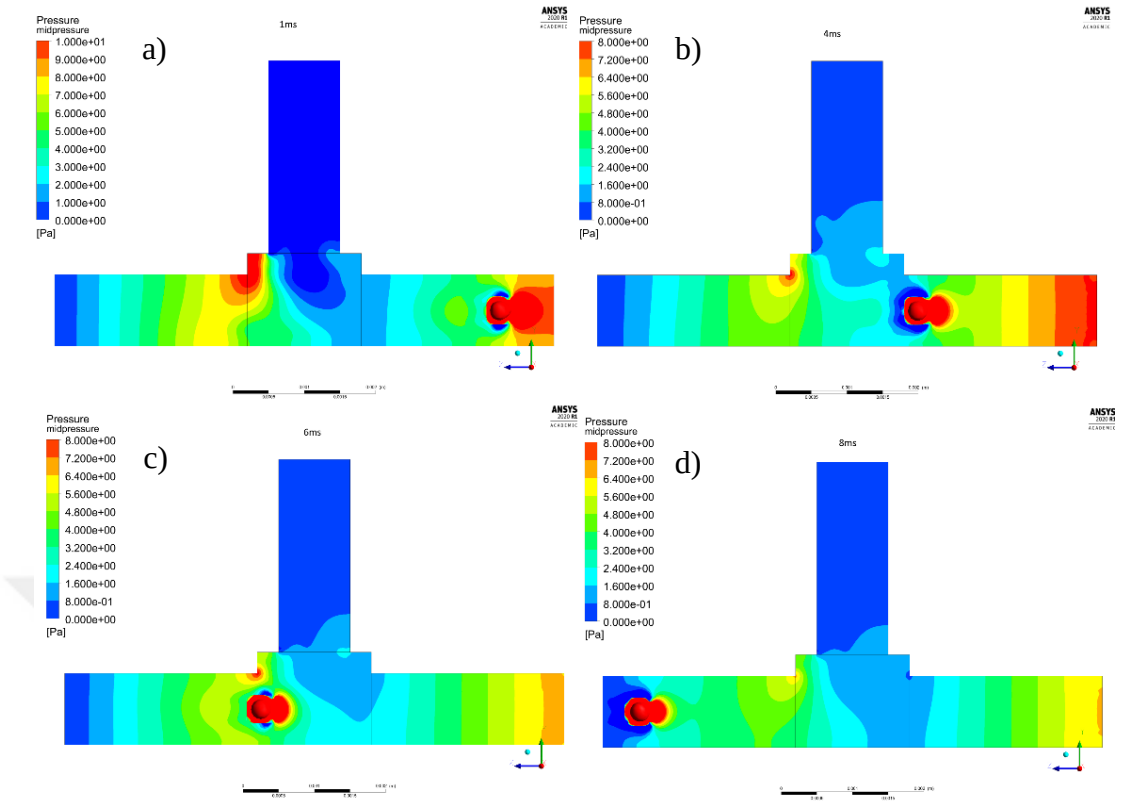
Çalışmanın bu kısmında I formundaki kanala eklenen ekstra bir çıkışın etkileri incelenmiştir. Birinci çalışmanın sonucunda ekstra çıkışın dönüş ve öncesi kısımlara etkisinin ihmal edilebilir olduğu gözlemlenmiş. Bu yüzden geometri sadeleştirilmiştir. Aynı giriş şartlarına ve operasyon parametrelerine sahip durumlar 0,3mm çapındaki su damlası için incelenmiştir.

4.2.1. Rezervuar bağıl basıncı 0 Pa iken damlacık hareketi



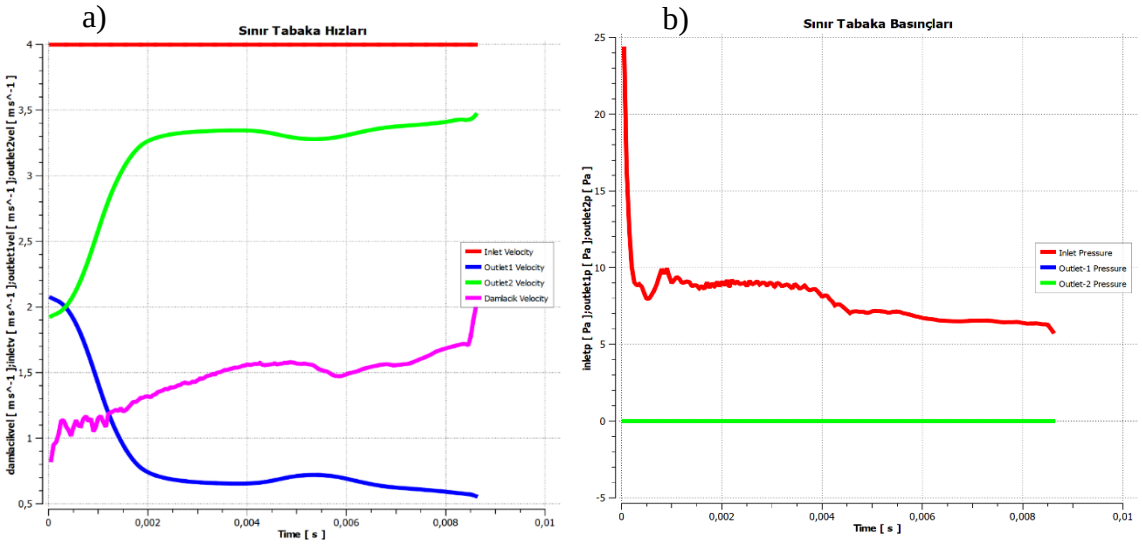
Şekil 4.8. Rezervuar çıkışı 0 Pa iken damlacık hareketi

Rezervuar çıkışı bağıl basıncı 0 Pa iken damlacıkta herhangi bir hareket değişikliği gözlemlenememiştir. Yalnızca bu çıkışın yarattığı basınç düşümünden dolayı, damlacık bir miktar hız kaybetmiştir. Damlacık yaklaşık 4 ms boyunca ivmelenmiş, ardından sabit bir hızla seyretmiştir. Damlacık tam kanalın merkezinden ilerlemiştir.



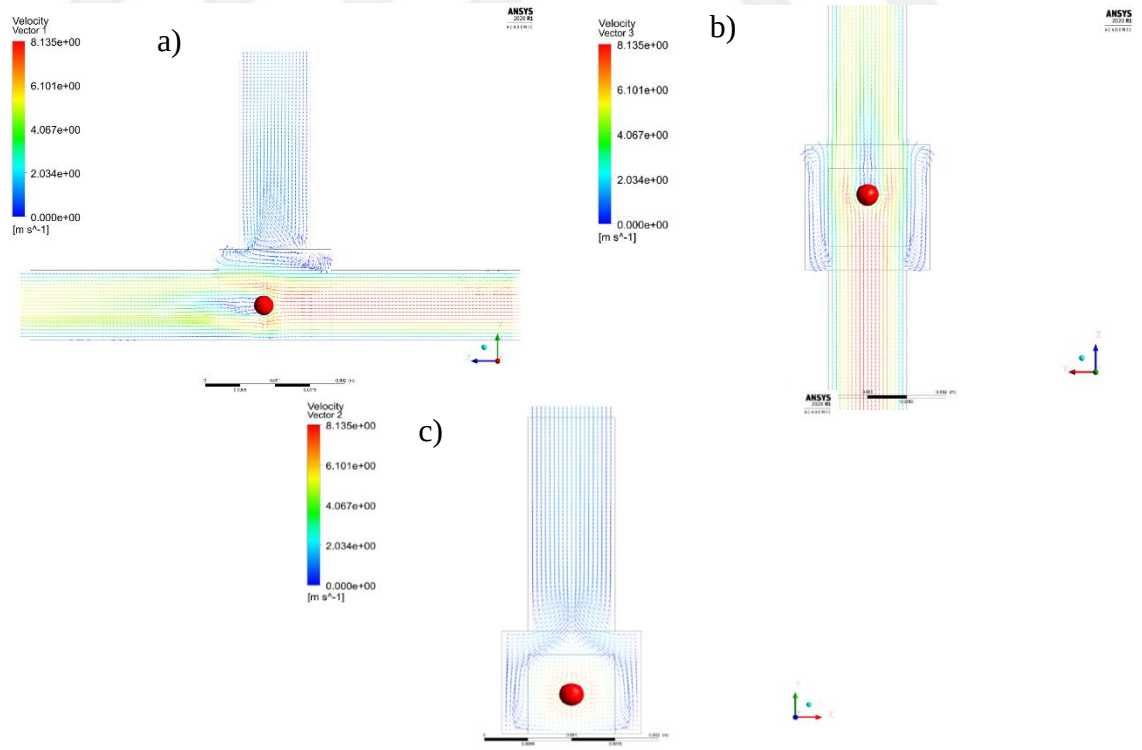
Şekil 4.9. Kanal merkezindeki basınç konturları a) 1ms'de b)4ms'de c) 6ms'de d) 8 ms'de

Şekil 4.9'da görülebileceği üzere rezervuar çıkışı (outlet-1) kanal üzerinde bir düşük basınç bölgesi oluşturmaktadır. Rezervuar ile ana çıkış (outlet-2) arasındaki sivri kenarda bir yüksek basınç bölgesi dikkat çekmektedir. Damlacık atalet kuvvetinin farklı olmasından dolayı etrafındaki havadan farklı bir hızla ilerlediği için çevresinde bir yüksek basınç bölgesi, bu bölgenin hemen dışarısında ise bir düşük basınç bölgesi bulunmaktadır. Damlacık harekete ilk başladığı sırada kanal girişinde basınç yüksekken, damlacığın hareketi ile basınç azalmıştır.

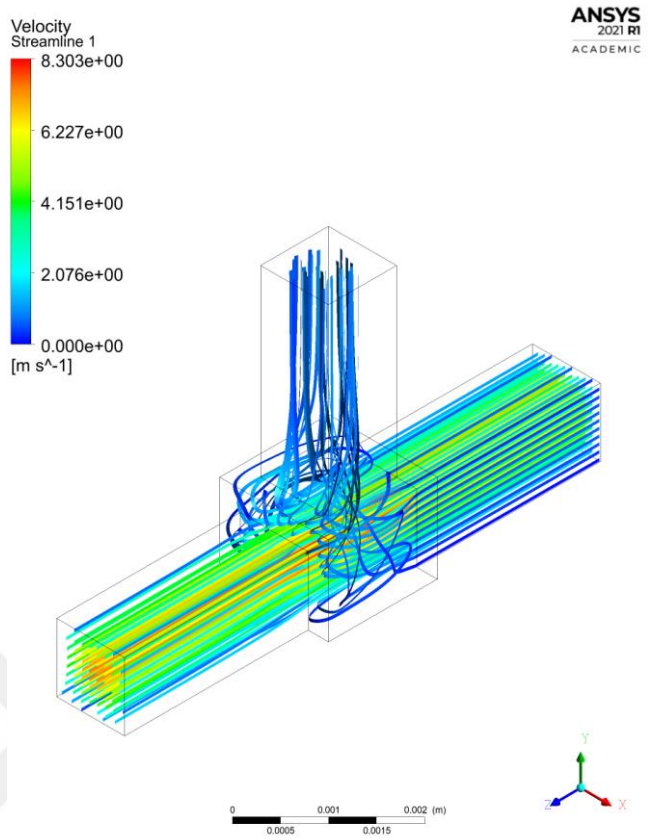


Şekil 4.10 Damlacık yüzeyi ve Sınır tabakalardaki hız ve basınç değişimi a) Hız b) Basınç

Giriş kısmındaki basınç yüksek bir değerden damlacığın harekete başlamasıyla düşmeye başlamaktadır. Rezervuar kısmına geçildiğinde bu düşüş hızlanmış ardından denge konumuna ulaşmıştır. Damlacık rezervuar kısmında ivme kaybetmiştir. Çıkışlarda, inlet hız vektörünün yönü outlet-2'nin lehine olduğu için Outlet-2 tahliye hızı outlet-1'e oranla daha yüksektir. Sistemin tamamen gelişmesi yaklaşık 2 ms almıştır.



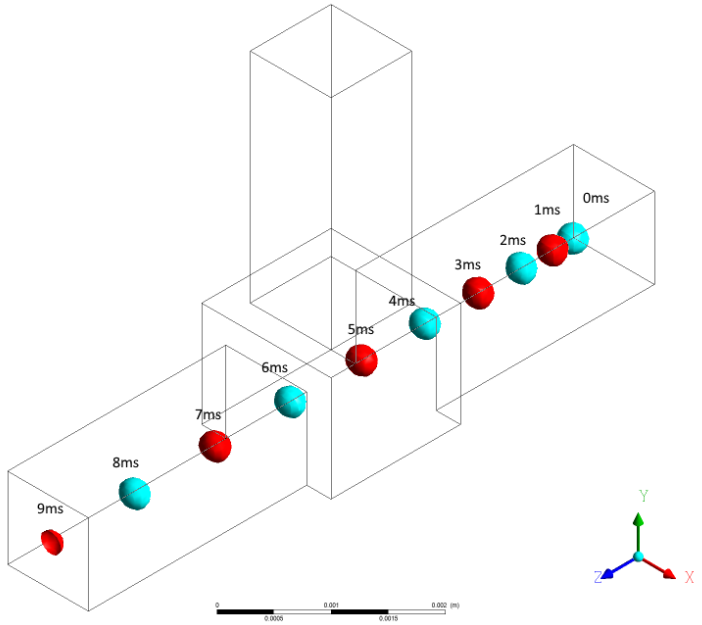
Şekil 4.11. Damlacık rezervuar bölgesindeyken oluşan hız vektörleri



Şekil 4.12. Rezervuar çıkışı 0 Pa iken akım çizgileri

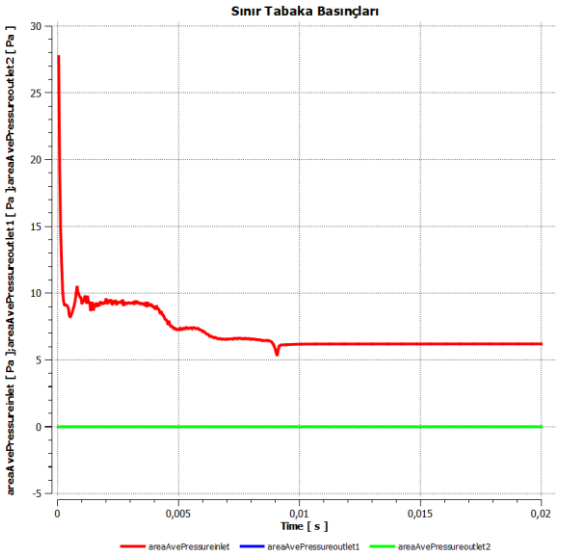
Şekil 4.11'de rezervuar çıkışındaki genişleme pek çok vorteks oluşumuna sebep olmuştur.Şekil 4.12'deki akım çizgilerinden üst duvara yakın ilerleyen akımlar doğrudan outlet-1 den (Rezervuar çıkışından) çıkmıştır. Diğer duvarlara yakın ilerleyen akım çizgilerinin outlet-1 'e doğrudan değil harmonik bir hareketle yöneldiği gözlemlenmiştir.Ayrıca bu çizgiler oldukça düşük bir hızla sistemi terk etmiştir.

4.2.2. Rezervuar bağıl basıncı 0 Pa iken damlacık hareketi (yukarı yerçekimi ivmesi)

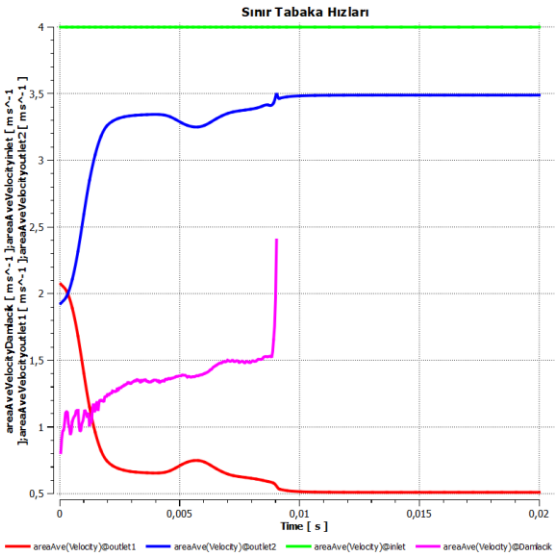


Şekil 4.13. Rezervuar çıkışı 0 Pa iken damlacık hareketi (yukarı yerçekimi ivmesi)

Outlet-1 bağıl basıncı sıfırken, yer çekimi ivmesi yukarı yönde olduğunda damlacık tahliyesi 9 ms de gerçekleşmiştir. Damlacık 4msye kadar ivmelenmiş, ardından sabit bir hızla ilerleyip 9msde tahliye olmuştur. Yerçekiminin aşağı yönde olduğu duruma göre dikkat edilir bir değişikliğe rastlanmamıştır.Yalnızca su tahliyesinde ihmal edilebilir bir gecikme yaşanmıştır.

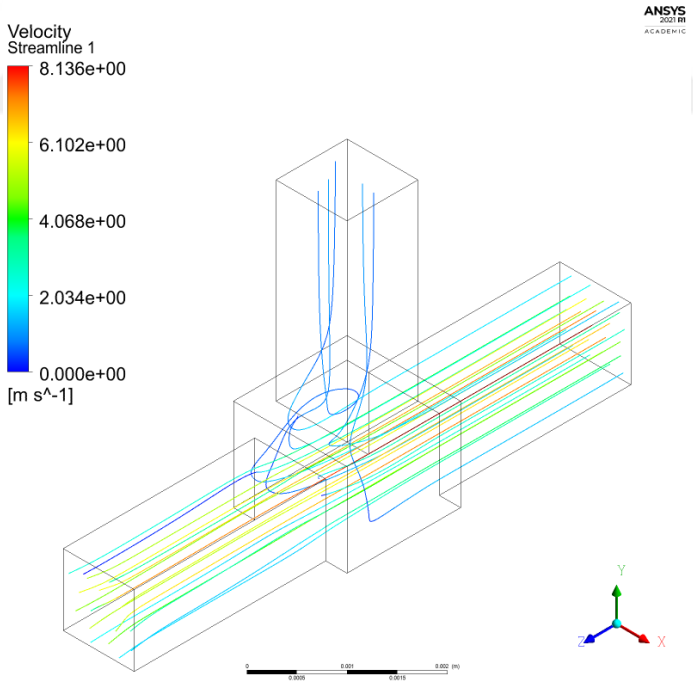


Şekil 4.15. Rezervuar çıkışı 0 Pa iken Sınır Tabaka Basınçları (Yukarı yerçekimi ivmesi)



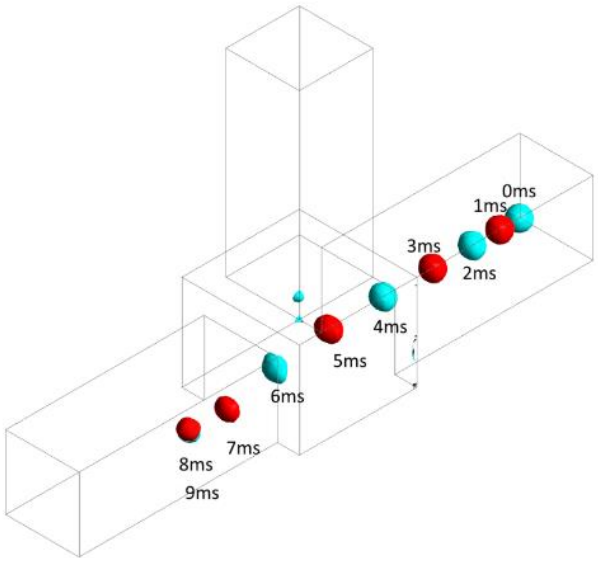
Şekil 4.14. Rezervuar çıkışı 0 Pa iken Sınır Tabaka Hızları (Yukarı yerçekimi ivmesi)

Sınır tabaka basınç ve hızları Şekil 4.15 ve Şekil 4.14'te verilmiştir. Akım çizgileri Şekil 4.16'te gösterilmiştir.Yerçekimi etkisi ihmal edilir düzeydedir.



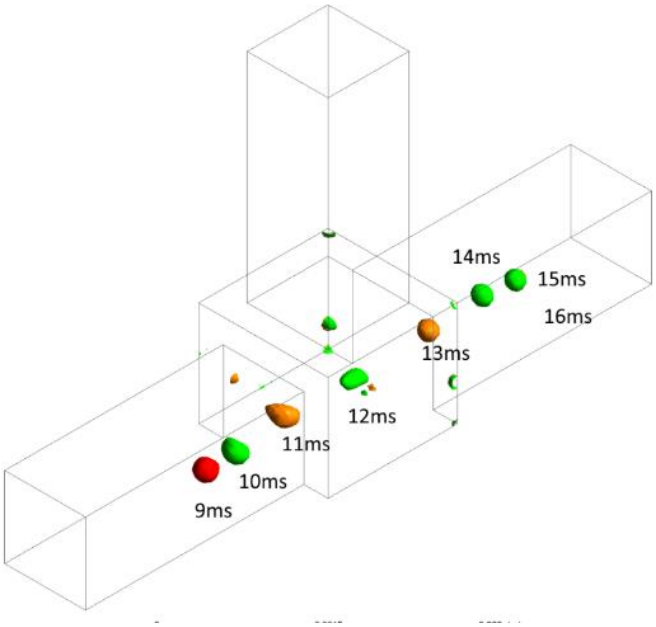
Şekil 4.16. Rezervuar çıkışı 0 Pa iken akım çizgileri (Yukarı yerçekimi ivmesi)

4.2.3. Rezervuar bağıl basıncı -250 Pa iken damlacık hareketi



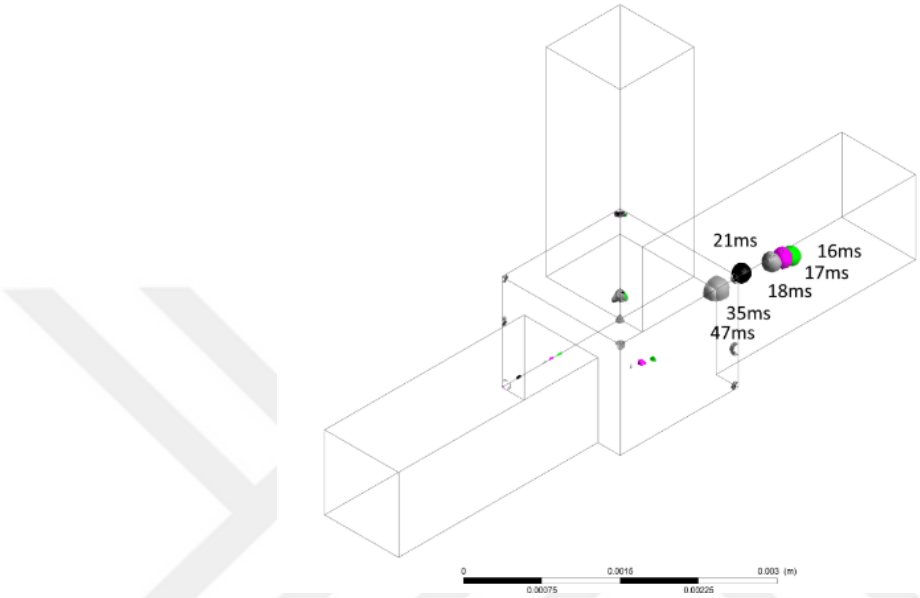
Şekil 4.17. Outlet-1 bağıl basıncı -250 Pa iken damlacık hareketi-1

Outlet-1(rezervuar) bağıl basıncı -250 Pa olduğunda damlacık yol boyunca hız kaybetmiş ve 9ms de tamamen durup inlet yönünde hız kazanmaya başlamıştır.



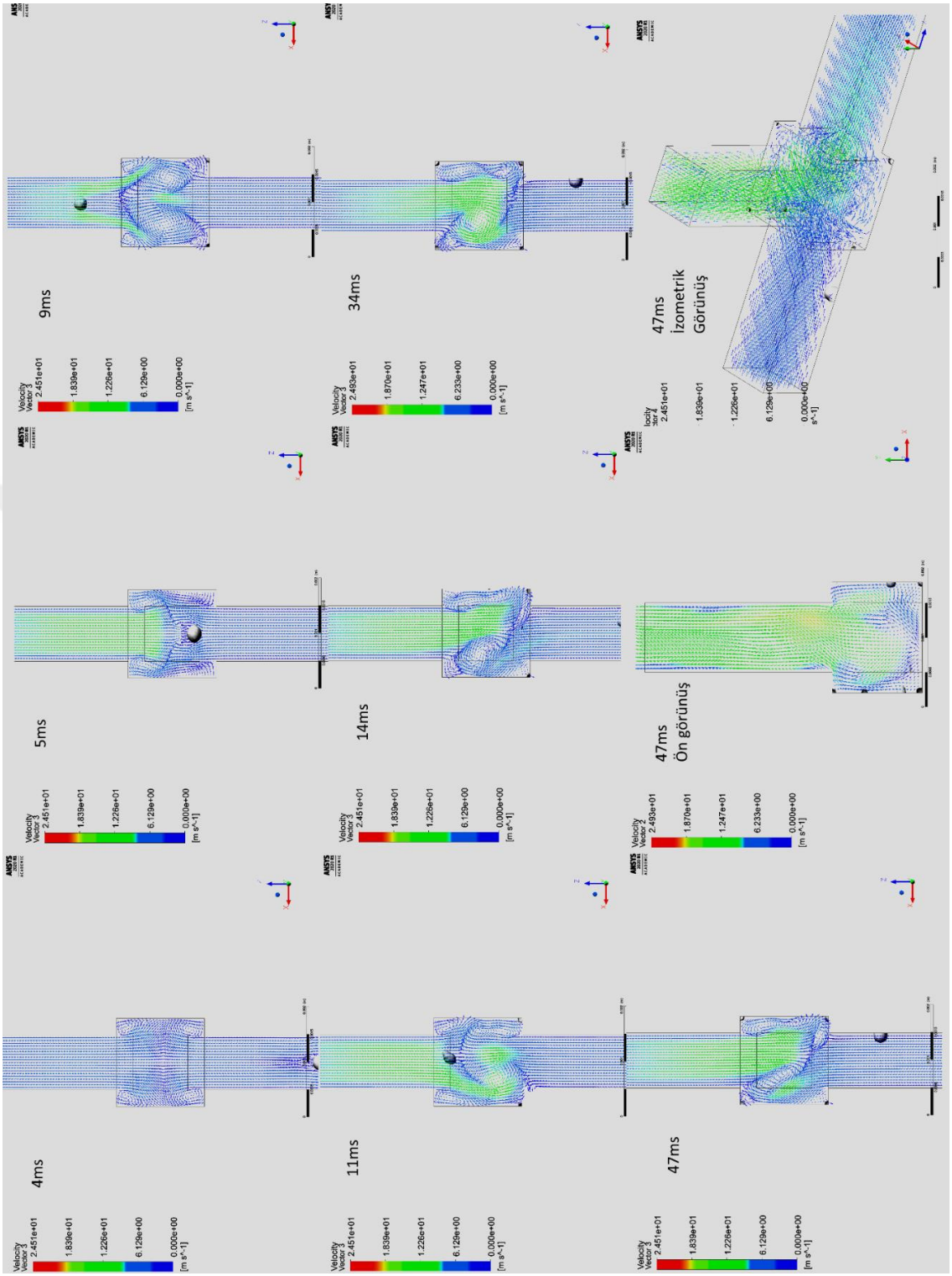
Şekil 4.18. Outlet-1 bağıl basıncı -250 Pa iken damlacık hareketi-2

Ardından 16msde tamamen hız kaybedip Outlet-2(ana çıkış) bölümüne tekrar ilerlemiştir. Belirli bir süre sonra ivme kaybeden damlacık rezervuara yakın bir noktada duvara yapışıp, asılı kalmıştır. Damlacıktan ayrılan bazı parçalar ise 8ms de rezervuar çıkışında asılı kalmıştır.

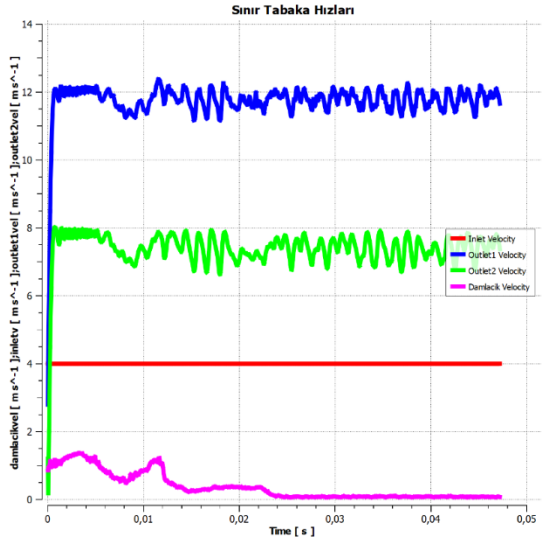


Şekil 4.19. Outlet-1 bağıl basıncı -250 Pa iken damlacık hareketi-3

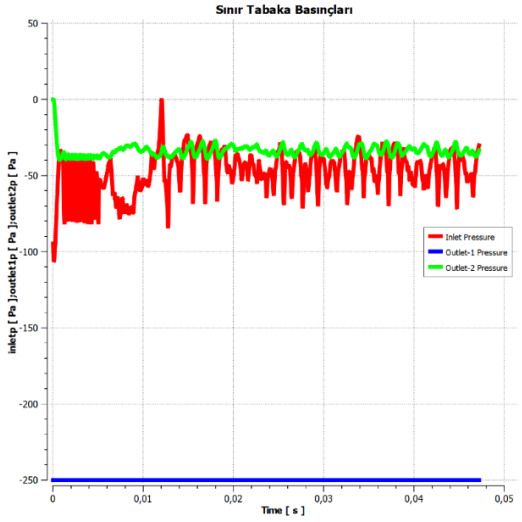
Şekil 4.20'de Inlet kısmındaki vektörler analiz boyunca sabit gibi gözükürken outlet kısmındaki vektörler damlacık hareketine oldukça tepkilidir. Rezervuar kısmında damlacığın harmonik hareketi dikkat çekmektedir. Damlacık 9ms'de yön değiştirmiştir. 11ms de damlacık rezervuar bölümünden geçerken birden fazla vorteks oluşturmuştur. Damlacığın ivme yönü rezervuar çıkışına doğrudur. Ve 14ms de damlacık ikinci sefer durmuş tekrar rezervuar yönüne doğru hız kazanmıştır. Ancak aynı zamanda oluştan vorteks etkisiyle -x yönünde de hız kazanmış ve 34 msde cidara yapışmıştır. Cidara yapıştıktan sonra adezyon kuvvetleri, cidardaki düşük hava akımı ve damlacık etrafında oluşan minik vorteksler sonucunda hızını kaybetmiştir. Ayrıca bir miktar su ana damlacıktan koparak rezervuar çıkışı köşelerine takılmıştır.



Şekil 4.20. Outlet-1 bağıl basıncı -250 Pa iken hız vektörleri



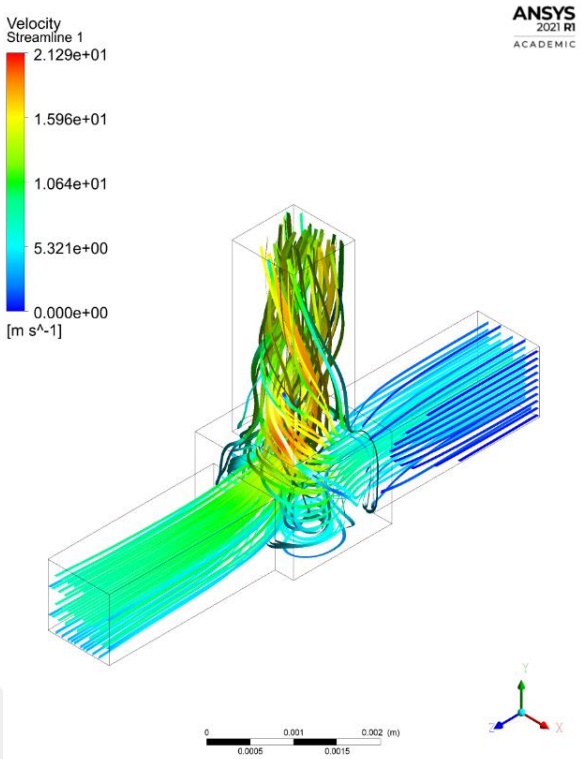
Şekil 4.22. Outlet-1 bağıl basıncı: -250 Pa için sınır tabaka hızları



Şekil 4.21. Outlet-1 bağıl basıncı: -250 Pa için sınır tabaka basınçları

Şekil 4.22'te gösterilen hız doğruları skalardır. Inlet ve outlet-2'den 4m/s ve 8 m/s hızında madde girişi oluyorken outlet-1'den de 12 m/s madde çıkışı gerçekleşmektedir. Damlacık yüzeyindeki ortalama hızda damlacık durduğu zamanlar olan 8ms ve 15ms de bölgesel olarak en düşük noktalarındadır. Outlet1 basıncı tanımlandığı gibi -250 Pa olarak kalırken outlet2 basıncının tanımlanan değerden farklı olarak 30-40 Pa düşük izlendiği gözlemlenmiştir. Bu durum sınır tabakada yüksek bir basınç gradyeni olmasından dolayı gerçekleşmiştir.

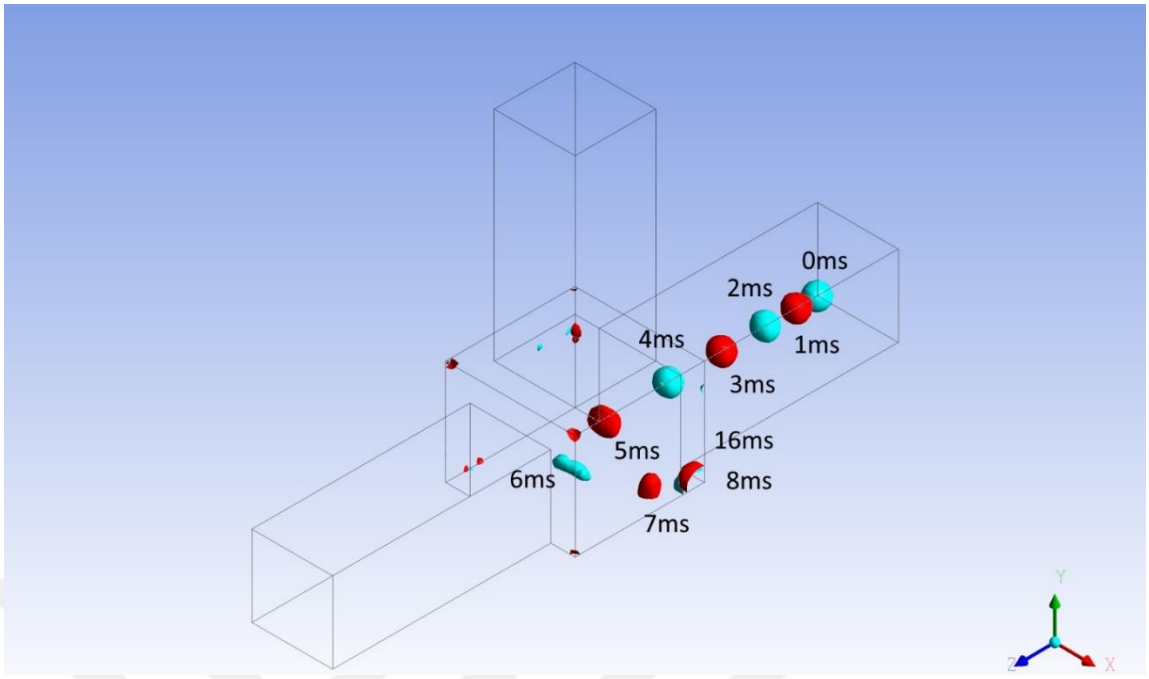
Şekil 4.23'den görüldüğü üzere giriş kanalında duvara yakın bazı akım çizgileri rezervuar bölümüne varmadan önce kesilmiştir. Bu duruma aniden genişleyen kesit alanının etkisi olmuştur, çünkü orta hattan gelen akım çizgileri genişleyerek kenardakileri sıkıştırmıştır. Çıkış kısmından giren ters akımlar ile birleşen akım çizgileri rezervuar bölümünde büyük bir vorteks oluşturmuştur.



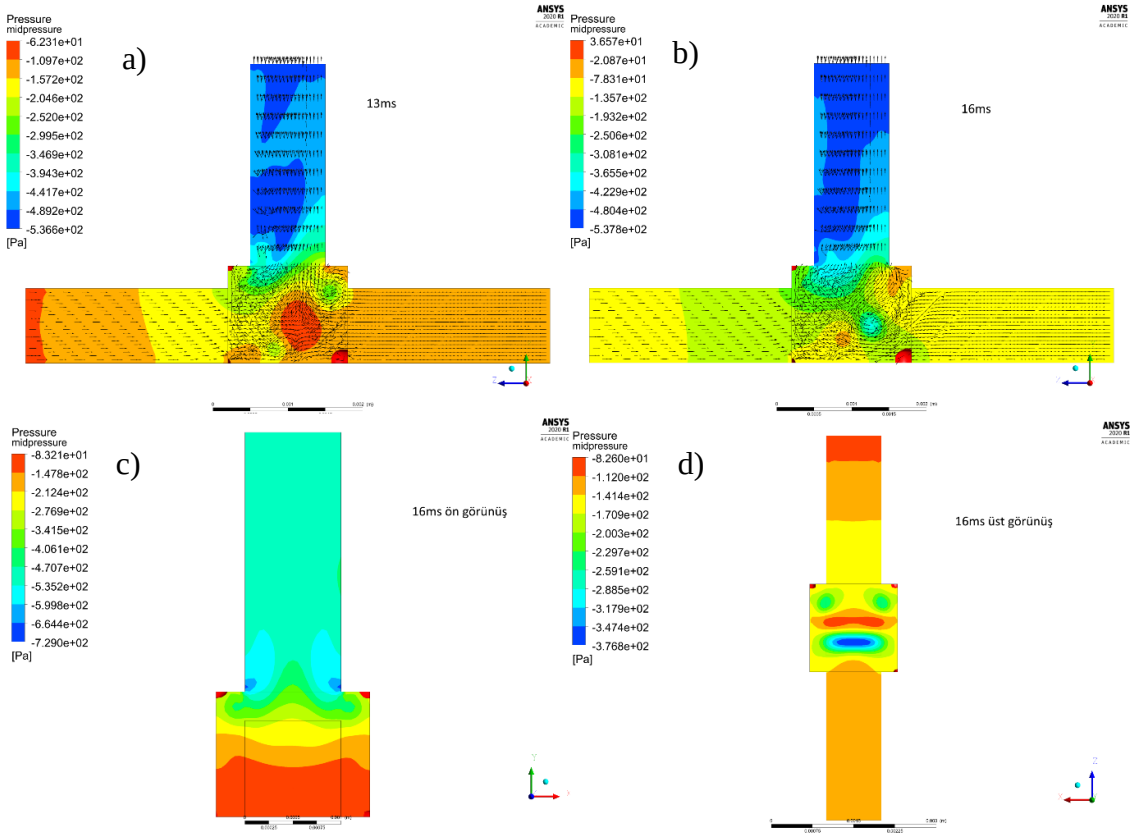
Şekil 4.23. Rezervuar çıkışı -250 Pa iken akım çizgileri

4.2.4. Rezervuar bağıl basıncı -500 Pa iken damlacık hareketi

Outlet1'in basıncı -500 Pa olduğu zaman damlacık rezervuar bölgesini geçememiştir. Rezervuar bölgesinde hacimce bir miktarını rezervuara kaybederken, bir miktarıysa damlacıktan koparak rezervuar çıkışının köşelerine takılmıştır.6ms de +z yönünde hızını kaybedip geriye doğru ve +x yönüne ilerlemeye başlamıştır. Ardından rezervuar duvarına yapışarak burada asılı kalmıştır.



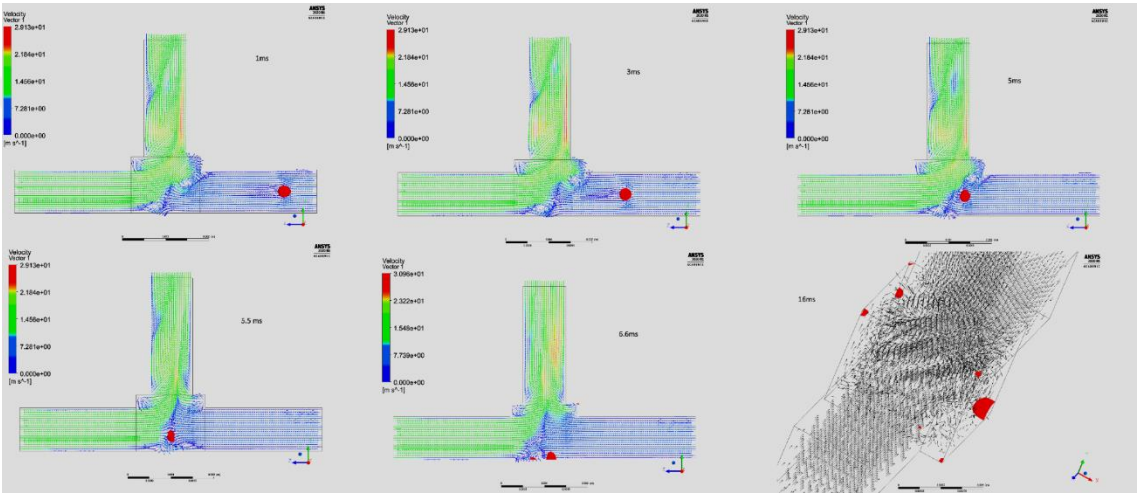
Şekil 4.24. Outlet-1 bağıl basıncı -500 Pa iken damlacık hareketi



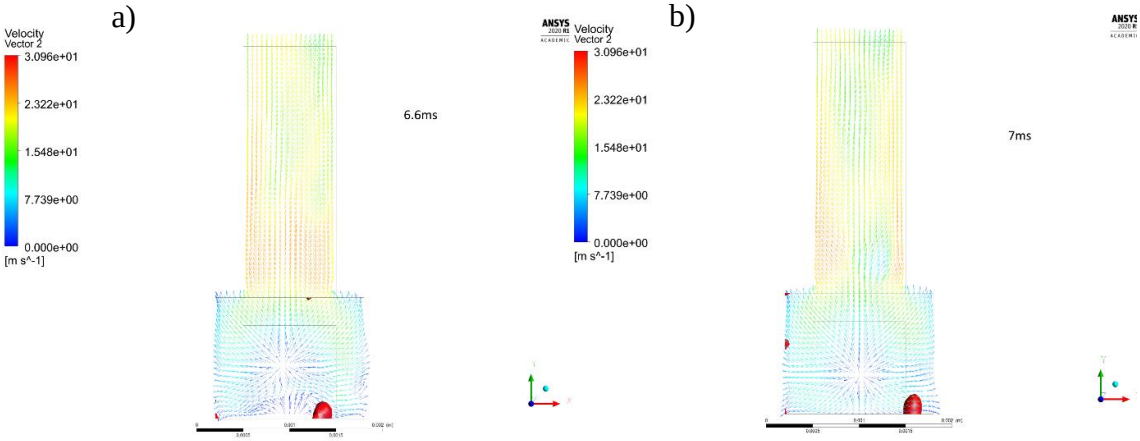
Şekil 4.25. Outlet-1 bağıl basıncı -500 Pa'da basınç kontürü ve hız vektörleri

Kanalın dip kısımlarında ve akımların birleştiği bölgelerde basıncın daha yüksek olduğu görülmüştür. İki akımın birleştiği bölgede de basınç farklılıkları görülmektedir. Bu bölgelerde çok sayıda vorteks oluşmuştur. İki akımın birleştiği yerde -yani kanalın tam ortasında- oluşan yüksek basınç bölgesi hız vektörlerinin ortadan dışarıya doğru olmasına sebep olmaktadır.

Damlacık 5.5 ms'de iki vorteksin birleştiği yere geldiğin zaman hızını büyük ölçüde kaybetmiştir. Aynı noktada bir miktar kütle kaybetmiştir. Ardından +x yönüne meylederek gidip rezervuar çıkışı duvarının dibine yapışmıştır.

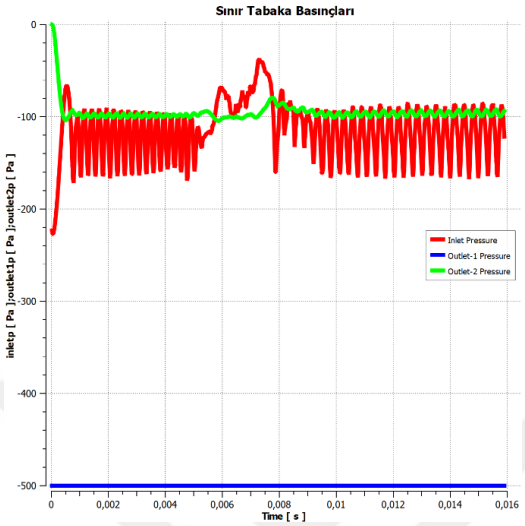


Şekil 4.26. Outlet-1 bağıl basıncı -500 Pa'da belirli zamanlardaki hız vektörleri

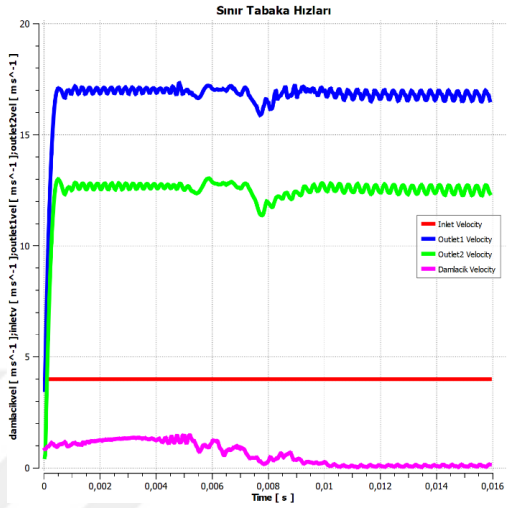


Şekil 4.27. Outlet-1 bağıl basıncı -500 Pa'da belirli zamanlardaki hız vektörleri-2

Şekil 4.26'da rezervuar bağlantı noktasının tam merkezindeki hız vektörlerinin güçsüz ve dış yöne doğru olduğu görünebilir. Bu vektörlerin etkisiyle, damlacık merkezde kalmamış, köşe duvara doğru yol almıştır.



Şekil 4.29. Outlet-1 bağıl basıncı -500 Pa'da sınır tabaka basınçları

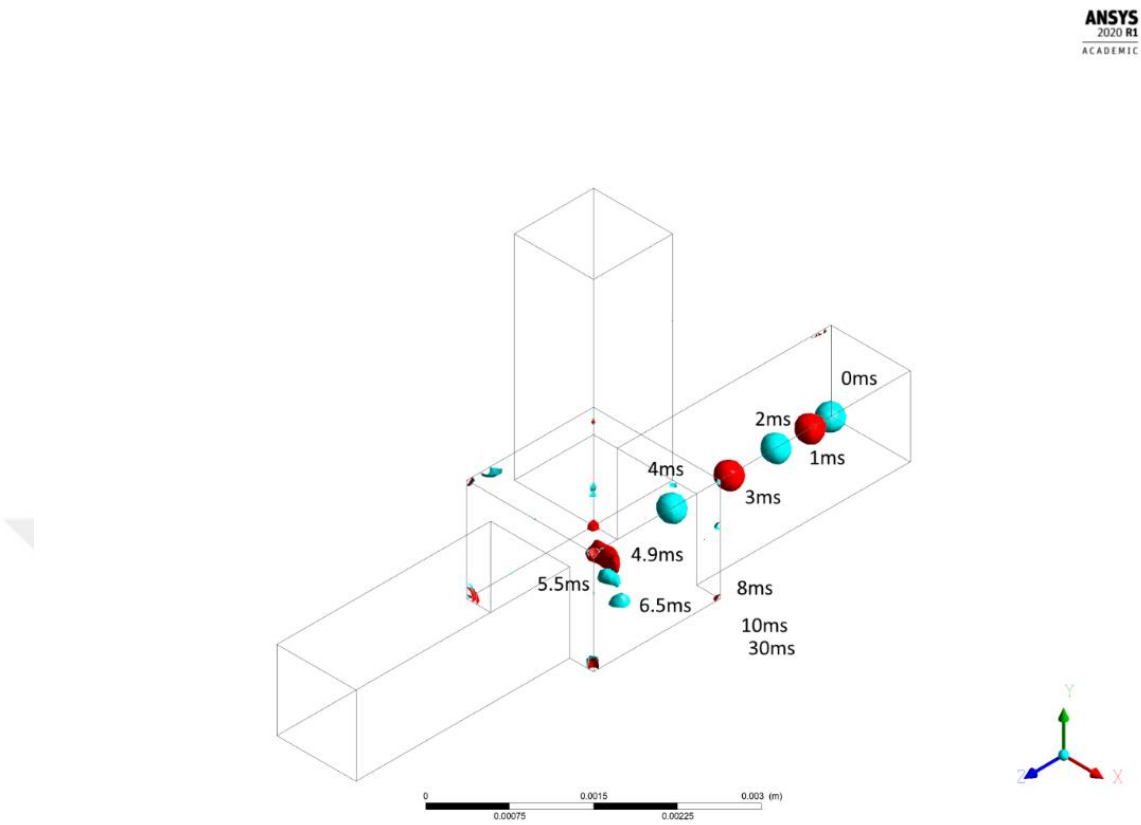


Şekil 4.28. Outlet-1 bağıl basıncı -500 Pa'da sınır tabaka hızları

Outlet1 basıncı, -diğer iki sınır tabakanınkine göre düşük olduğu için-, Inlet ve outlet-2 basıncını etkilemiştir. Çözüm koşullarında 0 bağıl basınç olarak tanımlanmasına rağmen outlet-2 basıncı -100 Pa değerinde dengeye ulaşmıştır. 6ms'de damlacığın kütle ve hız kaybetmesiyle hem inlet hem outlet basıncında yükselme gözlemlenmiştir.

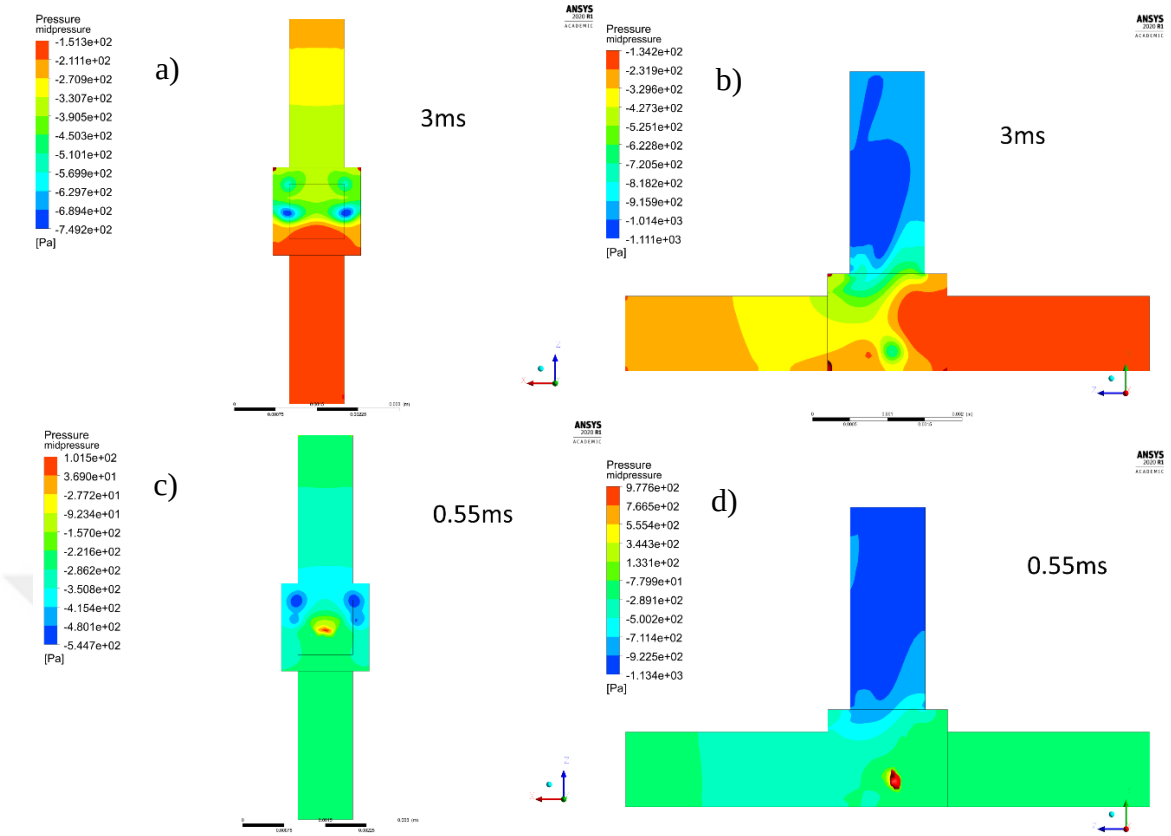
500 Pa'dan sonra rezervuar outlet-2'den yüksek miktarda akıntı çekmeye başlamaktadır. Damlacık 4 msye kadar hızını arttırmış ardından hız kaybetmeye başlamıştır. 10ms de ise kanal dibine yapışarak hızını kaybetmiştir.

4.2.5. Rezervuar bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi



Şekil 4.30. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi

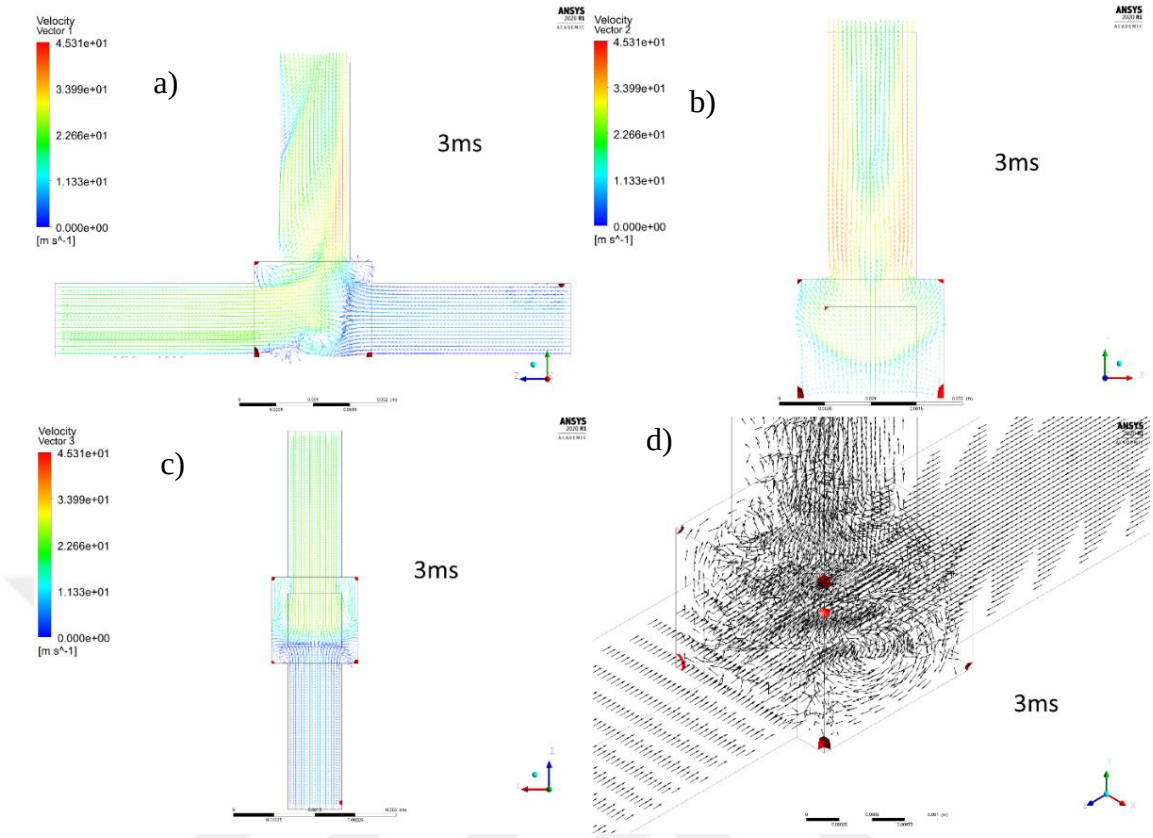
Outlet-1 basıncı -1000 Pa olduğunda damlacık artık rezervuar bölümünden büyük ölçüde tahliye olmaktadır. 4.9ms de +z yönündeki hızını kaybeden damlacık havada asılı kaldığı süre boyunca hacimce azalmıştır. Damlacıktan kopan bazı parçacıklar köşe noktalarda takılı kalırken damlacığın büyük bölümü rezervuardan çıkmıştır. Ancak bu tahliye işlemi çok küçük su parçalarının hızla rezervuardan çıkması şeklinde gerçekleştiği için bu analizde yol olarak görülememiştir. Damlacık 6.5msde rezervuar tabanına yapışmıştır. 8msde ise hacmen %80ini kaybetmiş şekilde köşe noktalara sürüklenmiştir. Burada denge ye ulaşmış ve asılı kalmıştır.



Şekil 4.31. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken basınç kontürü

Denge zamanında ve damlacığın kütle kaybettiği zamanlardaki basınç kontürü Şekil 4.31'de gösterilmiştir. Basınç kontürleri tüm grafiklerde benzer özellik göstermektedir.

Denge anında ve simülasyon boyunca yer yer düşük basınçlara rastlanmıştır. Bu bölgelerde vorteksler oluşmuştur.

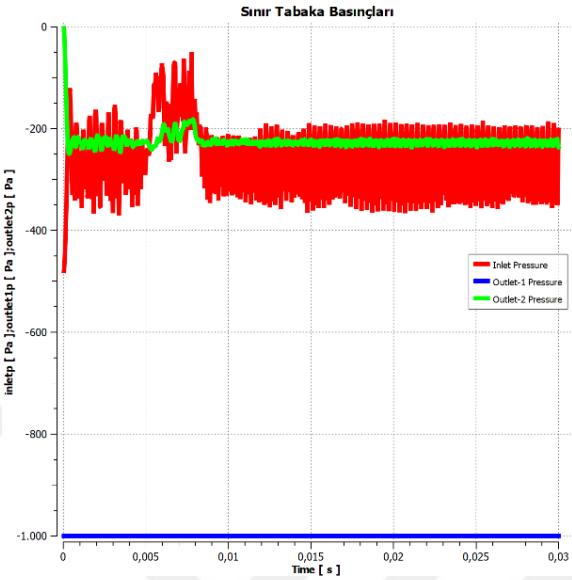


Şekil 4.32. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken belirli zamanlardaki hız vektörleri

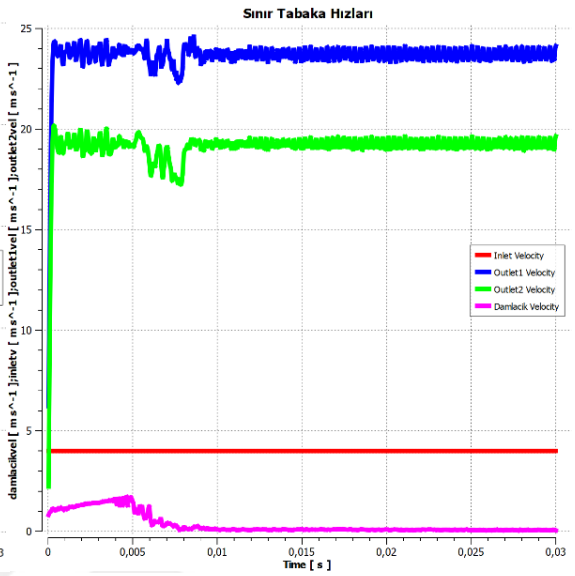
Denge anındaki hız vektörleri incelendiğinde akıntının cidara doğru olan bölgelerde, kanal merkezine yakın bölgelerden daha hızlı olduğu gözlemlenmektedir. Z ekseni üzerinde üç büyük vorteks oluşmuş, y ekseni üzerinde de ufak vorteksler oluşmuştur. Bu vorteksler damlacığın parçalanmasına ve rezervuar duvarı köşelerine doğru sürüklenmesine sebep olmuştur.

Şekil 4.33'de inlet ve outlet basıncı -240 Pa civarında gözükmektedir. Ancak damlacık tahliyesinin gerçekleştiği zamanlarda inlet ve outlette basınç yükselmesi yaşanmıştır. Bunun sebebinin outlet-1 deki tahliye alanının anlık olarak düşmesidir.

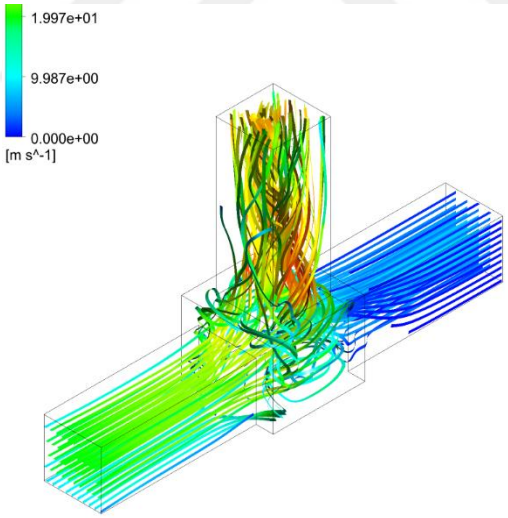
Damlacık tahliyesi boyunca outlet hızlarının düşmesinin sebebi su damlasının havadan daha yavaş hareket etmesidir. Outlet-1 hızı 23,5 m\s iken outlet 2 hızı 19,5 m/s olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 4.33. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka basınçları



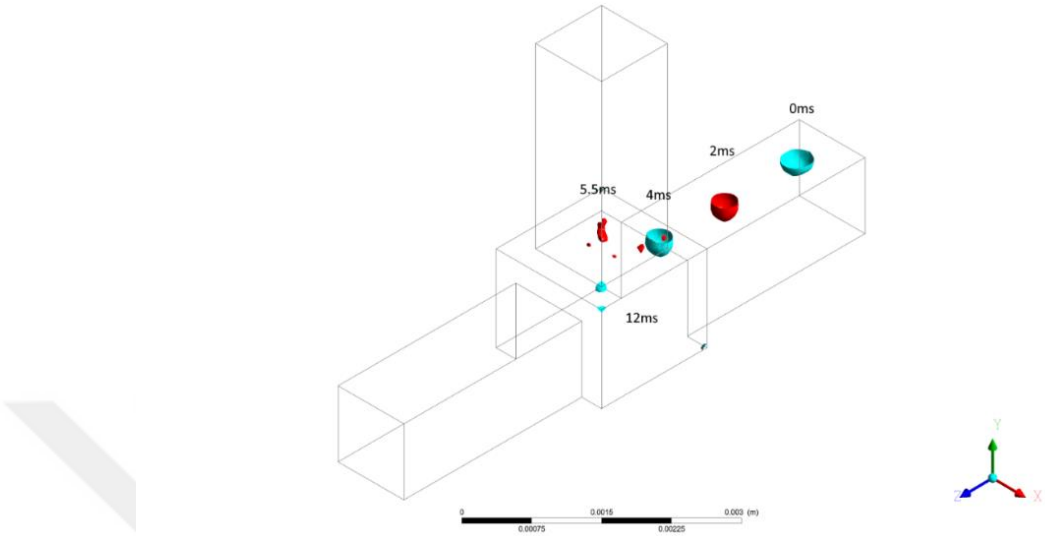
Şekil 4.34. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka hızları



Şekil 4.35. Rezervuar çıkışı -1000 Pa iken akım çizgileri

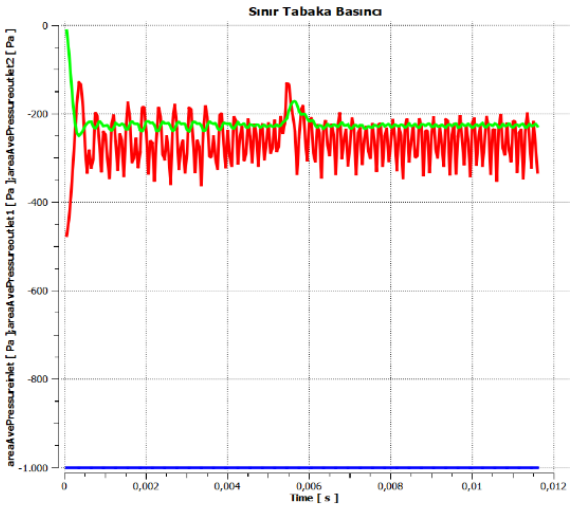
Şekil 4.35'deki akım çizgileri incelendiğinde outlet-2'den gelen akıntının hızla tahliye olduğunu ancak outlet-1 köşelerinden ve inletten gelen akımların doğrudan tahliye olmadığı gözlemlenmiştir. Bu yönden gelen çizgiler kimi zaman duvar bölümünde yarım kalmış, kimi zamansa düşük bir hızla rezervuar bölümünde burgusal hareketler yapmıştır.

4.2.1. Rezervuar bağıl basınç = -1000 Pa iken ve damlacık tepeye bağlı iken damlacık hareketi

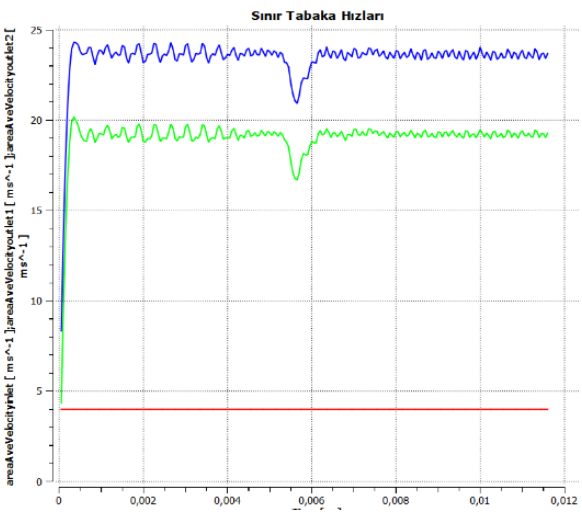


Şekil 4.36. Outlet-1 bağıl basınç = -1000 Pa iken damlacık hareketi(damlacık tepede)

Damlacığın tepede bulunması tahliye durumunu olumlu etkilemiştir. Üst yüzeyi takip eden damlacık rezervuar bölümünde maruz kaldığı güçlü akım sonucunda parçalanmış, ancak büyük bölümü tahliye olmuş, bir miktarı da rezervuar çıkışı köşe noktalarına dağılıp oralarda asılı kalmıştır. Damlacık tahliyesi 6ms de gerçekleşmiştir. Inlet basıncı daha önceki aynı basınçlı durumlardaki gibi -250 Pa da seyretmiştir. Hızlarda önceki durumlarla aynı özellik göstermektedir.

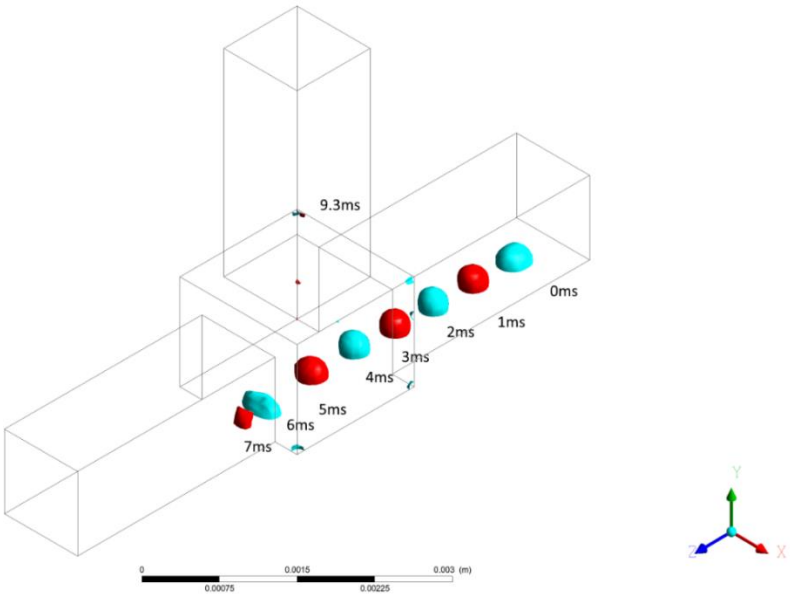


Şekil 4.37. -1000 Pa'da sınır tabaka basınçları (damlacık tepede)



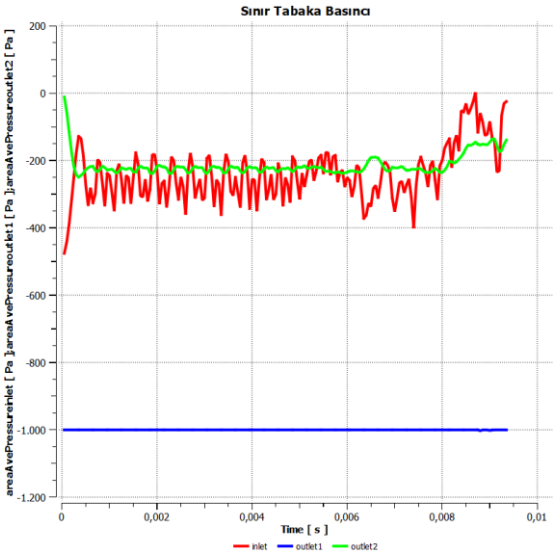
Şekil 4.38. Outlet1: -1000 Pa'da sınır tabaka hızları (damlacık tepede)

4.2.1. Rezervuar bağıl basınç = -1000 Pa iken ve damlacık dibe bağlı iken damlacık hareketi

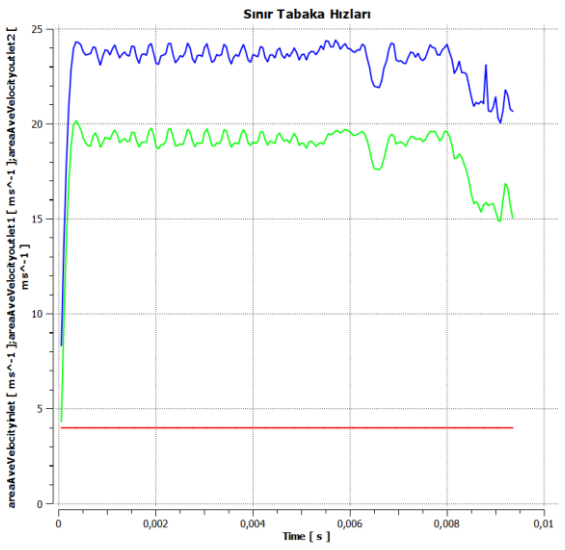


Şekil 4.39. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi (damlacık dipte)

Damlacık dip kısımda olduğu durumda dip bölgedeki düşük akıntı hızı ve yüzeyin devamlılığı damlacığın bir süre azalmadan ilerlemesine sebep olmuştur. Damlacık 6 m\s ye kadar hız kaybetmemiş ancak bu sürenin sonunda outlet-2'den gelen akım ile inletten gelen akım arasında kalarak bir miktar kütle kaybetmiştir. Damlacık 9ms sonunda tahliye olmuştur.

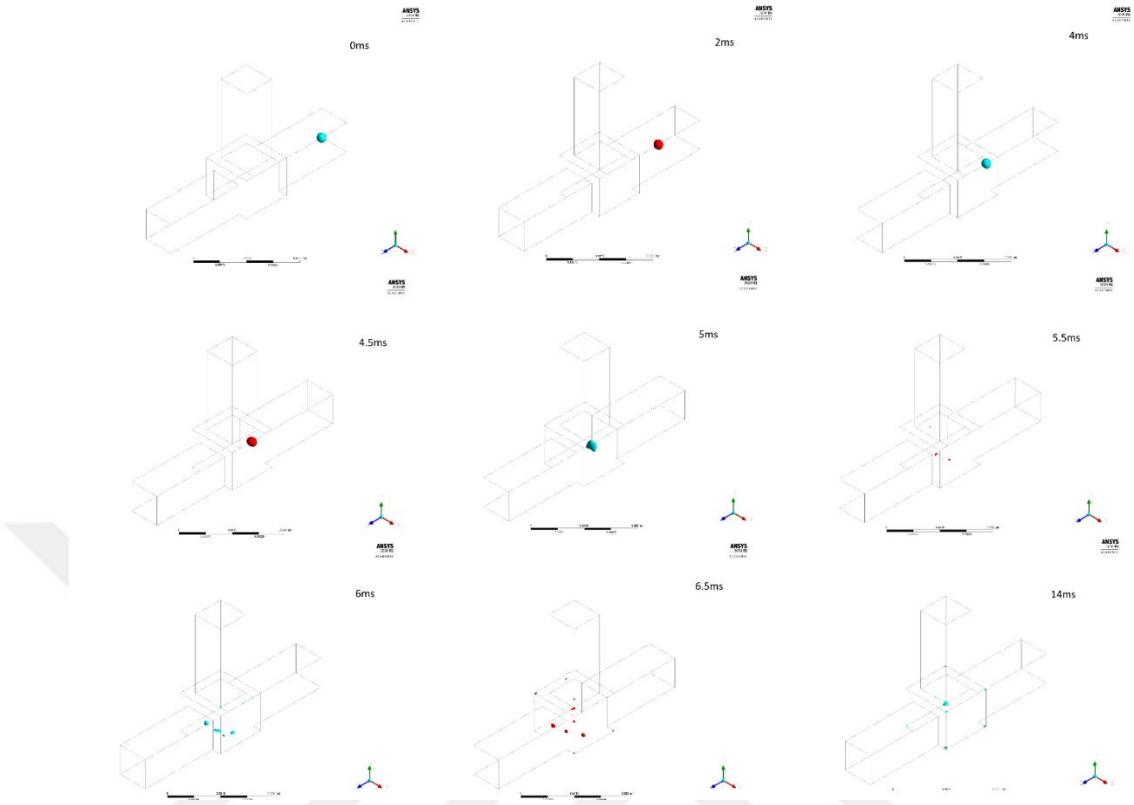


Şekil 4.41 Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka basınçları (damlacık dipte)



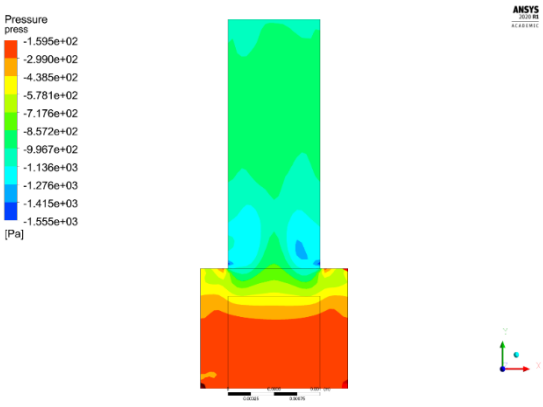
Şekil 4.40 Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka hızları (damlacık dipte)

4.2.1. Rezervuar bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi(yerçekimsiz)

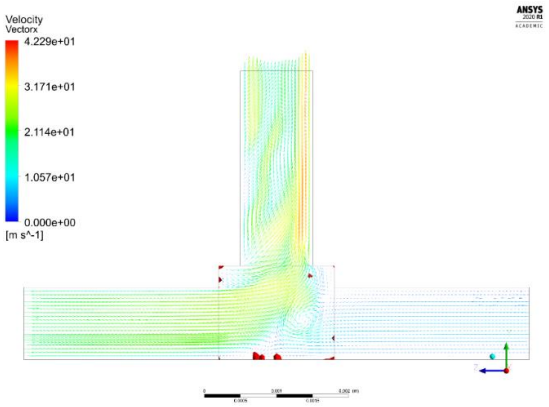


Şekil 4.42. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi (yerçekimsiz)

Sistemden yer çekimi etkisi kaldırıldığında damlacık hareketinde gözle görülür bir değişiklik rastlanmamıştır. 5,5 msde rezervuarın ortasına ulaşan damlacık akıntının etkisiyle hızla tahliye olmuş, kopan bazı parçacıklar rezervuarın tabanına yapışarak buradan köşe noktalara sürüklenmişlerdir.

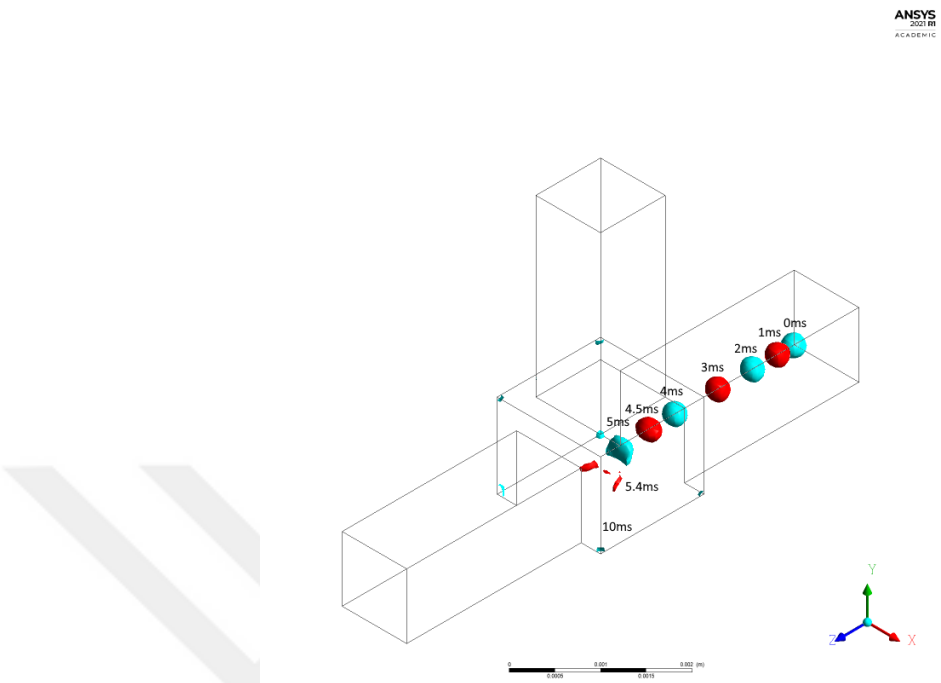


Şekil 4.44. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken basınç kontürü (yerçekimsiz)



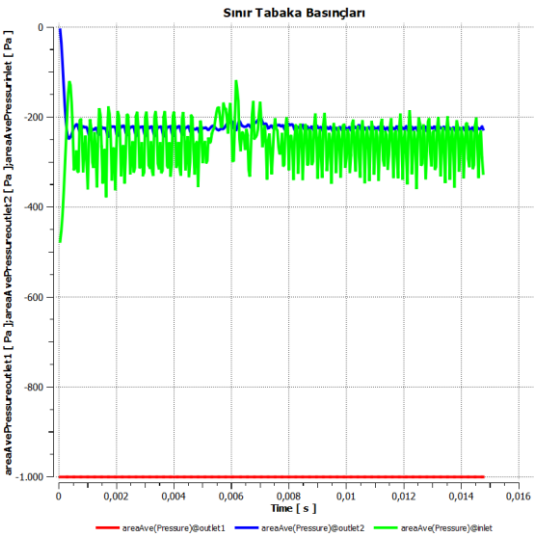
Şekil 4.43. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken belirli zamanlardaki hız vektörleri(yerçekimsiz)

4.2.2. Rezervuar bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi (yukarı yerçekimi ivmesi)

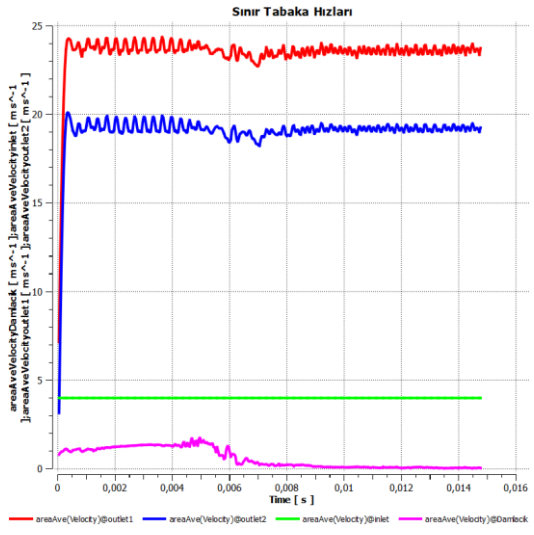


Şekil 4.45. Rezervuar çıkışı -1000 Pa iken akım çizgileri (Yukarı yerçekimi ivmesi)

Yerçekimi ivmesi yukarı yönde olduğundaki damlacık hareketi Şekil 4.45'da gösterilmiştir. Yerçekimi ivmesinin etkisinin az olduğu gözlemlenmiştir.

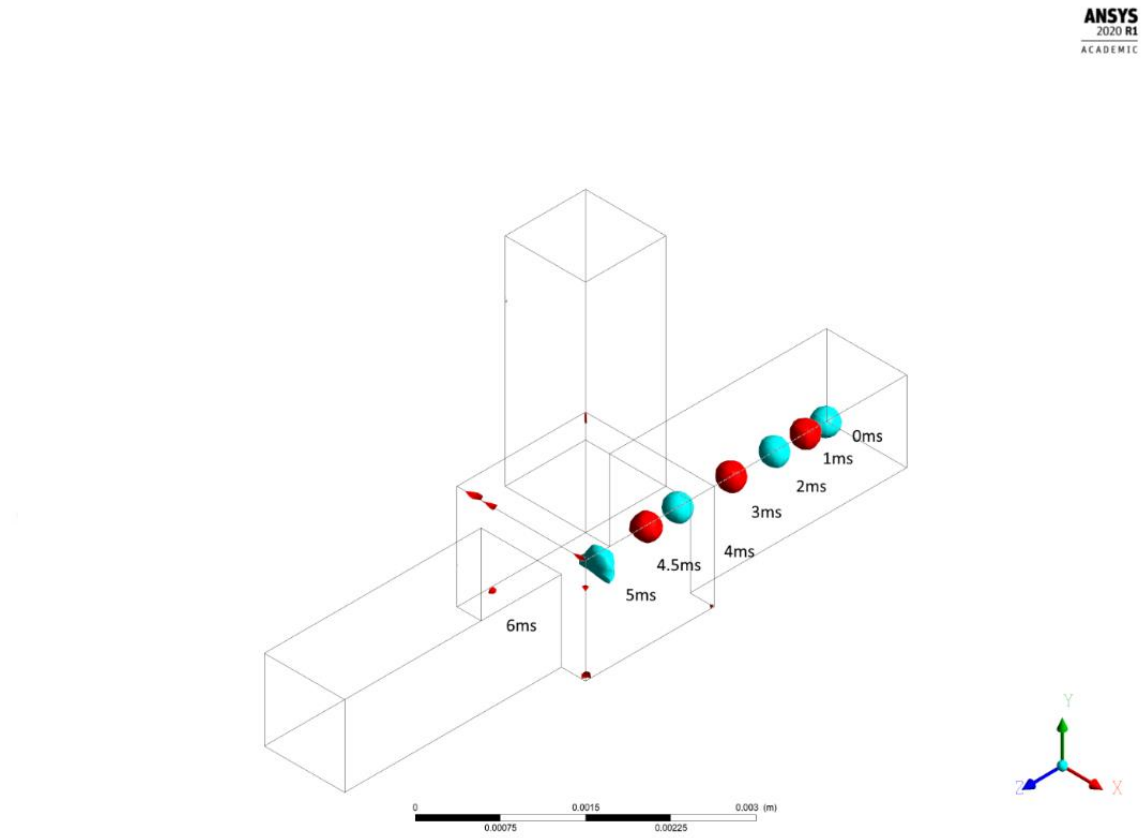


Şekil 4.46. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka basınçları (Yukarı yerçekimi ivmesi)



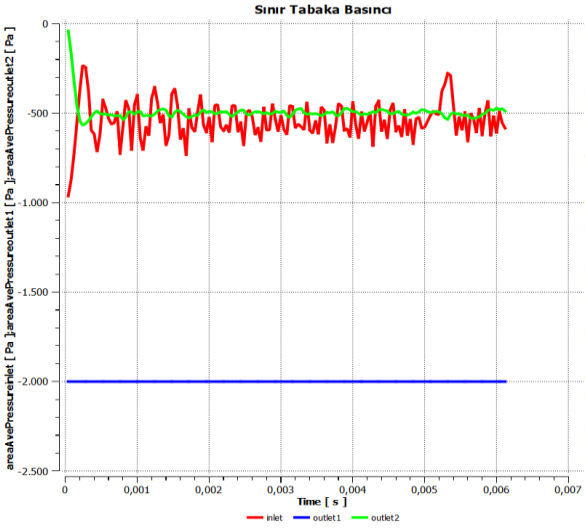
Şekil 4.47. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka hızları (Yukarı yerçekimi ivmesi)

4.2.3. Rezervuar bağıl basıncı -2000 Pa iken damlacık hareketi

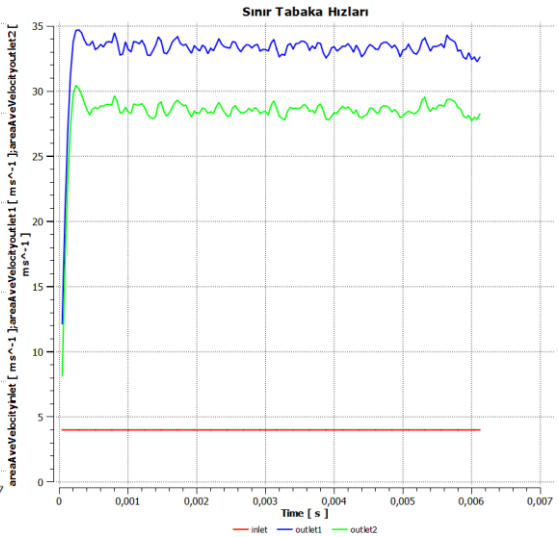


Şekil 4.48. Outlet-1 bağıl basıncı -2000 Pa iken damlacık hareketi

-2000 Pa'da damlacık 5ms'de rezervuar bölümüne gelmiş. 6msde tahliye olmuştur. Akım diğer durumlara benzer özellik göstermektedir.



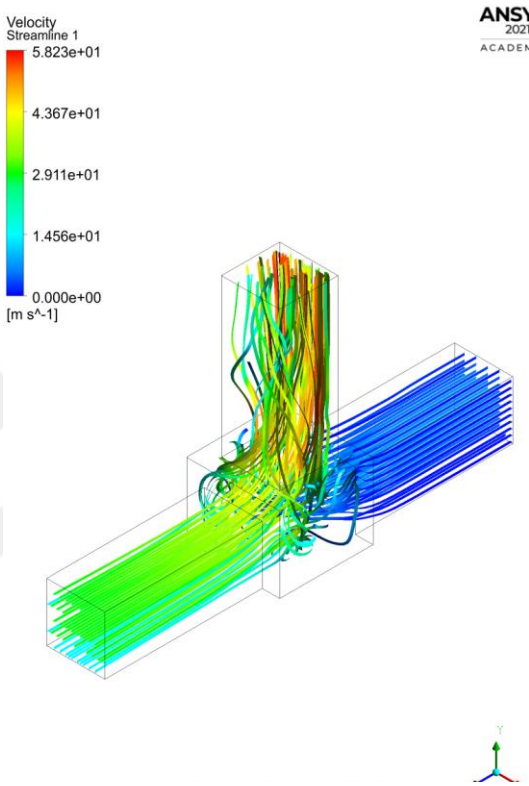
Şekil 4.49. Outlet-1 bağıl basıncı -2000 Pa iken sınır tabaka basınçları



Şekil 4.50. Outlet-1 bağıl basıncı -2000 Pa iken sınır tabaka hızları

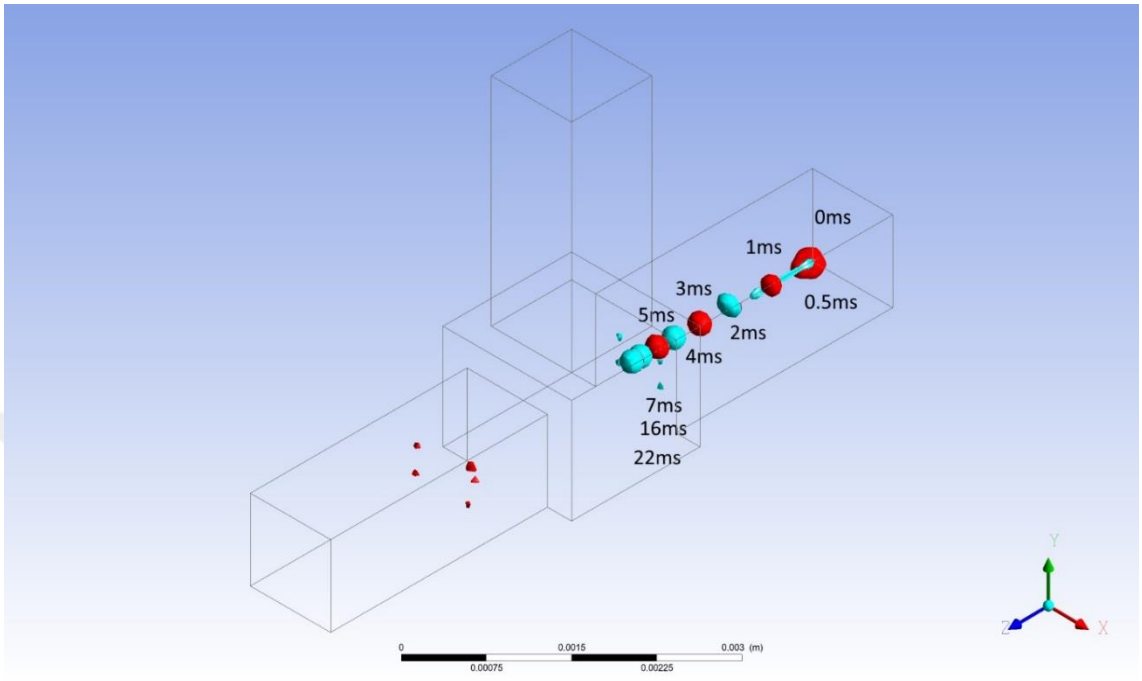
Inlet basıncı -580Pa gözükürken Outlet-1 ve Outlet-2 hızları sırasıyla 33m\s ve 29 m\s görünmektedir. Outlet basıncının düşürülmesi tahliyeyi hızlandırmıştır.

Basınç farkı 2000 Pa olduğunda kesik akım çizgi sayısında ciddi bir azalma görünmüştür. Vorteks miktarı da azalmakta, akım doğrudan outlet kısmından dışarı çıkmaktadır.



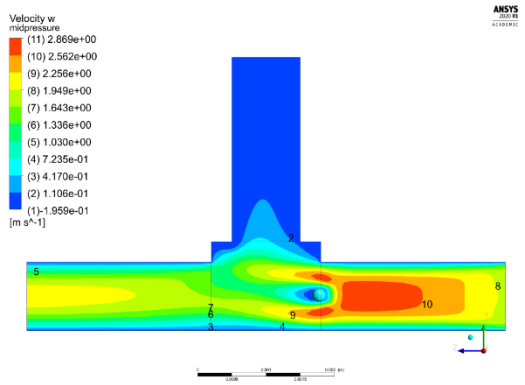
Şekil 4.51. Rezervuar çıkışı -2000 Pa iken akım çizgileri

4.2.4. Rezervuar bağıl basıncı 0 Pa iken damlacık hareketi (inlet: pressure inlet 5 Pa)

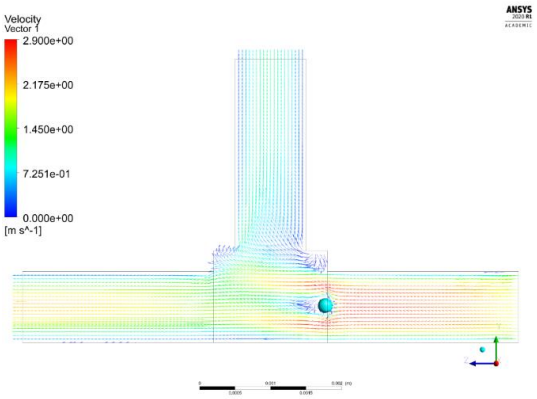


Şekil 4.52. Outlet-1 bağıl basıncı 0 Pa iken damlacık hareketi

Şekil 4.52'te inlet 5 Pa outletler 0pa olarak tanımlanmıştır. Damlacık ilk zaman adımından sonra hemen deforme olmuş. Ardından bir miktar damlacık parçası koparak hızla outletten çıkmıştır. 1ms'de geriye kalan ufalmış parça bir süre ilerledikten sonra negatif yönde ivme kazanmış (veya hız kaybetmiş) ardından 7ms'de durma noktasına gelmiştir.16msde tam kanal çıkışında asılı kalmıştır. 22 ms ye gelinince neredeyse hiç hareket etmemiştir. Kanalın tam ortasından geçen bir yüzey üzerinde z yönündeki hız kontürü ve vektörleri Şekil 4.53 ve Şekil 4.54'te gösterilmiştir.

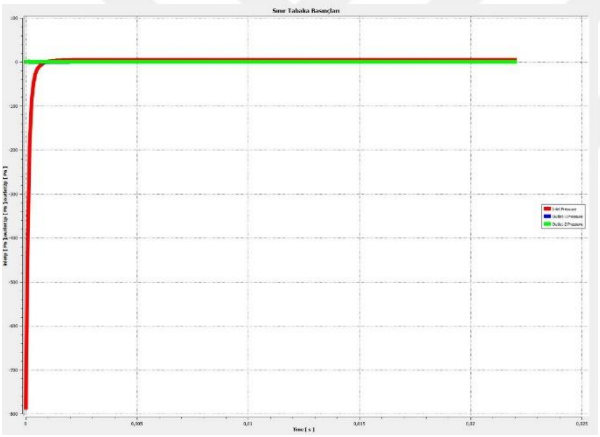


Şekil 4.53. Outlet-1 bağıl basıncı 0 Pa iken hız kontürü (inlet: Pressure inlet 5 Pa)

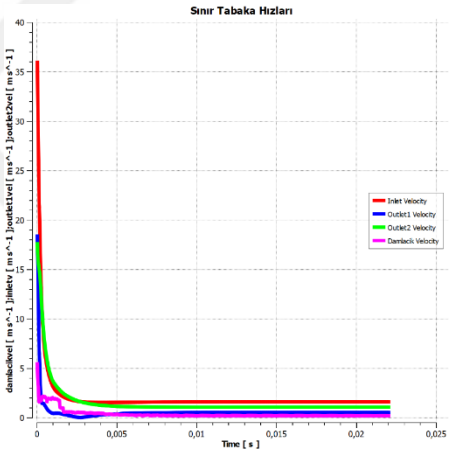


Şekil 4.54. Outlet-1 bağıl basıncı 0 Pa iken belirli zamanlardaki hız vektörleri (inlet: Pressure inlet 5 Pa)

22ms sonunda damlacığın hızı 0.1m/s den az bulunmaktadır.

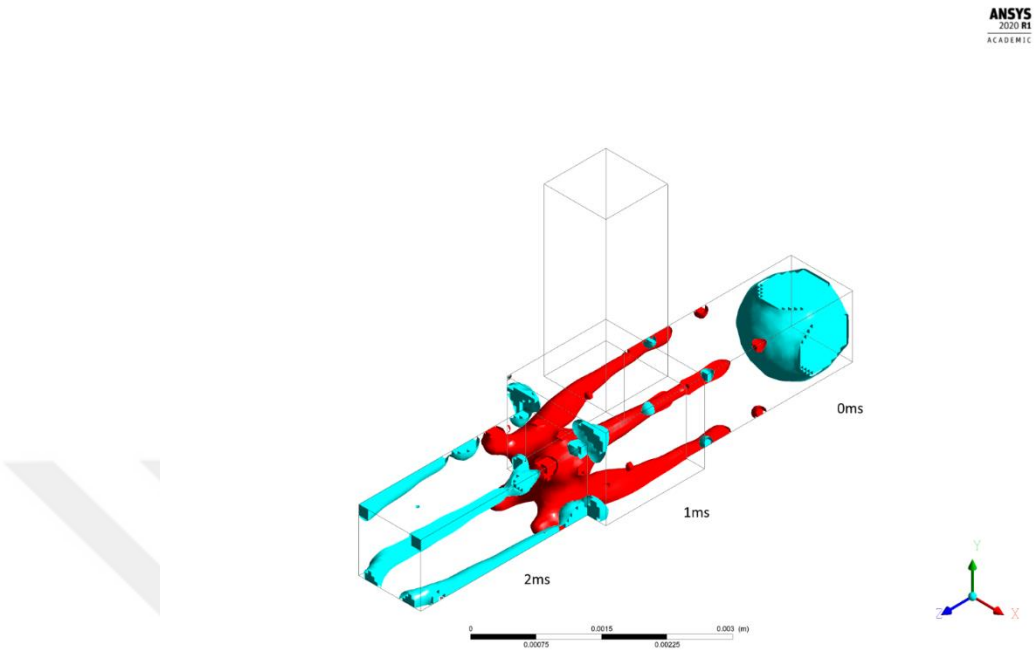


Şekil 4.55. Outlet-1 bağıl basıncı 0 Pa iken sınır tabaka basınçları (Inlet: Pressure-inlet 5 Pa)

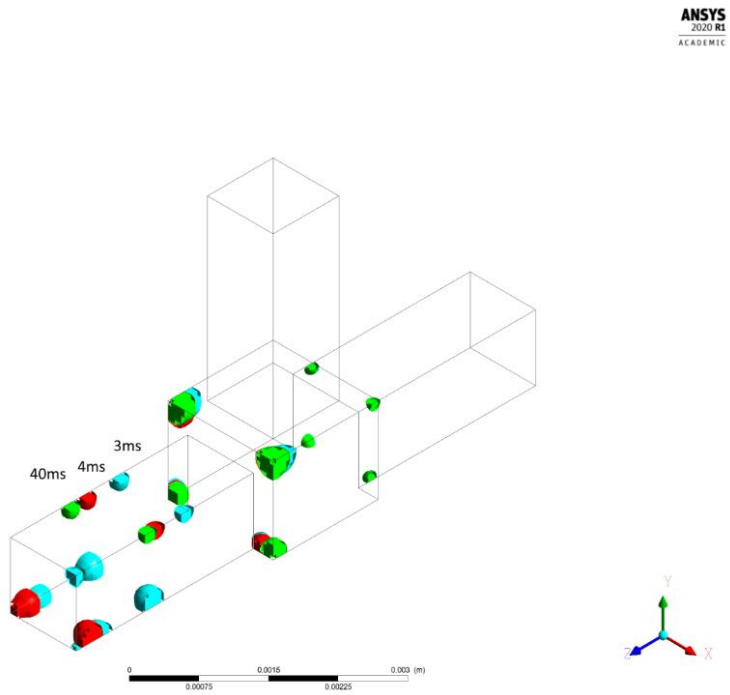


Şekil 4.56. Outlet-1 bağıl basıncı 0 Pa iken sınır tabaka hızları (Inlet: Pressure-inlet 5 Pa)

4.2.5. Rezervuar bağıl basıncı 0 Pa iken damlacık hareketi (Damlacık yarıçapı: 0.6mm)

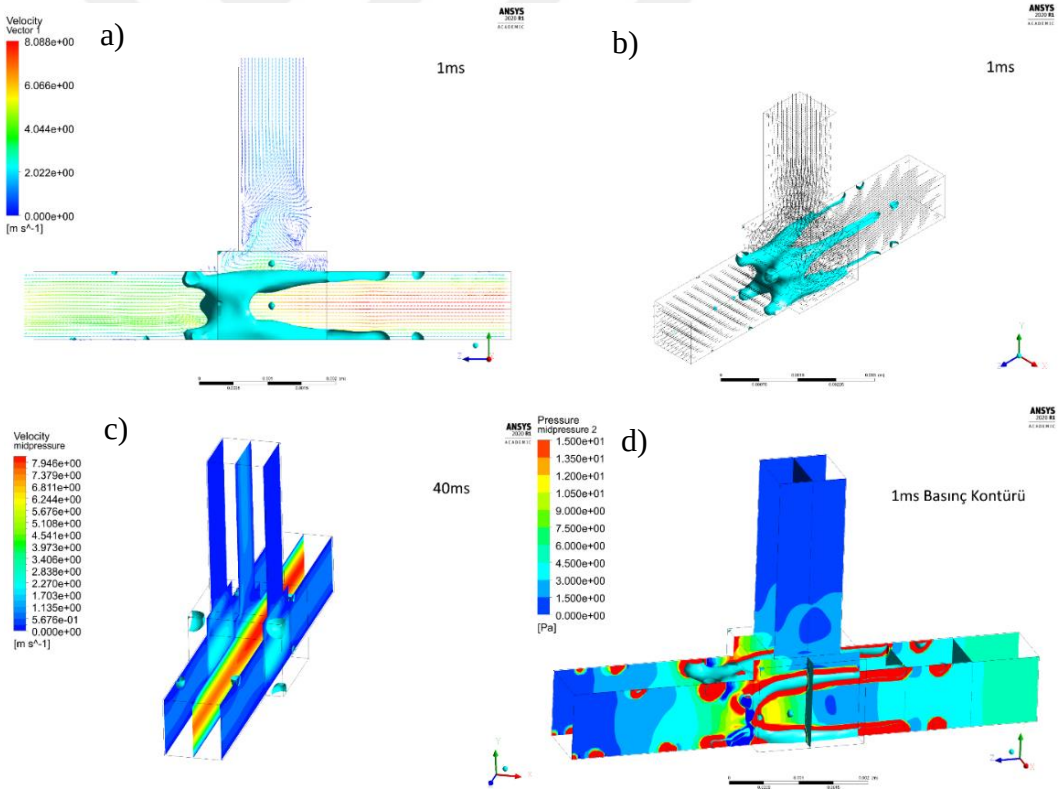


Şekil 4.57. Outlet-1 bağıl basıncı 0 Pa iken damlacık hareketi-1 (Damlacık yarıçapı 0.6mm)



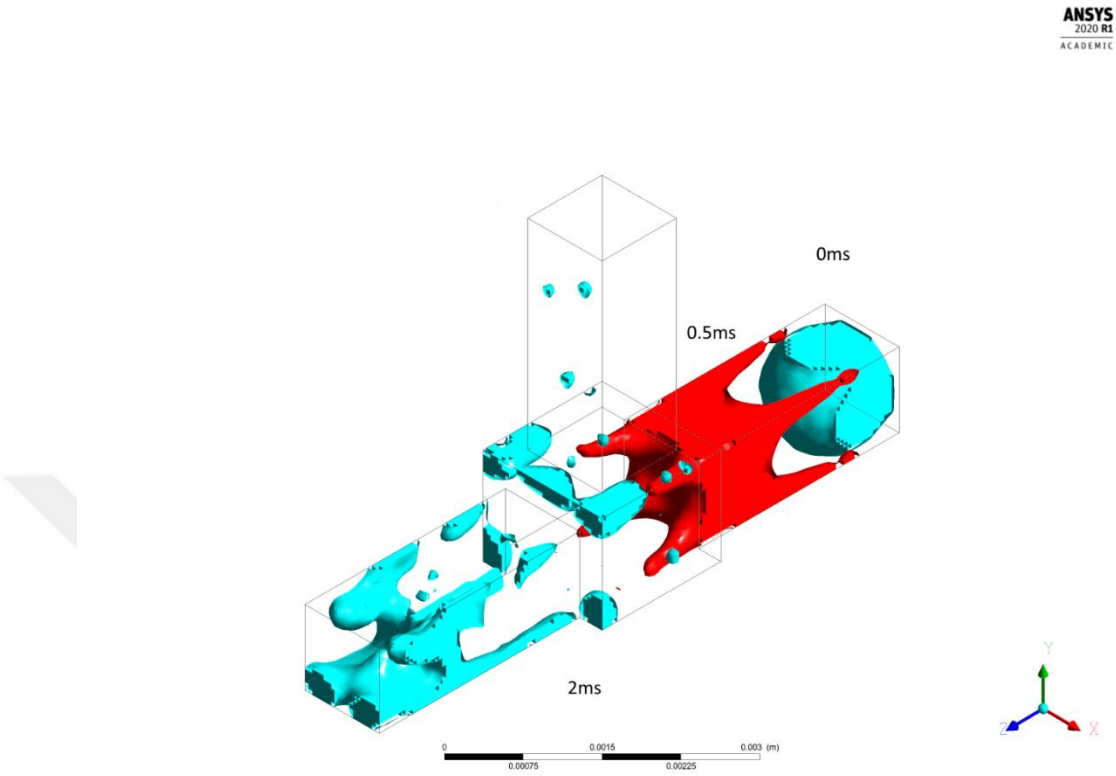
Şekil 4.58. Outlet-1 bağıl basıncı 0 Pa iken damlacık hareketi-2(Damlacık yarıçapı:0.6mm)

Sıra dışı durumları incelemek adına damlacık çapı 1.2 mm ye çıkarılmış ve çıkış basınçları 0 Pa iken damlacık hareketi izlenmiştir. Damlacık ilk 3 ms de büyük oranda tahliye olmuştur. Damlacığın hareket halindeyken paraşütümsü bir şekil aldığı gözlemlenmiştir. Damlacığın hareket yönüne göre arkasında kalan cidara yakın kısımlar geride kalmıştır. Ancak damlacığın önünde kalan cidara yakın kısımlar diğerlerine göre önde takip etmektedir. Bu bölgelerin hava ile temas eden yüzey alanının azalması önde pozitif bir etki yaratırken, arka kısımda negatif bir etki yaratmıştır. Büyük kütle tahliye edildikten sonra ufak parçalar kanal kenarlarında asılı kalmış çok çok düşük bir hızda ilerlemeye devam etmişlerdir.



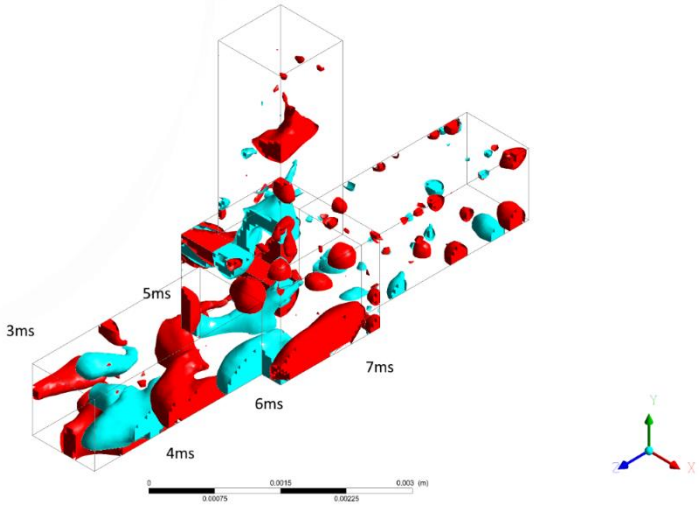
Şekil 4.59. Outlet-1 bağıl basıncı 0 Pa iken sınır tabaka basınç ve hız kontürleri ve hız vektörleri (Damlacık yarıçapı 0.6 mm)

4.2.6. Rezervuar bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi (Damlacık yarıçapı: 0.6mm)



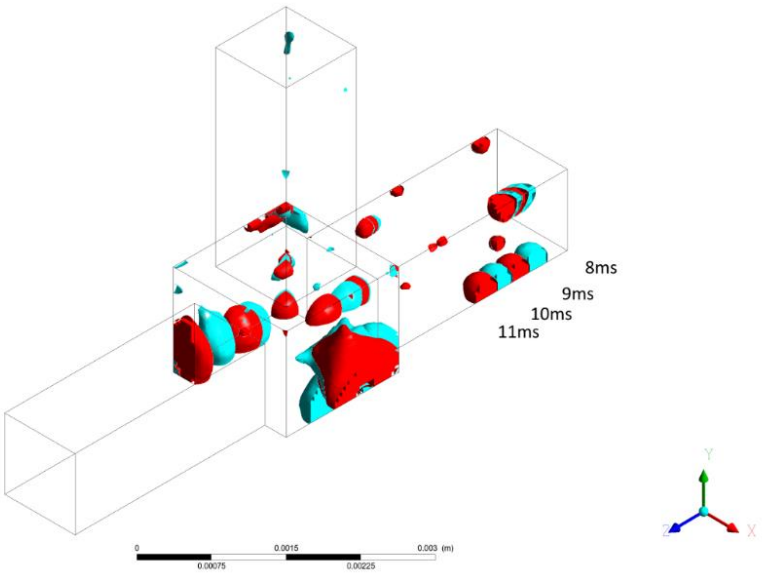
Şekil 4.60 Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi (Damlacık yarıçapı: 0.6mm)

Yoğun su koşullarını incelemek için 1.2 mm çapında bir küresel damlacık modellenmiştir. Damlacık, yüzey alanı arttığı için daha fazla kayma kuvvetine maruz kalmış ve güçlü bir ivmeyle harekete başlamıştır. Rezervuar kısmındaki basınç değişimi ve hız vektörleri neticesinde damlacıktan bazı parçalar kopmuş, bu kopan parçalardan ufak boydakiler rezervuardan çıkmıştır. Outlet-2 kısmında damlacık hızını kaybetmiştir. Bir miktarı outlet-2'den tahliye olmuştur.



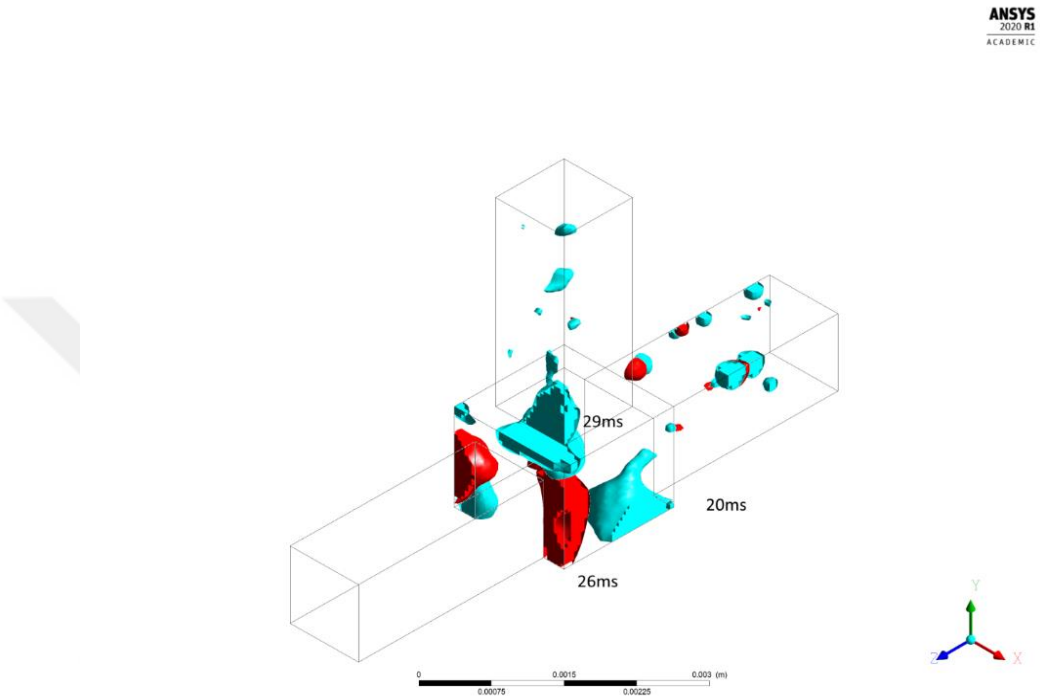
Şekil 4.61. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi-2 (Damlacık yarıçapı: 0.6mm)

3ms de damlacığın kalan kısımları kanal duvarına yapışıp rezervuar çıkışına doğru geri dönmektedir. Ayrılma anlarında ufak hacimli damlacıklar momentumun korunumundan dolayı daha hızla geriye savrulmuş ve inlet sınır kısmına kadar gelmiştir.

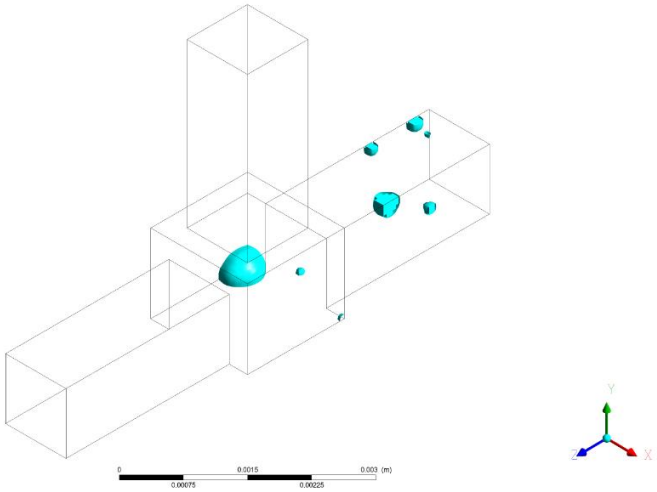


Şekil 4.62. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi-3 (Damlacık yarıçapı: 0.6mm)

7ms'de rezervuar çıkışının hemen dibine inen büyükçe bir damlacık kütlesi bir süre olduğu yerde dalgalanmış, minik damlalar öncelikle rezervuardan çıkarken büyük damlalarsa, yüzey gerilimi ile bir arada kalıp kütlece hareket etmiştir. Bunlar, 13ms'ye kadar kanal dibinde dalgalanıp, 26 ms'de kütlece duvar sınırını tırmanarak outlet-1'e yaklaşmıştır, 29ms'de rezervuar çıkışından kanalı terk etmiştir.

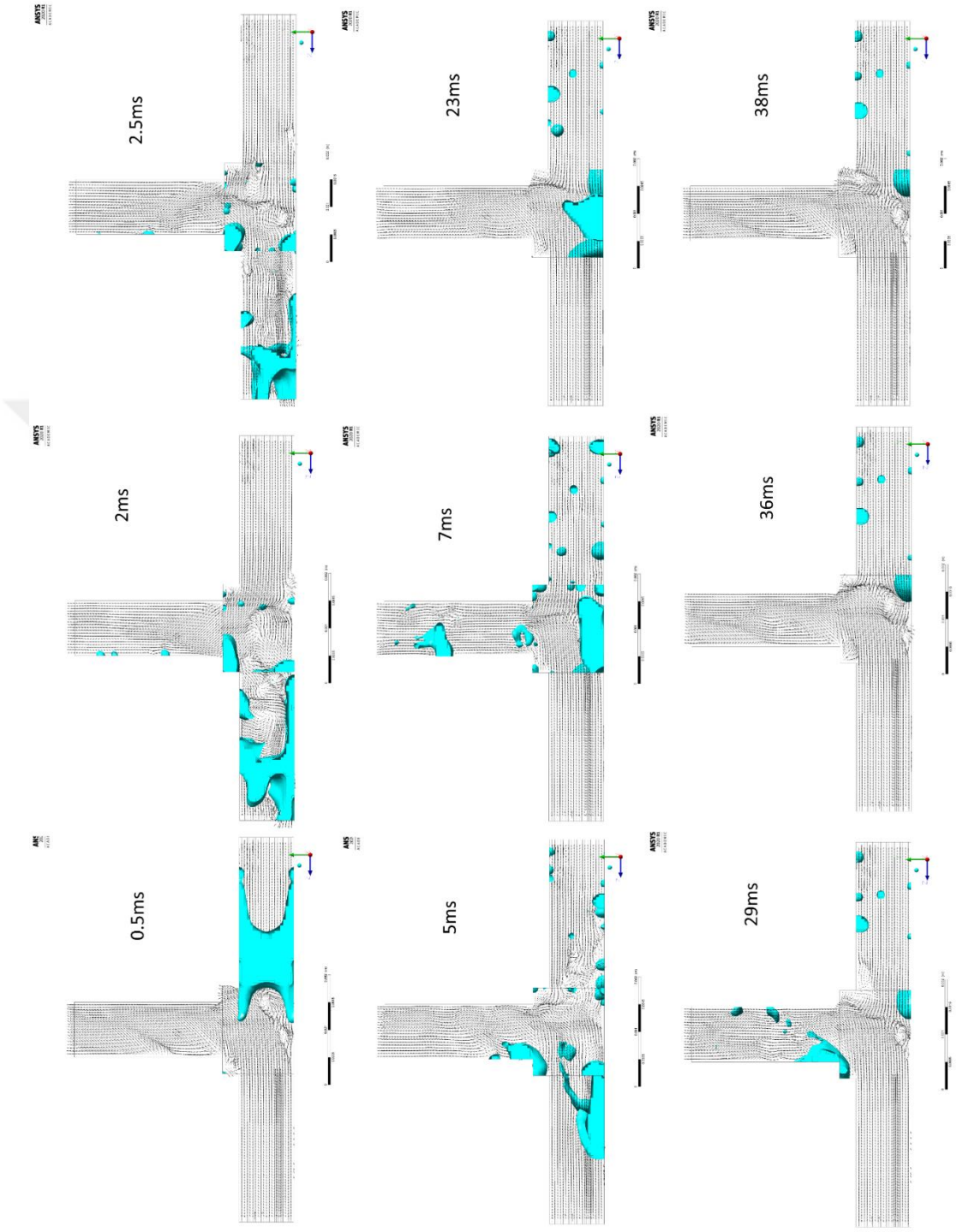


Şekil 4.63. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi-4 (Damlacık yarıçapı: 0.6mm)



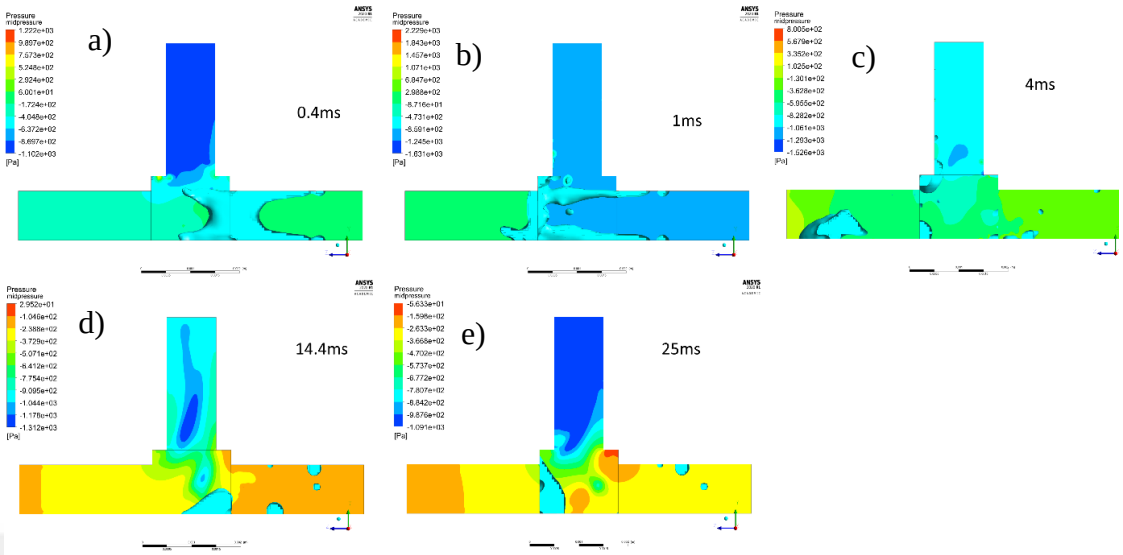
Şekil 4.64. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi t=38ms (Damlacık yarıçapı: 0.6 mm)

Kalan parçalar hız olarak tepkisiz gözükerek uzun süre yerlerinde beklemişlerdir.



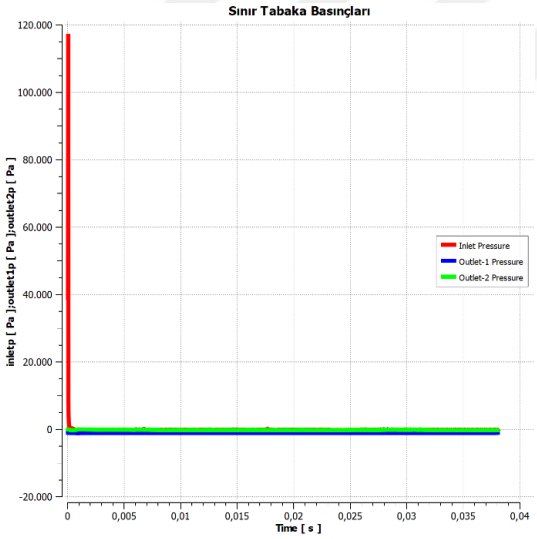
Şekil 4.65. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi ve hız vektörleri (Damlacık yarıçapı: 0.6mm)

Damlacık hareketi ve hız vektörleri Şekil 4.65'da gösterilmiştir.

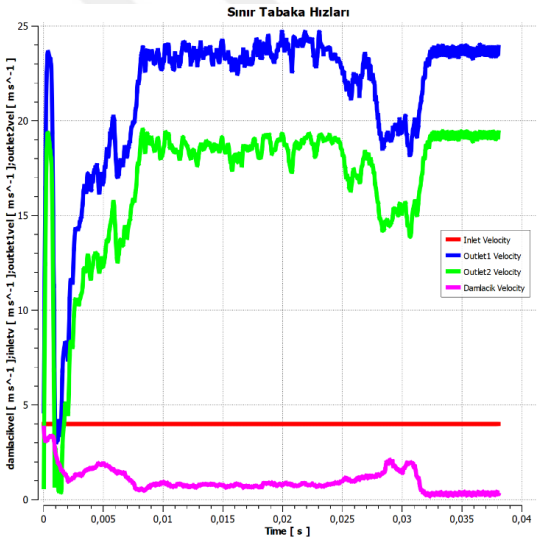


Şekil 4.66. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken basınç kontürü(Damlacık yarıçapı: 0.6mm)

Inlet basıncı damlacık harekete geçmeden önce anlık olarak oldukça yükselmiştir. Damlacık dağılana kadar bir süre kanal tıkanmış, madde çıkışı gerçekleşmemiştir.

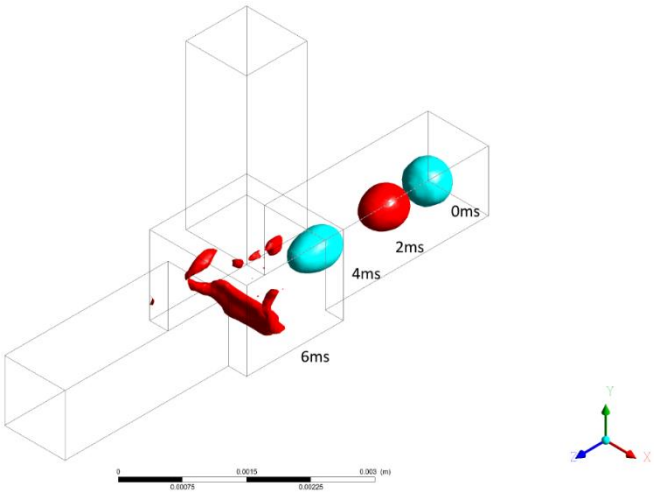


Şekil 4.67. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka basınçları (Damlacık yarıçapı: 0.6mm)

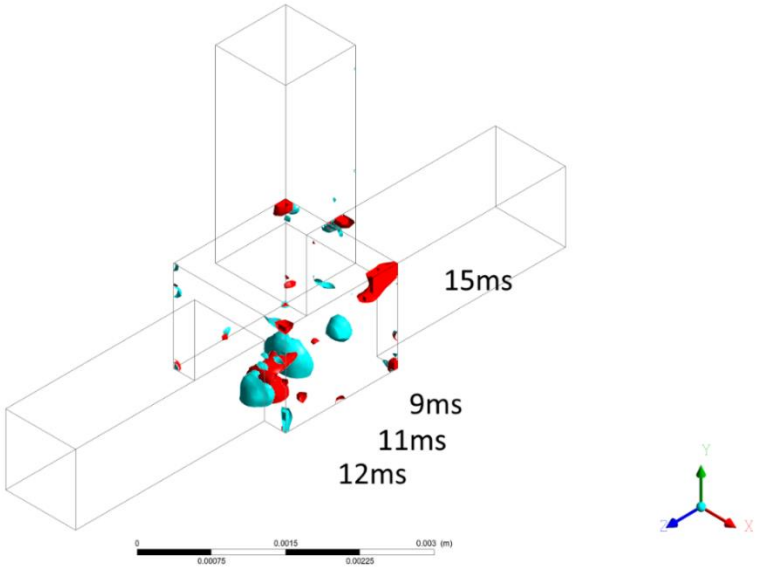


Şekil 4.68 Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka hızları

4.2.7. Rezervuar bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi (Damlacık yarıçapı: 0.3mm)

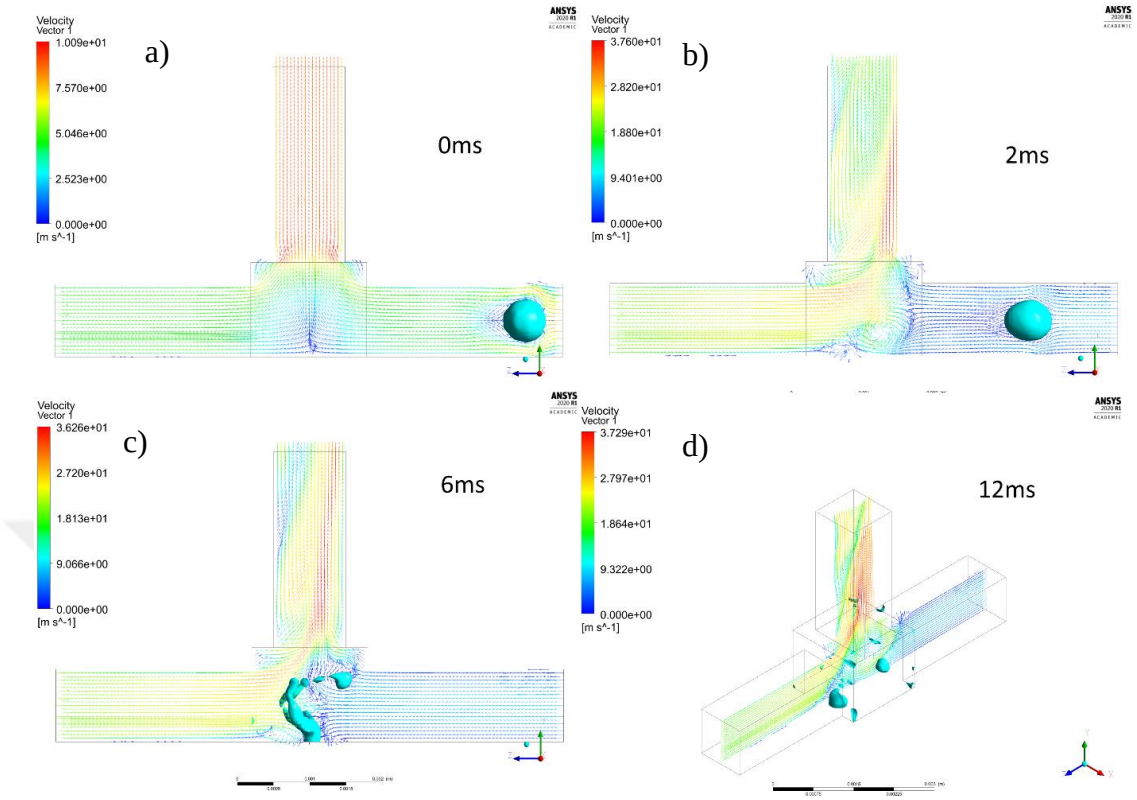


Şekil 4.69. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi-1 (Damlacık yarıçapı: 0.3mm)

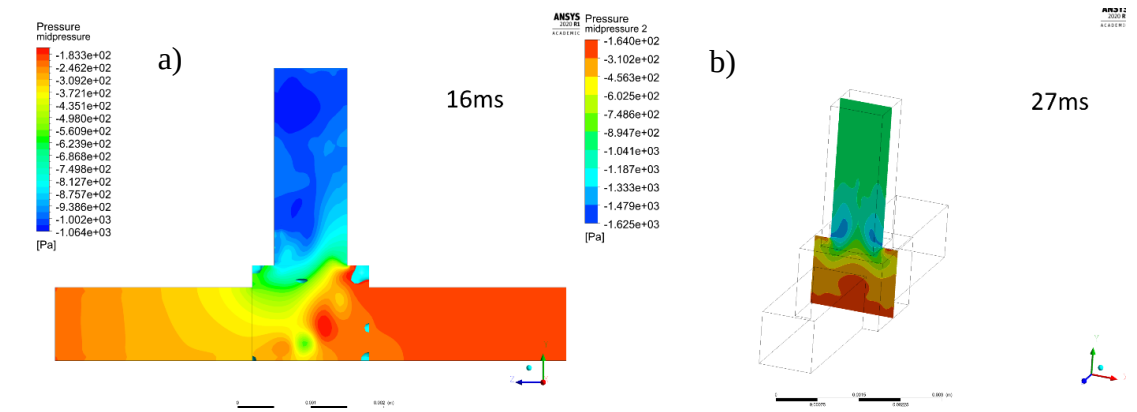


Şekil 4.70. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi-2 (Damlacık yarıçapı: 0.3mm)

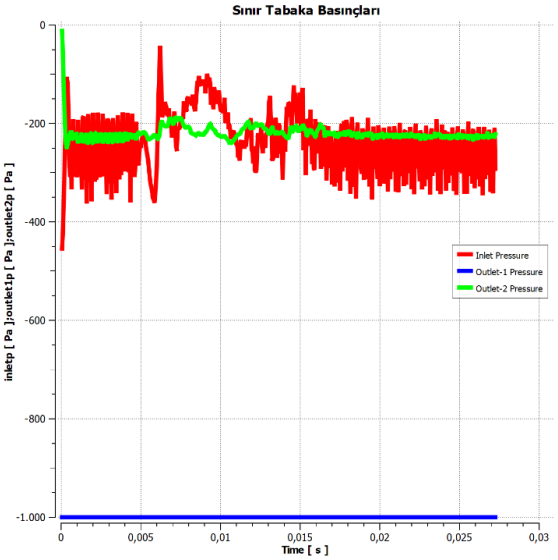
Damlacık çapı 0.6 mm alındığında damlacık 4 ms de rezervuar bölümüne varmıştır. 6ms de iki akıntı arasında kalan damlacık hem bölünmeye hem de kütle kaybetmeye başlamıştır. Bölünme sonucu oluşan parçalardan bir kısmı rezervuarda çıkışındaki köşe noktalara sürüklenmiş, bir kısmı dışarı atılmıştır. Damlacık ise akımın etkisi ile kanal tabanına doğru sürüklenmiştir.13 ms de bu parça köşelere dağılmış, ardından köşelerden yukarı tırmanarak büyük ölçüde tahliye olmuştur



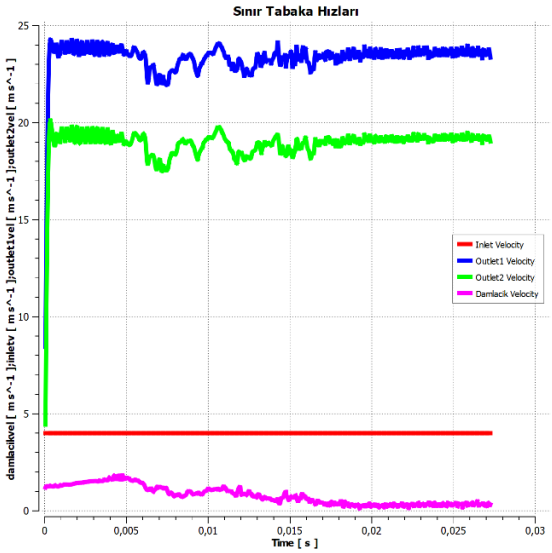
Şekil 4.71. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi ve hız vektörleri (Damlacık yarıçapı: 0.3mm)



Şekil 4.72. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken basınç kontürü (Damlacık yarıçapı: 0.3mm)



Şekil 4.73. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka basınçları (Damlacık yarıçapı: 0.3mm)

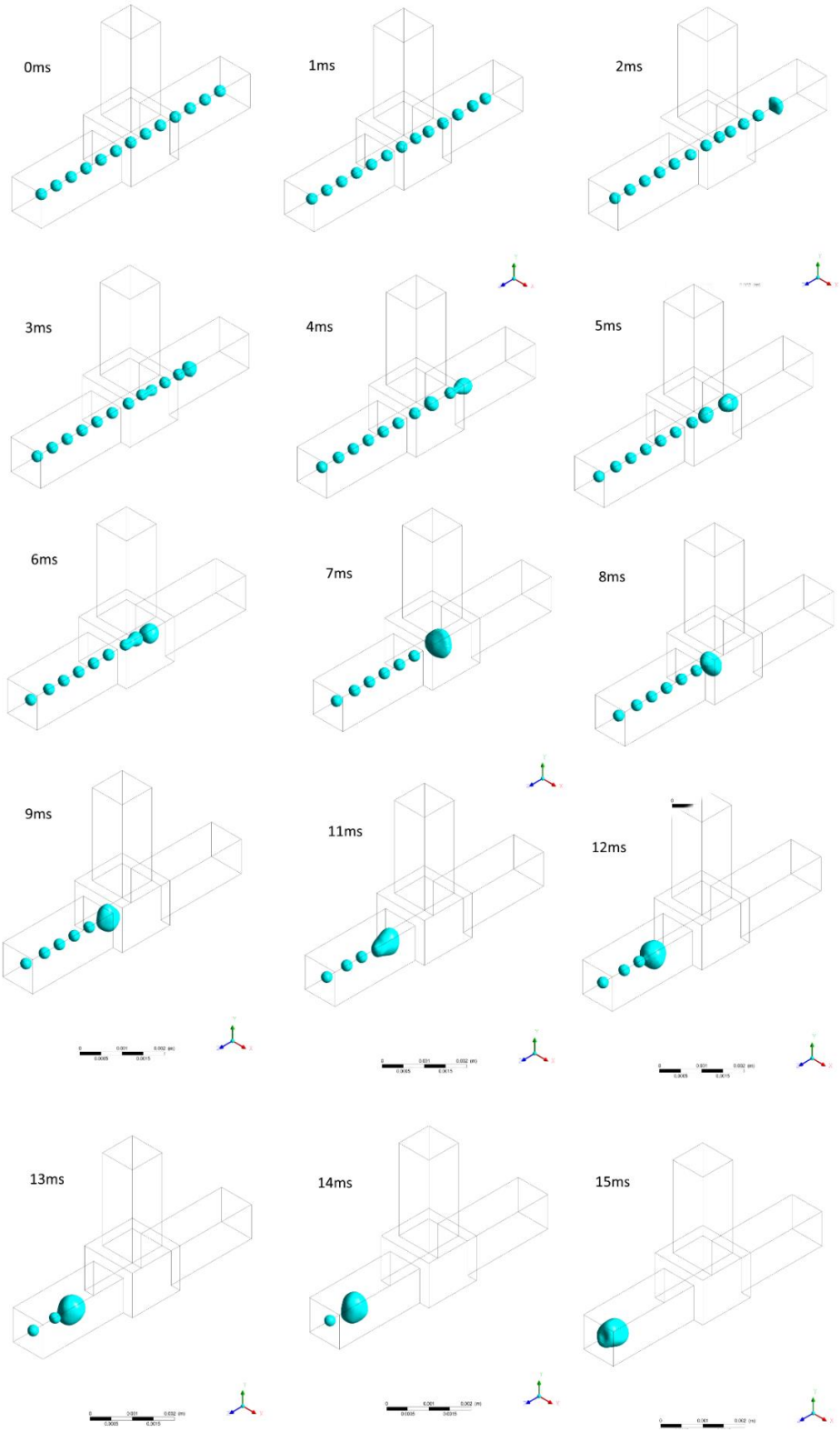


Şekil 4.74. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka hızları (Damlacık yarıçapı: 0.3mm)

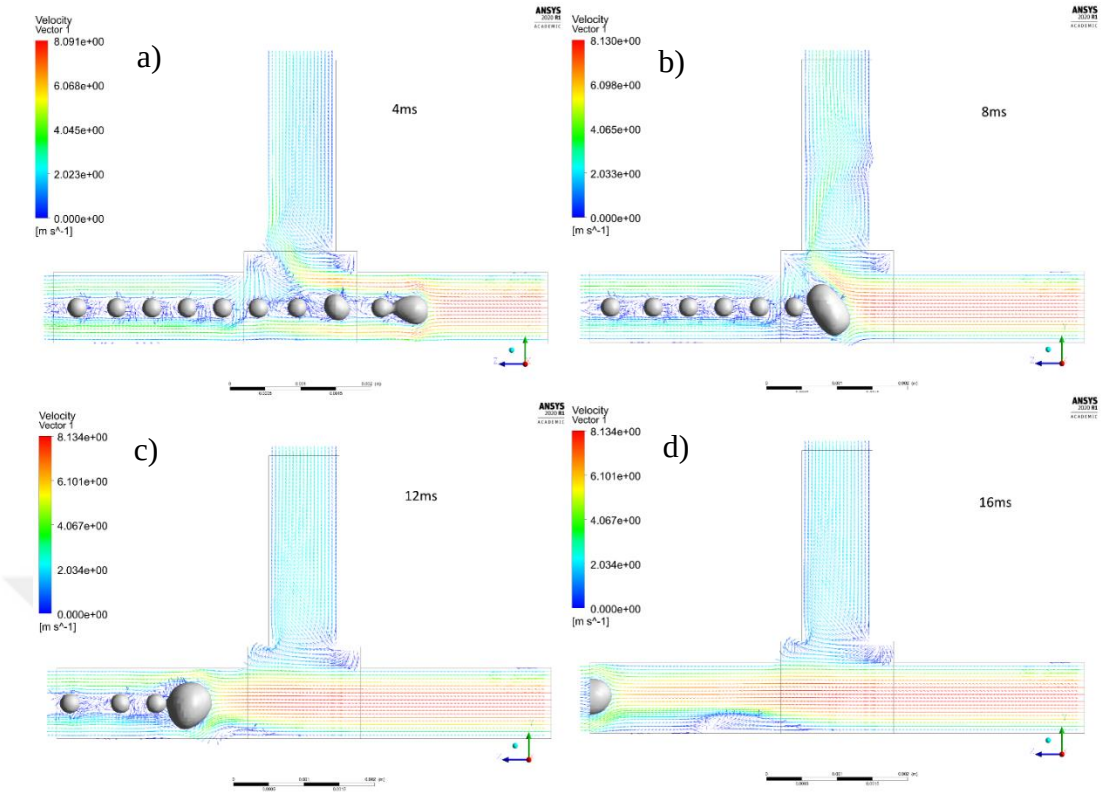
Damlacık tahliye olana kadar inlet basıncından yükselmeler gözlemlenmiştir.

4.2.8. Rezervuar bağıl basıncı 0 Pa iken damlacık hareketi (Birden fazla damlacık)

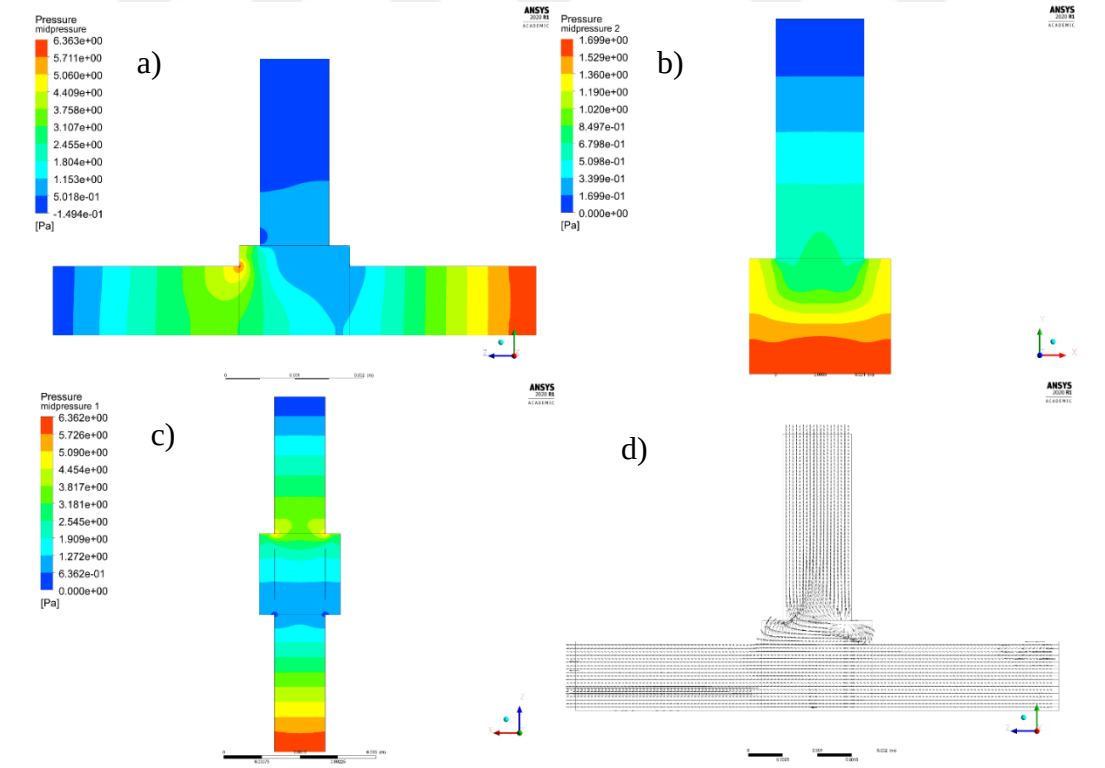
Damlacıklar arasında 0,5mm varken damlacık hareketleri incelenmiştir. Şekil 4.75'de görülebileceği gibi inlete en yakın damlacık yoğun basınca maruz kaldığından en çok hız kazanan damlacık olmuş ve diğer damlacıklara hava çarpımını engellemiştir. Böylece en arkadaki (inlete yakın) damlacık öndekileri toplayarak tahliye olmuştur. Şekil 4.76'de damlacıklar arasında kalan hız vektörlerinin güçsüz olduğu görülebilir.



Şekil 4.75. Outlet-1 bağıl basıncı 0 Pa iken damlacık hareketi (Birden fazla damlacık)

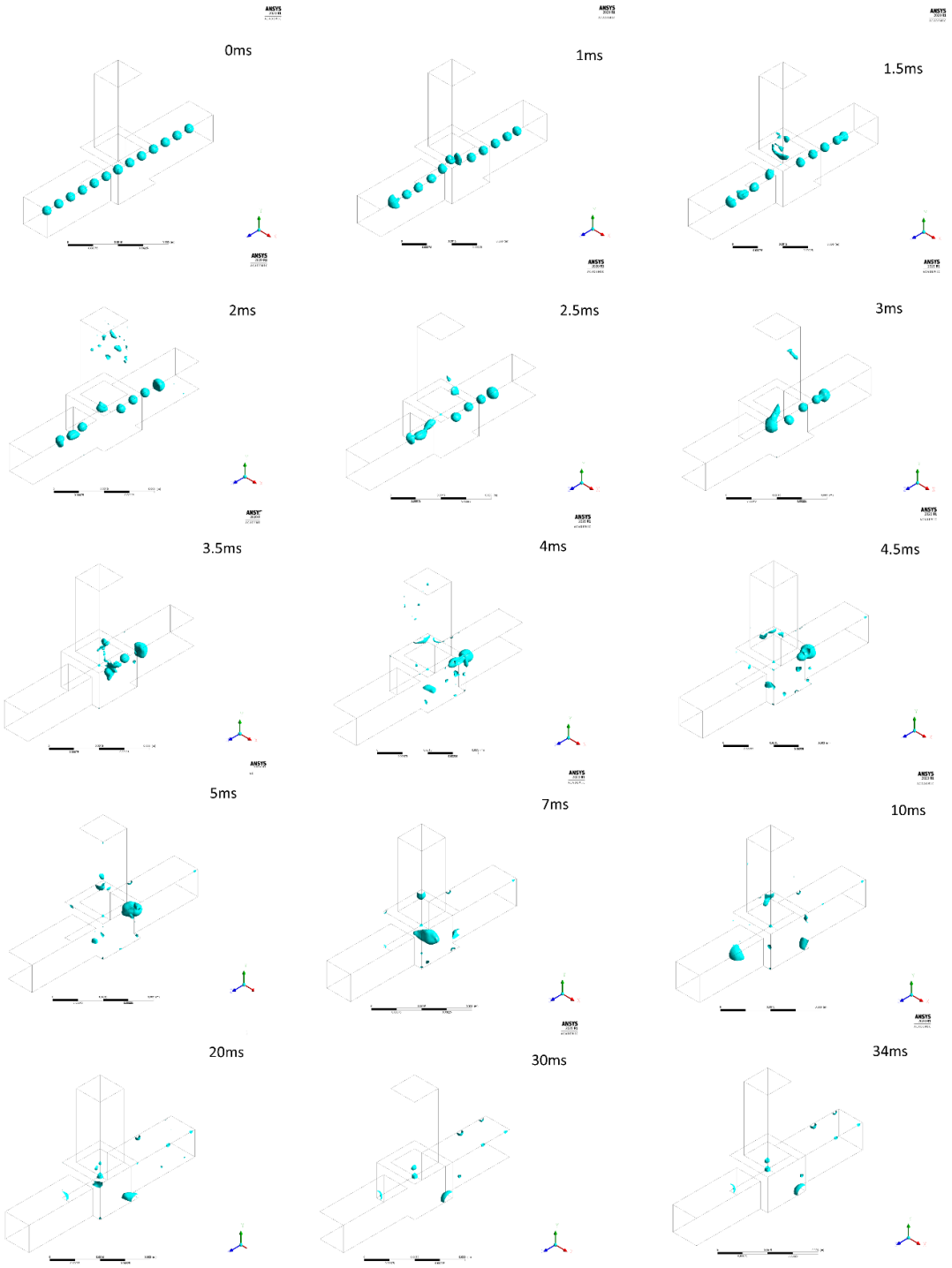


Şekil 4.76. Outlet-1 bağıl basıncı 0 Pa iken belirli zamanlardaki hız vektörleri (Birden fazla damlacık)



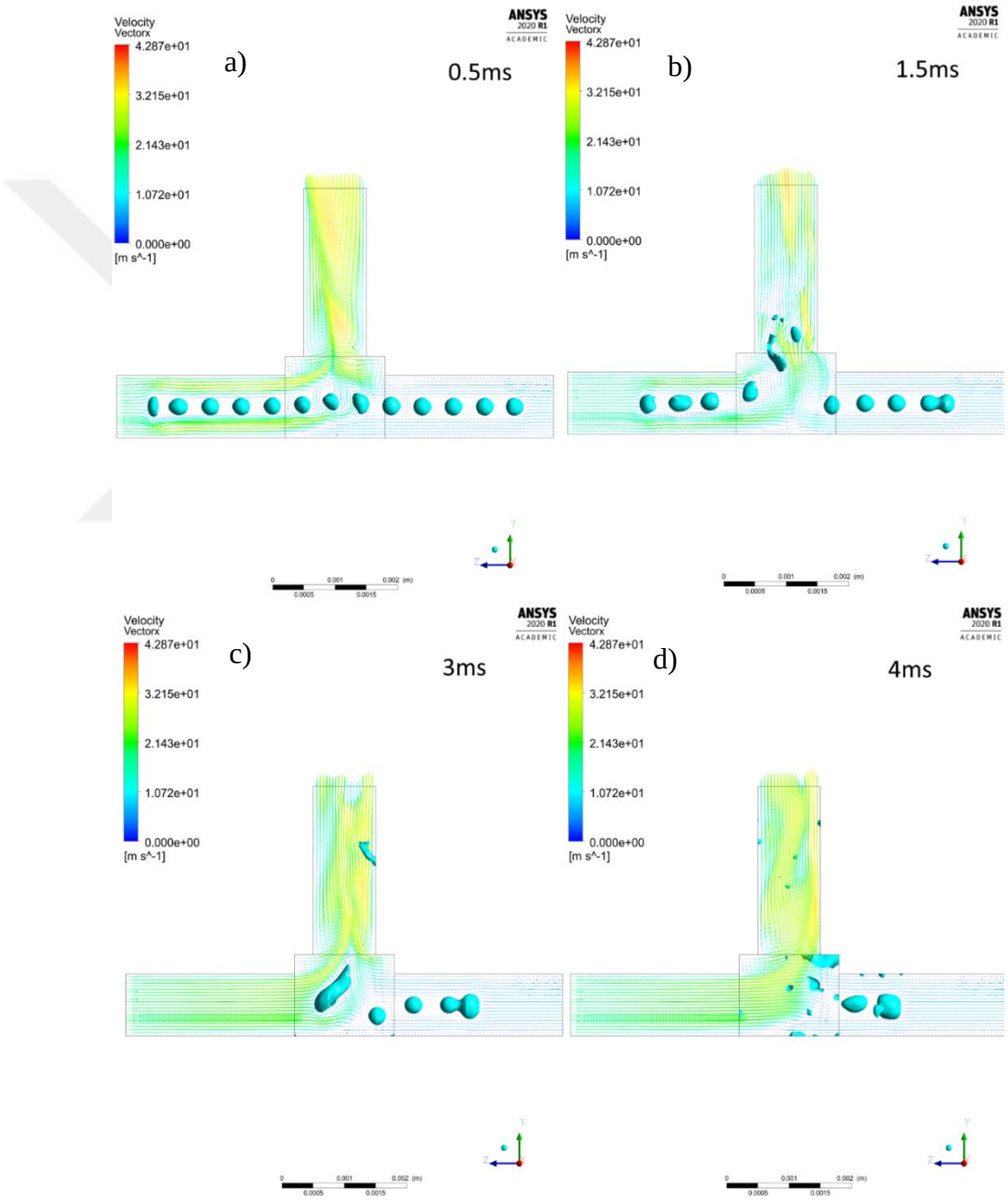
Şekil 4.77. Outlet-1 bağıl basıncı 0 Pa iken basınç kontürü ve hız vektörü

4.2.9. Rezervuar bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi (Birden fazla damlacık)



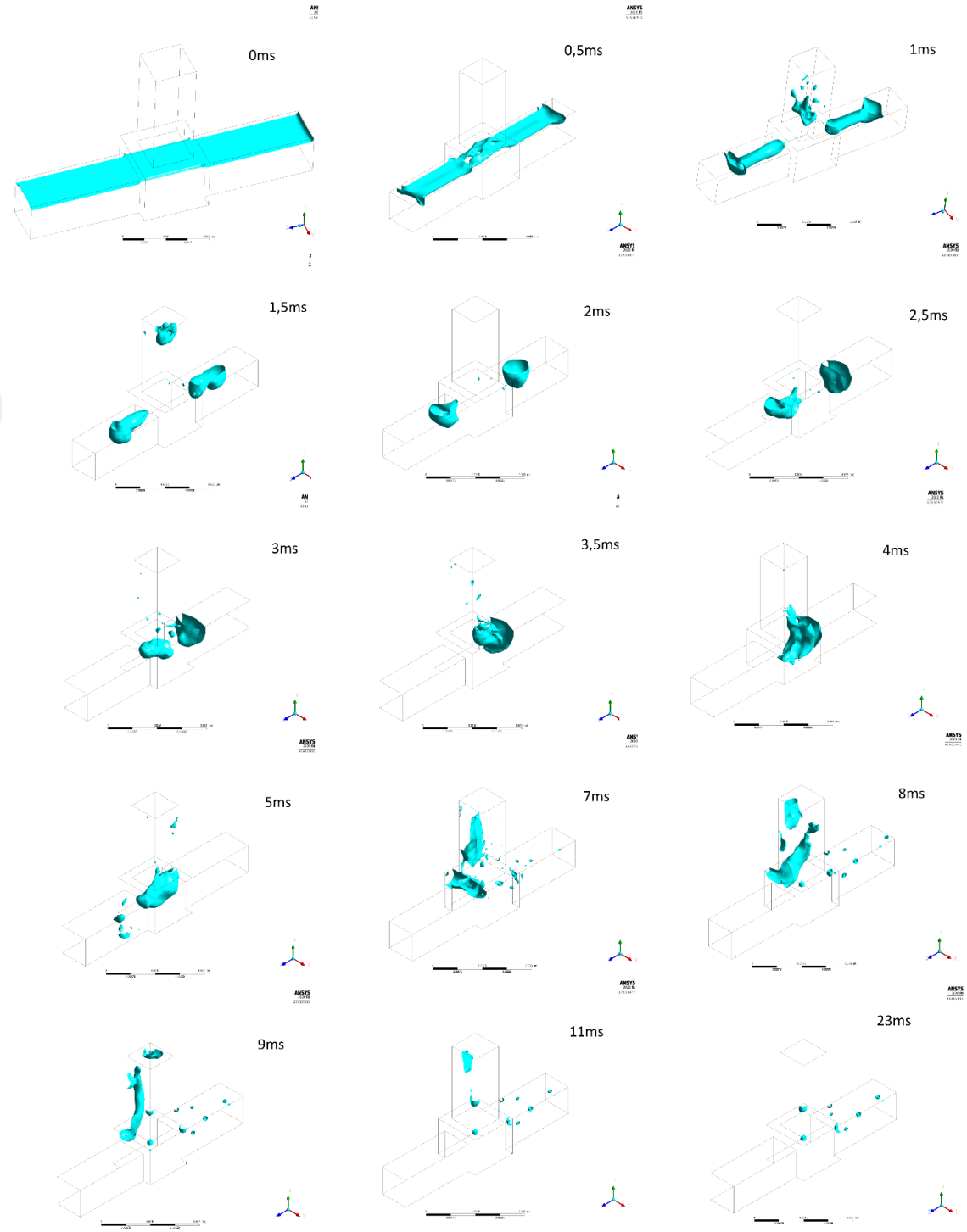
Şekil 4.78. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi (birden fazla damlacık)

Çok sayıda damlacık durumu rezervuar çıkışı basıncı -1000 Pa iken incelenmiştir. Henüz 2 ms de çıkışın hemen altındaki damlacıkların tahliyesi gerçekleşmiştir. Outlet-2 kısmındaki damlacıklar birleşerek 3 ms de rezervuar çıkışı bölgesine varmıştır. 5 ms de outlet-2 tarafından gelen damlacıkların bir bölümü tahliye olmuş, bir bölümü de kanaldaki akım hızı düşük noktalarda asılı kalmıştır. 7 ms de inletten gelen su kütlesi rezervuar çıkışı kısmına ulaşmış, bir miktar su outlet-1 den dışarı atılmıştır. Diğer bir miktar ise rezervuar bölümünde ve giriş kısmında bazı akımsız bölgelerde asılı kalmıştır.



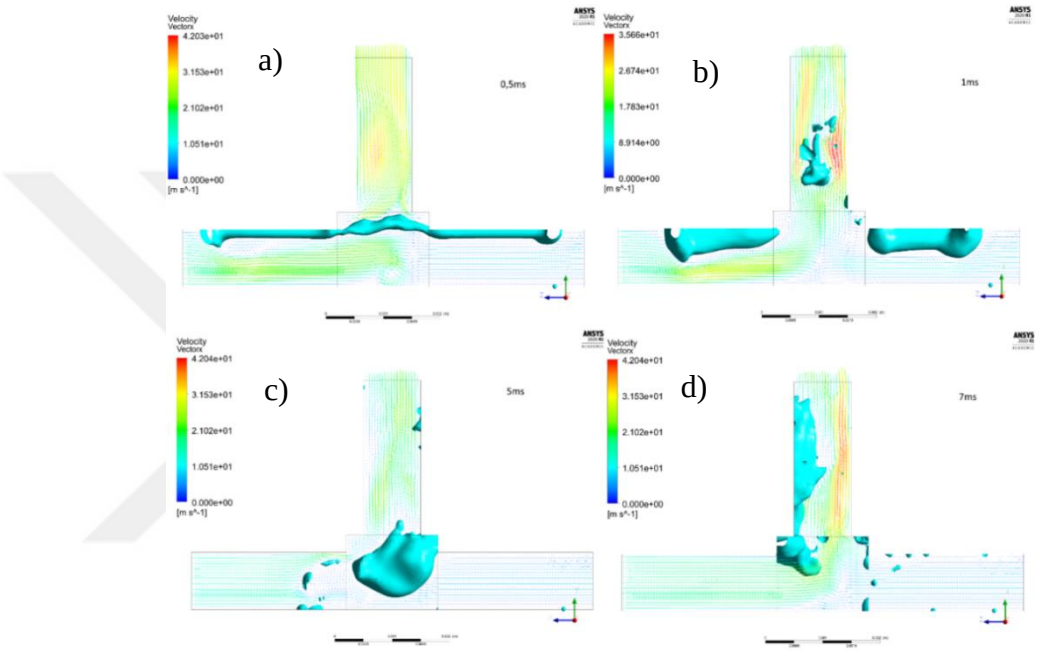
Şekil 4.79 Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka hızları (Birden fazla damlacık)

4.2.10. Rezervuar bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi (Su bandı biçiminde)



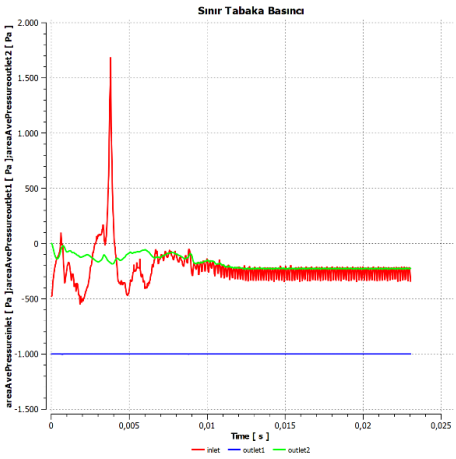
Şekil 4.80. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken damlacık hareketi (su bandı)

Sıradışı bir durum olarak kanalda su bandı hareketi incelenmiştir. Rezervuar çıkışı kısmındaki sıvı, keskin kenarların etkisiyle kırılıp 2ms de tahliye olmuştur. Outlet ve inlet kısımlarındaki su ise toparlanarak 3.5 msde çarpışarak birleşmiş. Oluşan kütle Outlet-2 den outlet-1 e doğru gelen güçlü akım bölünmüştür. Kütleden kopan bir kısım ufak parçalar inlet kanalında köşe bölgelere takılmıştır. Akımın üst kısmında kalan sıvı kütlesi ise kayma kuvveti ile 12 msde tahliye olmuştur. Diğer ufak parçalar ise uzun bir sürede çok az hareket etmiştir.

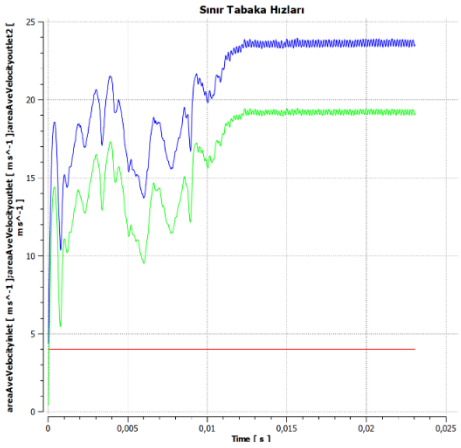


Şekil 4.81. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken belirli zamanlardaki hız vektörleri (Su bandı)

5ms de kanalın anlık olarak tıkanması sonucu giriş basıncı 2000 Pa'ya çıkmıştır.



Şekil 4.83. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka basınçları (Su Bandı)



Şekil 4.82. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken sınır tabaka hızları (Su Bandı)

5.TARTIŞMA ve SONUÇ

5.1. Tartışma

Outlet-2 bağıl basıncının sıfır olduğu durumlar için analitik ve numerik çözümler çizelgede karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.1 Outlet bağıl basıncı 0 Pa için analitik ve numerik çözümlerin karşılaştırılması

U Şeklindeki Kanal	Analitik	Numerik
Outlet-1 Hızı	0,66 m/s	0,77 m/s
Outlet-2 Hızı	3,34 m/s	3,27 m/s
Inlet Basıncı	61,8 Pa	56 Pa
I Şeklindeki Kanal	Analitik	Numerik
Outlet-1 Hızı	0,54 m/s	0,51 m/s
Outlet-2 Hızı	3,46 m/s	3,49 m/s
Inlet Basıncı	9,2 Pa	6,2 Pa

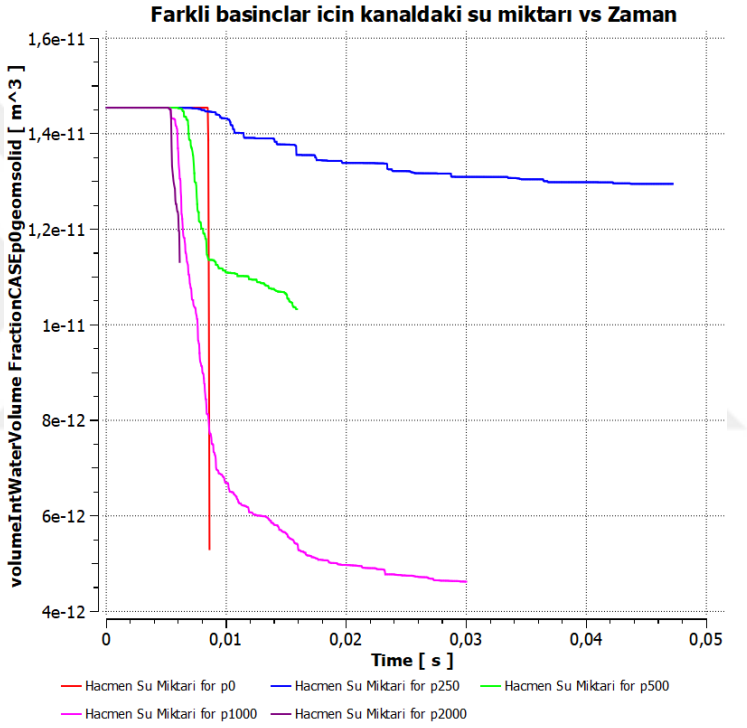
Analitik ve Numerik çözümlerin uyumlu olduğu söylenebilir. Analitik çözümde kullanılan katsayıların kanal geometrisine göre tam doğru tespit edilemediği için çözümler arasında bir miktar farklılıklar gözlemlenmiştir. Çünkü bu büküm geometrisine veya rezervuar çıkış geometrisine, kare şeklindeki kanala uygun katsayılar tam bilinmemektedir. Ayrıca giriş hızının profil olarak tanımlanması numerik çözümde daha düşük giriş basıncı olarak yansımıştır. Yine de kullanılan katsayılar ile yakın bir sonuca ulaşılmıştır.

Analize eklenen ekstra bir rezervuar çıkışının yukarı akıntıya bir etkisi bulunmadığı gözlemlenmiştir. Rezervuar çıkışının bağıl basıncı düştükçe damlacık hızı azalmış, belirli bir seviyeden sonra damlacık rezervuara doğru hız kazanmıştır.

Analizler sonucunda göze çarpan ilk şey ekstra bir rezervuar çıkışının düşük hız noktaları oluşturmasıdır. Su bu bölgelerde asılı kalmakta ve birikmektedir. Öte yandan bu bölgeler suyun kanalda homojen dağılımını sağlayabilir bu da su atımını kolaylaştırır. (Quan, Zhoua, Sobiesiak, & Liu, 2005)

Rezervuar basıncı ana çıkış basıncına eşit olduğunda damlacık inlet akıntısı yönünde hareket etmekte ve outlet'e doğru bir harekette bulunmamaktadır. Rezervuar çıkışı bağıl basıncı -200 Paskaldan yüksek olduğunda ise damlacık ana çıkıştan tahliye olmaktadır. Rezervuar basıncı rezervuar çıkışı civarı kanalda bir basınç düşüklüğüne yol açtığı için damlacık tahliyesi yavaşlamaktadır. Hatta bazı bölgelerde hız oldukça yavaş olduğu için damlacık bu bölgelerde takılı kalabilmektedir.

Rezervuar bağıl basıncı düştükçe damlacık tahliyesi hızlanmaktadır. Rezervuar basıncı -1000 Pa olduğunda damlacık tahliyesi büyük ölçüde sağlanmıştır. Rezervuar basıncı düştükçe damlacık tahliyesi hızlanmıştır.



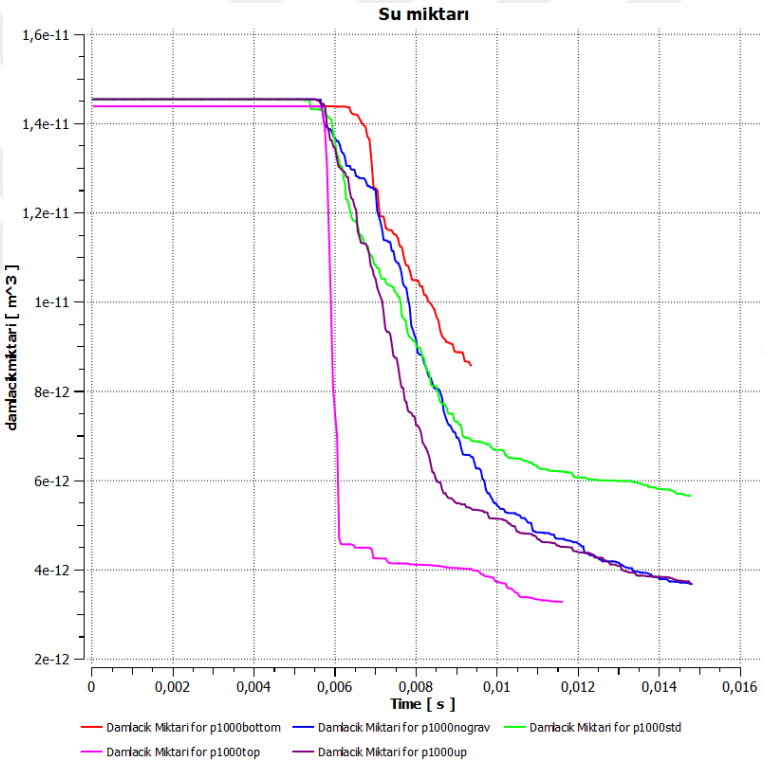
Şekil 5.1. Farklı basınçlarda kanaldaki su miktarının zamana bağlı değişimi

Şekil 5.1'de incelenen durumlar için su miktarları verilmiştir. 200 Pa'nın altında basınç farklarında damlacık outlet-2'den tamamen tahliye olmaktadır. Çıkışlar arasında 250 Pa'dan fazla basınç farkı olduğunda ise damlacık parçalanmamış ancak hız kaybetmiş ve outlet-1'den kısmen tahliye olmaktadır. Fark 500 Pa'nın üzerine çıktığında damlacık büyük ölçüde tahliye olmaktadır. Outlet-2 basınç düştükçe tahliye hızı artış göstermiştir.

Basınç -5000Pa dan daha düşük olduğunda akış laminar özelliğini kaybetmektedir.

Inlette sabit hız profili olarak tanımlandığı için rezervuar basıncının inlet bölümüne etkisi azdır. Inlet basınç girişi olarak tanımlandığında sistemde anormal hareketler gözlemlenmiştir.

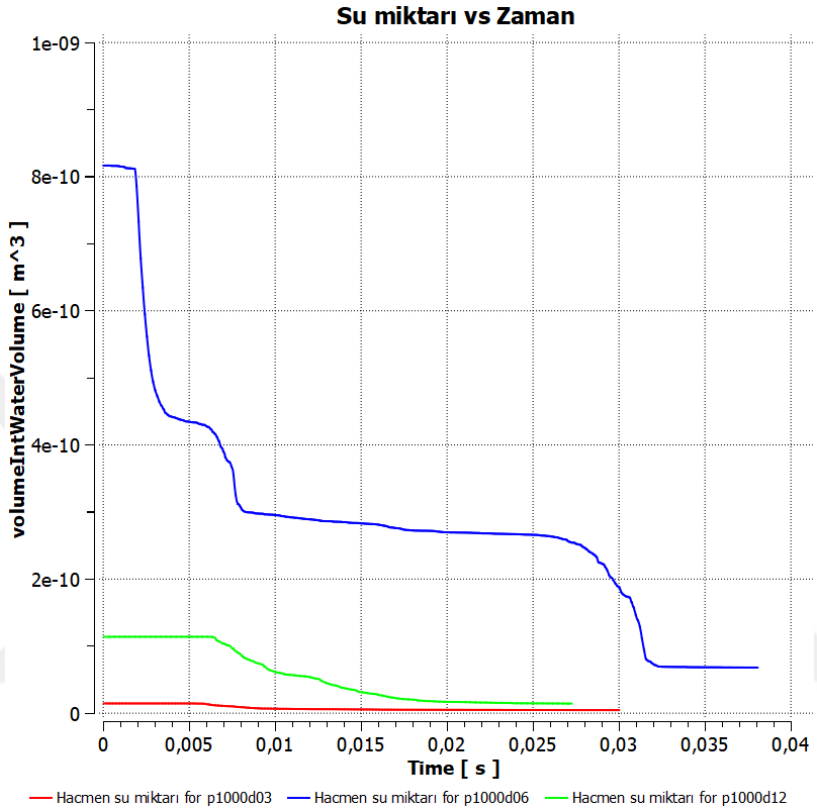
Damlacık kanalın ekstra çıkış tarafındaki duvara tutunması su tahliyesine pozitif bir etki göstermiştir. Üst duvar, rezervuar bölümünde kesildiği için damlacık zorunlu olarak duvardan ayrılmakta ve rezervuar çıkışı kesit alanına doğrudan maruz kalmaktadır. Dolayısıyla damlacık tahliyesi oldukça çabuk gerçekleşmiştir. GDL bölümünün rezervuar çıkışı ile aynı tarafa konulması damlacıkların çoğunlukla üst duvara bağlı kalması demektir. Bu da rezervuar çıkışının verimli çalışmasını sağlayacaktır ancak bu reaksiyon alanının azalması ve yük dağılımının dengesiz olmasına sebep olacaktır.



Şekil 5.2. Outlet-1 Bağıl basıncı -1000 Pa iken farklı koşullar için kanaldaki su miktarının zamana bağlı değişimi

Öte yandan damlacık kanalın dibinde olduğunda damlacık tahliyesi zorlaşmaktadır.

Yer çekiminin damlacık tahliyesine etkisi azdır. Yerçekimi ivmesinin outlet-1 yönüne doğru olduğu durumda su tahliyesi yerçekimsiz durumdan daha hızlı gerçekleşmiştir. Yerçekimin aksi yönde alındığı durumda ise daha az miktarda su tahliye olmuştur. Bu durumlar Şekil 5.2'te görülebilir.



Şekil 5.3. Outlet-1 bağıl basıncı -1000 Pa iken farklı damlacık boyutları için kanaldaki su miktarının zamana bağlı değişimi

Damlacık boyutu arttığında, damlacık daha çok yatay gerilmeye maruz kaldığından daha hızlı ilerlemekte ve atılmaktadır. Su miktarının fazla olduğunda su tahliyesinin daha hızlı olduğu görülmüş. Ancak tahliye edilemeyen suyun da arttığı tespit edilmiştir.

Sistemde birden çok damlacık tanımlandığında damlacıkların birbirleriyle etkileştiği ve birleştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca damlacıklar arasında düşük hız bölgeleri oluşmuştur.

Bant durumu içinde benzer durum yaşanmış, rezervuara yakın kısımdaki su hemen tahliye olmuştur. Kalan su, duvarların hidrofobik tanımlanması sebebiyle, birleşip küreselleşmiş ve böyle tahliye olmuştur. Ancak su miktarı fazla olduğundan bir miktar su düşük akıntı bölgelerinde askıda kalmıştır.

5.2. Sonuç

Fosil yakıtlarının belirli ülkelerin egemenliğinde bulunması, kısıtlı miktarda olması ve kirliliğe sebep olması dünyayı alternatif temiz enerji kaynaklarına itmiştir. Yenilenebilir enerjinin depolanmasında hidrojen güçlü bir araçtır. William Grove hidroliz reaksiyonunun tersine de çalışabileceğini göstermiş ve yeni bir enerji üretim aracının temellerini atmıştır. Bu araç yakıt pilleridir ve son yıllarda yapılan çalışmalar sonucunda artık pratik olarak kullanılabilecek konuma gelmişlerdir. PEMFC bunlardan biridir. Düşük sıcaklıkta çalışabilmesi, taşınabilir olması ve hızlı başlangıç yapabilmesi diğer yakıt pillerine göre olan avantajlarındandır. Şu an yapılan çalışmalar büyük ölçüde yakıt hücrelerinde mühendislik optimizasyonu üzerinedir. PEMFC'deki su yönetimi de bu çalışma konularından biridir. PEMFC'de su tahliyesinin sağlanması, reaksiyon bölgelerinin kapanmaması ve böylece pilin verimli çalışması için kritik bir konudur. Ancak nafion membranin kuruduğunda proton geçirgenliğinin azalması sebebiyle tamamen kurumaması da gerekmektedir. Su atımına kullanılan materyal, pilin fiziksel yapısı, operasyon koşulları, hidrofobik-hidrofilik kaplamalar, köpüksü kanallar gibi tasarımı geliştiren pek çok etken vardır. Bu etkenler araştırılmakta ve optimum tasarım elde edilmeye çalışılmaktadır. Bu yöntemlerin araştırılmasında özellikle su kanallarını modellenmesinde CFD analizlerinden de yararlanılmaktadır.

Bu çalışmada ANSYS Fluent modülü kullanılarak kanala eklenebilecek ekstra bir rezervuar çıkışının etkileri incelenmiştir. Bu ekstra çıkışın kanalda basınç düşüşüne sebep olduğu için doğrudan negatif etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Rezervuar basıncı ancak yeterince düşük olduğunda su tahliyesi rezervuar kısmından gerçekleşebilmektedir. Öte yandan rezervuar çıkışı bazı düşük hız bölgelerine sebep olmaktadır. Suyun bu bölgelerde askıda kaldığı gözlemlenmiştir. Rezervuar çıkışı tarafındaki cidara bağlı damlacığın ise daha hızlı tahliye olduğu gözlemlenmiştir. Damlacık boyutunun büyümesi fazla damlacığın daha fazla sürüklenme kuvvetine maruz kalması sebebiyle su tahliyesini hızlandırmıştır.

Elde edilen sonuçlar şöyle sıralanabilir:

- Hız girişi ve sabit basınç çıkışları için ekstra bir rezervuar çıkışının yukarı akıntıya etkisi yoktur.
- Ekstra bir çıkış sistemde basınç kaybına sebep olmaktadır.
- Ekstra çıkış kanala dik konumlandırıldığında, damlacığı çekebilmesi için damlacığın önce mevcut hızını kaybetmesi sonra rezervuar çıkışı yönünde hız kazanması gerekir. Bu da rezervuar yönünde güçlü bir akıntı olması gerekli demektir.
- Rezervuar çıkışı damlacığın dağılmasını ve parçalanmasını sağlayabilir.
- Yerçekiminin su tahliyesine etkisi azdır ancak yerçekimi ivmesi çıkış yönünde olduğunda daha fazla su tahliye olmaktadır.
- Su damlası ekstra çıkış tarafındaki cidara yakın olduğunda tahliye çok daha kolay gerçekleşirken, uzak olduğunda ise tahliye zorlaşmaktadır.
- Birden fazla damlacık ve su bandı durumu incelendiğinde rezervuar çıkışına yakın bulunan damlaların hemen tahliye edilebildiği gözlemlenmiştir.

Rezervuar çıkışının kendisine yakın suyu tahliye etme ve suyun küçük parçalara ayırabilme fonksiyonları kullanılarak farklı tasarımlar geliştirilebilir. Örneğin kritik bölgelere bu çıkışlar yerleştirilebilir. Öte yandan rezervuar çıkışı basıncı ana çıkış basıncından yüksek olduğunda damlacık tahliyesine pozitif etki de gözlemlenmiştir. Ancak ekstra bir rezervuar çıkışı -paralel kanal tasarımında da olduğu gibi- basınç kaybına sebep olduğu için ve bu rezervuar çıkış normal vektörü damlacık hareket yönünden farklı olduğu için, ekstra bir rezervuar çıkışının su tahliyesine olumsuz etki ettiği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

AKSEL, M. H. (2011). *Fluid Mechanics* (Cilt VOL 1).

Amirinejad, M., Rowshanzamir, S., & Eikani, M. H. (2006). Effects of operating parameters on performance of a proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources, 161*(2), 872-875.

ANSYS, Inc. (2009, 01 23). Volume of Fluid (VOF) Model Theory. *ANSYS 12 Fluent User Guide*. ANSYS, Inc. 05 02, 2021 tarihinde https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node297.htm adresinden alındı

Asla, R., Ingham, D., Ismai, M., Hughes, K., Ma, & Pourkashanian, M. (2019). Simultaneous thermal and visual imaging of liquid water of the PEM fuel cell flow channels. *J Energy Inst*, 311-318.

Avcıoğlu, A. O. (2017). *Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Teknolojileri. Ders: 14*. 05 02, 2021 tarihinde Ankara Üniversitesi Açık Ders Platformu: https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/18484/mod_resource/content/0/YEN%C4%B0LENEB%C4%B0L%C4%B0R%20ENERJ%C4%B0%20KAYNAKLARI%20VE%20TEKNOLOJ%C4%B0LER%C4%B0%2014.pdf adresinden alındı

Ay, S., Fang-Bor, W., Chun-Ying, H., & Yen-Ming., C. (2006). Studies on flooding in PEM fuel cell cathode channels. *International Journal of Hydrogen*, 1031-1039.

Balat, M. (2008). Possible Methods for Hydrogen Production. *Energy Sources Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 31*(1), 39-50. doi:https://doi.org/10.1080/15567030701468068

Bao, Y., & Gan, Y. (2020). Roughness effects of gas diffusion layers on droplet dynamics in PEMFC flow channels. *International Journal of Hydrogen Energy, 45*(35), 17869-17881. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.228.

Blanco, M., & Wilkinson, D. P. (2014). Investigation of the effect of microporous layers on water management in a proton exchange membrane fuel cell using novel diagnostic methods. *International journal of hydrogen energy, 39*(29), 16390-16404.

Boden, Marland, G., & Andres, R. (2019). *Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO2 Emissions.* Oak Ridge National Laboratory, Carbon Dioxide Information

Analysis Center. Oak Ridge, Tenn., U.S.A.: U.S. Department of Energy. doi:10.3334/CDIAC/00001_V2010

Chen, G., Zhang, G., Guo, L., & Liu, H. (2016). Systematic study on the functions and mechanisms of micro porous layer on water transport in proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy, 41*(9), 5063-5073.

Chen, T., Liu, S., Zhang, J., & Tang, M. (2019). Study on the characteristics of GDL with different PTFE content and its effect on the performance of PEMFC. *Int J Heat Mass Transf, 128*, 1168-1174.

Denis K, J. Z. (2005). In situ diagnostic of two-phase flow phenomena in polymer electrolyte fuel cells by neutron imaging Part A. Experimental, data treatment,. *Electrochim Acta*, 2603-2614.

Fang-Bor, W., Ay, S., Chun-Ying, H., & Chi-Yuan, L. (2006). Study of water-flooding behaviour in cathode channel of a transparent proton-exchange membrane. *Journal of Power Sources*, 674-80.

Fuel Cells. (2014). 05 02, 2021 tarihinde American History: https://americanhistory.si.edu/fuelcells/intro.htm adresinden alındı

Ge, S., & Wang, C.-Y. (2007, 7 31). Liquid Water Formation and Transport in the PEFC Anode. *Journal of The Electrochemical Society, 154*(10), B998-1005. 05 02, 2021 tarihinde alındı

Hickner, M. S., Chen, K., DN, M., Hussey, D., Jacobson, D., & Arif, M. (2006). Real-time imaging of liquid water in an operating proton exchange membrane fuel cell. *J Electrochem Soc*, A902.

Ijaodola, O., Hassan, Z. E., Ogungbemi, E., Khatib, F., Wilberforce, T., Thompson, J., & Olabi, A. (2019). Energy efficiency improvements by investigating the water flooding management on proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). *Energy*, 246-267. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.074

International Energy Agency. (2019, Mart 26). *Global Energy & CO2 Status Report 2018*. Kasım 2019 tarihinde International Energy Agency: www.iea.org/geco/data adresinden alındı

Irfan, S., & Chao-Yang, W. (2009). Visualization and quantification of cathode channel flooding in PEM fuel cells. *J Power Sources*, 444-51.

Kim, T., Lee, S., & Park, H. (2010). A study of water transport as a function of the micro-porous layer arrangement in PEMFCs. *Int J Hydrogen Energy, 35*(16), 8631-8643.

Kirk, W., Steven, H., & Roderick, E. (2006). Insights into the distribution of water in a self-humidifying H2/O2 proton-exchange membrane fuel cell using 1H NMR microscopy. *J Am Chem Soc*, 14192-9.

Lee, S. J., Lim, N.-Y., Kim, S., Park, G.-G., & Kim, C.-S. (2008). X-ray imaging of water distribution in a polymer electrolyte fuel cell. *Journal of Power Sources, 185*(2), 867-870.

Li, Y., Pei, P., Wu, Z., Ren, P., Jia, X., Chen, D., & Huang, S. (2018). Approaches to avoid flooding in association with pressure drop in proton exchange membrane fuel cells. *Applied Energy, 224*, 42-51.

Lim, C., & Wang, C. (2004). Effects of hydrophobic polymer content in GDL on power performance of a PEM fuel cell. *Electrochimica Acta, 49*(24), 4149-4156.

Liu, H., Tan, J., Cheng, L., & Yang, W. (2018). Enhanced water removal performance of a slope turn in the serpentine flow. *Energy Conversion and Management, 176*, 227-235. doi:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.104

Liu, X., Guo, H., & Ma, C. (2006). Water flooding and two-phase flow in cathode channels of proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources, 156*(2), 267-280.

Manke, I., Hartnig, C., Grunerbel, M., Lehnert, W., Kardjilov, N., Haibel, A., . . . Riesemeir, H. (2007). Investigation of water evolution and transport in fuel cells with high resolution synchrotron x-ray radiography. *Applied Physics Letters, 60*(17), 174105.

Micheal, M., Zijie, L., Jacob, L., Jon, O., Thomas, T., & Satish, G. (2010). Through-plane water transport visualization in an operating PEM fuel cell by visible and infrared imaging. *ECS Trans*, 1423-1433.

Ogungbemi, E., Ijaodola, O., Khatib, F., Wilberforce, T., El Hassan, Z., Thompson, J., . . . Olabi, A. (2019). Fuel cell Membranes.Pros Cons. *Energy*, *172*, 155-172.

Ous, T., & Arcoumanis, C. (2009). Visualisation of water accumulation in the flow channels of PEMFC under various operating conditions. *J Power Sources*, 182-189.

Owejan, J., Trabold, T., Jacobson, D. B., Hussey, D., & Arif, M. (2006). In situ investigation of water transport in an operating PEM fuel cell using neutron radiography: Part 2 - transient water accumulation in an interdigitated cathode flow field. *Int J Heat Mass Transfer*, 4721-31.

Perez-Page, M., & Perez-Herranz, V. (2011). Effect of the operation and humidification temperatures on the performance of a pem fuel cell stack on dead-end mode. *Int. J. Electrochem. Sci., 6*, 492-505.

Quan, P., Zhoua, B., Sobiesiak, A., & Liu, Z. (2005). Water behavior in serpentine micro-channel for proton exchange membrane fuel cell cathode. *Journal of Power Sources , 152*, 131-145.

Santarelli, M., & Torchio, M. (2007). Experimental analysis of the effects of the operating variables on the performance of a single PEMFC. *Energy Convers Manag*, 40-51.

Scott, D. S. (2007). *Smelling land : the hydrogen defense against climate catastrophe.* WestmountWestmount, Quebec: Canadian Hydrogen Association.

Shohji, T., Kazuhiro, T., Kousuke, N., & Shuichiro, H. (2005). Water content distribution in a polymer electrolyte membrane for advanced fuel cell system with liquid water supply. *Magn Reson Imag*, 255-258.

Singh, B. R., & Singh, O. (2012, 04 22). Global trends of fossil fuel reserves and climate change in the 21st century. *Fossil Fuel and the Environment, 8*, 167-192.

Springer, T., Zawodzinski, T., Wilson, M., & Gottesfeld, S. (1996). Characterization of Polymer Electrolyte Fuel Cells Using AC Impedance Spectroscopy. *Journal of the Electrochemical Society, 143*(2), 587.

Tseng, C.-J., Tsai, B. T., Liu, Z.-S., Cheng, T.-C., Chang, W.-C., & Lo, S.-K. (2012). A PEM fuel cell with metal foam as flow distributor. *Energy Conversion and Management, 62*, 14-21.

Wang, L., Husar, A., Zhou, T., & Liu, H. (2003). A parametric study of PEM fuel cell. *International journal of hydrogen energy, 28*(11), 1263-1272.

Wilberforce, T., Al Makky, A., Baroutaji, A., Sambi, R., & Olabi, A. (2017). Optimisation of bipolar plate through computational fluid dynamic simulation and modelling using nickle open pore cellular foam material. *Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality* (s. 4-6). Malaga, Spain: Citeseer.

Yang, Y., Zhang, X., Guo, L., & Liu, H. (2018). Different flow fields, operation modes and designs for proton exchange membrane fuel cells with dead-ended anode. *International Journal of Hydrogen Energy, 43*(3), 1769-1780.

Youcef, K., Yasmina, K. Z., & Ahmed, B. (2013). B. Effect of pressure in proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). *Int J Energy Eng.*, 158-164.

Zachary, D., & Richard, I. (2007). Quantitative MRI study of water distribution during operation of a PEM fuel cell using Teflon® flow fields. *Power Sources,* 678-687.

EKLER

Sayfa

EK 1 Hidrojen Hakkında……..…..106
EK 2 Yakıt Hücrelerinin ve PEMFC'lerin Tarihsel Gelişimi…….108
EK 3 Yakıt Pil Türleri ve Kullanıldığı Çalışmalar……114
EK 4 PEMFC'de Su hareketlerini Gözlemleme Yöntemleri ve Bu Yöntemler Kullanılarak Gerçekleştirilen Deneyler……..119
EK 5 Zamana Bağlı Volume of Fluid Sonuçlarına Ağ yapısı Yapısı ve Diğer Faktörlerin Etkileri…….……..128

EK 1: Hidrojen Hakkında

Hidrojen yer yüzünde en bol bulunan elementlerden biridir. Ancak saf halde doğada bulunmaz. Pek çok madde ile bileşik oluşturmuş şekilde bulunmaktadır. Hidrojen iyonik ve kovalent bağlar oluşturur.

Hidrojen hakkında bazı noktaları şöyle sıralanabilir: (Scott, 2007)

- Güneş saniyede 600 ton hidrojen tüketmektedir.
- Hidrojen doğrudan enerji kaynağı sayılmamalıdır, bir enerji taşıyıcı olarak düşünülmelidir.
- En basit ve en çok bulunan elementtir, Periyodik tablonun başında bulunur
- Hidrojen tek başına atom halinde bulunmaz.
- Ayrıştırıldığında oldukça *temiz* bir enerji taşıyıcıdır, çok hafiftir.
- Gelecekte dönüştürülebilir enerji kaynaklarıyla hidrojen üretimi yaygınlaşabilir.

Saf hidrojen elde edebilmek için yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulur. Günümüzde hidrojen üretiminin yaklaşık yüzde ellisi doğalgazdan, yüzde otuzu petrolden, yüzde yirmisi kömürden yüzde beşi ise su elektrolizi ile (Elektrik) üretilmektedir. Dolayısıyla hidrojen doğrudan bir enerji kaynağı olarak değil, enerji taşıyıcı olarak ele alınmalıdır. Hidrojen üretimi konusunda da fosil yakıtlarına alternatif yöntemler geliştirilmelidir. (Balat, 2008)

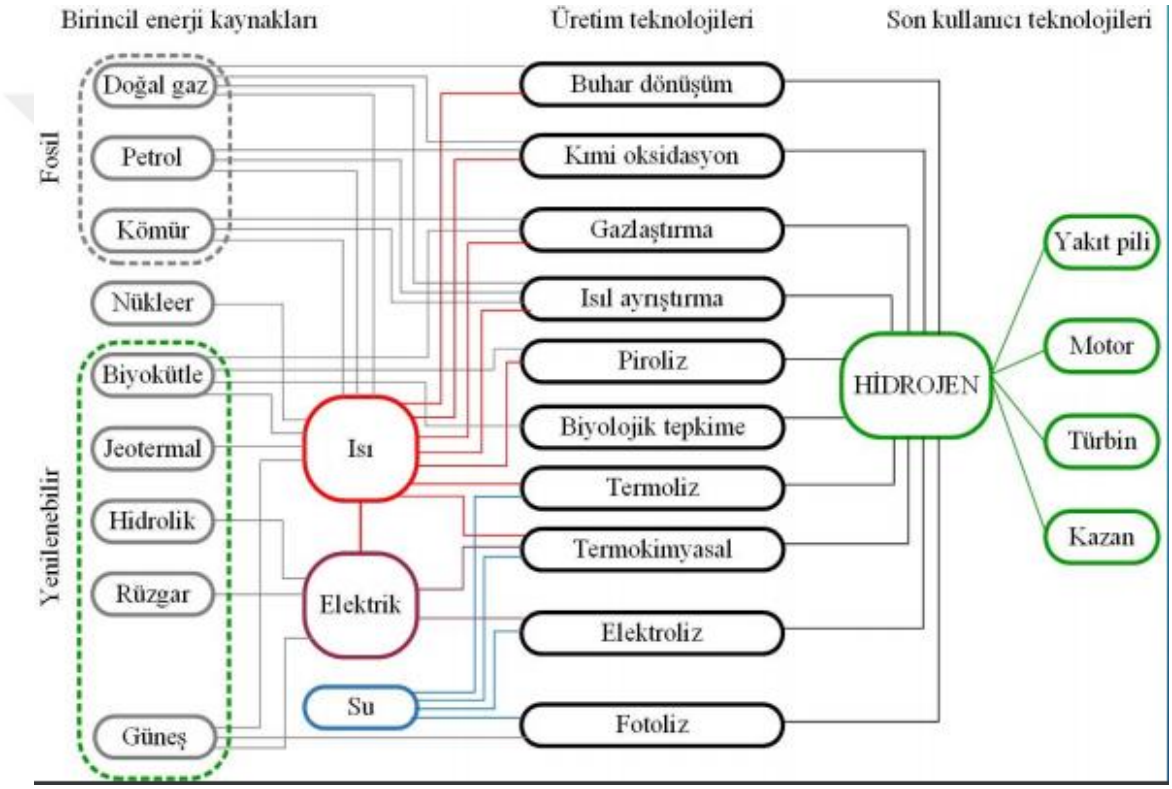
Hidrojenin pozitif yanları şu şekilde sıralanabilir:

- Sudan sıfır emisyon (zararlı gaz salınımı) ile üretilebilir.
- Çeşitli şekillerde (örneğin: yüksek basınçla sıvı halde veya bir katıya tutundurularak vs.) depolanabilir.
- Doğada bol miktarda mevcuttur.
- Fosil yakıtlarından daha yüksek enerji değerine sahiptir, uzun mesafe taşımaya uygundur.
- Farklı enerji formlarına dönüşebilir.

Hidrojenin negatif yanları şu şekilde sıralanabilir:

- Üretimi pahalıdır ve üretimi için uygun altyapı yoktur. Şu an yüksek oranda fosil yakıtlarına bağlı üretilmektedir
- Depolaması zordur. (Sıkıştırılarak veya metale bağlanarak depolanabilir.)
- Tutuşma riski yüksektir. (Metale bağlı depolanması tutuşma riskini düşürmek için tercih konusudur.)
- Taşınması güçtür. Petrol boru sistemleriyle, kömür kamyonlarla taşınabilirken hidrojen ancak küçük lotlar halinde taşınabilir.

Hidrojen Üretim yöntemleri aşağıda Şekil EK 1.1'de verilmiştir. (Avcıoğlu, 2017)



Şekil EK1.1. Hidrojen üretim yöntemleri

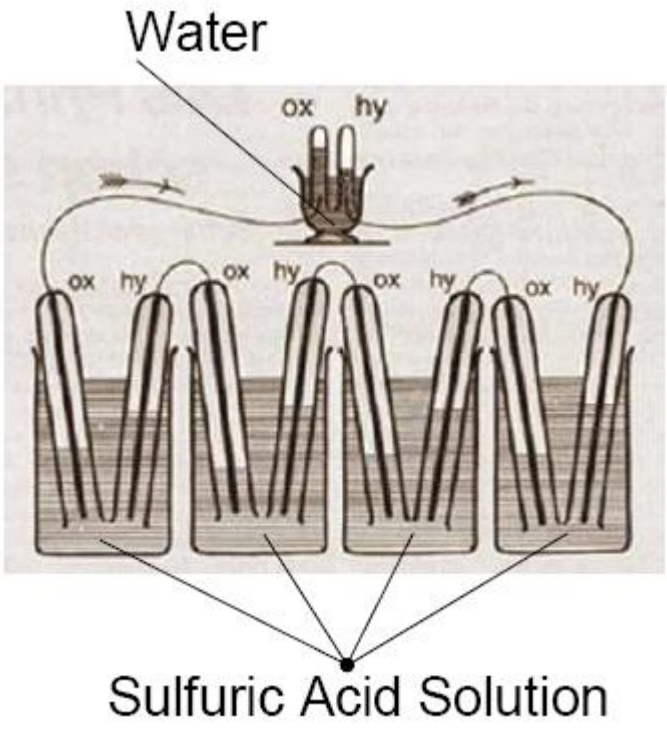
EK 2: Yakıt Hücrelerinin ve PEMFC'lerin Tarihsel Gelişimi

Yakıt hücreleri üzerine özellikle yakın zamanda çok araştırma yapılan bir konu olsa bile aslında 150 yıllık bir geçmişe sahiptir. Bu konudaki bilgilere ilgili referanstaki web sayfasından ulaşılabilir. (Fuel Cells, 2014) 1800'lü yıllarda temelleri bir merak uğruna atılan yakıt hücresi, 1900'lü yıllarda derin bir araştırma ve geliştirmeye uğramıştır. Tarihte yakıt hücreleriyle adı anılan birkaç kişi vardır ve bunlardan başında William Robert Grove gelmektedir.



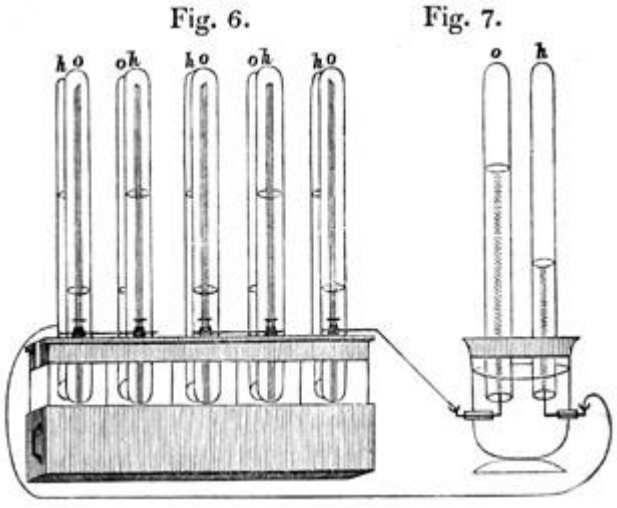
Şekil EK2.1. William Robert Grove

Hukukçu ve bilim insanı olan William Robert Grove(1811-1896) 1837'de yakıt pilleri hakkında ilk çalışmasını yayınlamıştır. 1839 yılında kalay ve platinyum elektrotlarını özel bir seramikle ayırıp aside batırarak elektroliz reaksiyonunu ters çevirmeyi başarmış ve yakıt pillerinin temelini göstermiştir. Bilime aşk duyan Grove'un çalışmaları enerji (ve korunumu) üzerine yoğunlaşmıştır. 1842'de gaz voltaik pili geliştirmeyi başarmış ve buharı ısı enerjisi ile moleküllerine ayırıp, bu işlemin tersine de çalışabileceğini göstermiştir. (Ayrıca moleküllerin ısı enerjisi ile ayrıldığını gösteren ilk insan olmuş, kendisi Birleşik Krallıkta pek çok kez onurlandırılmıştır. Hayatının bir döneminde de hem hukuk hem bilim bilgisini kullanabildiği patent yargıcı olarak görev yapmıştır. Bilime o kadar alakalı imiş ki davalarında incelediği patentlere katkı yaptığı, inovasyon önerdiği olurmuş.)



Şekil EK2.2. Gaz Voltaik Pili

1843'te bir dergide yayınlanan yazısında Groove, Dr. Schoenbein'e 'den aldığı bir mektupta onun oksijenin elektrik üretimine doğrudan bir katkı sağlamadığı konusunda iddiada bulunduğunu belirtmektedir. Schoenbein'e göre oksijen yalnızca su oluşumunda rol almaktadır ki şu anki kanı da bu yönde bulunmaktadır. Grove aynı yazıda yaptığı deneyi paylaşmıştır. Deneyde oksijen ve hidrojen bulunan aynı boyda beş tübü seyreltik sülfürik asit içerisine batırmış ve Şekil EK2.3'te görünen deney düzeneğini kurmuştur. Düzenekteki devreye bir voltametre yerleştirmiş ve otuz iki saat bekletmiştir. Bu sürenin sonunda 2,1 inç ^{3} gaz karışımı düzenekte birikmiş ancak 1,5 inç^3 hidrojen ve 0,7 inç^3 oksijen sıvısı tüplerde yükselmiştir. Böylelikle 0,1 inç^3 hidrojenin batarya tüplerine çekildiğini gözlemlemiştir. Grove oksijenin de enerji üretiminde kesin olarak rol aldığını düşünmüştür. Ancak o da ısı oluşumu ve yeni madde oluşumunu açıklayamamıştır.



Şekil EK2.3. Grove Deneyi

1800 yılında İngiliz bilim insanları William Nicholson ve Anthony Carlisle tarafından suyun elektrik akımı ile hidrojen ve oksijene ayrılabildiği gösterilmiştir. Ancak gazların kullanılarak elektrik elde edilebilmesi Grove'un değimiyle Elektrolizi bir adım ileri öteye taşınmıştır.



Şekil EK2.4. Christian Friedrich Schoenbein

O dönemde bilim dünyası gaz pilinin çalışmasını anlamakta güçlük çekmekteydi. Neden elektrik akımı bazı maddeler arasında gerçekleşirken bazılarında olmuyordu. O dönemin iki teorisi, kontak teorisi ve kimyasal teori Grove Hücresini açıklamaya çalışıyordu. Kontak teorisi isminden anlaşılacağı üzere birbirlerine değen maddelerin elektrik akımı ortaya çıkardığını savunurken, kimyasal teori elektrik akımının kimyasal reaksiyon sonucu oluştuğunu öne sürüyordu. Schoenbein de kimyasal teori destekçilerindendi. Johand Poggendorff ise Kontak teoriyi savunan bir bilim insanıydı. Grove'un kendisi de kimyasal teoriyi kabul etmişti. Zamanla bu tartışma önemini yitirmiştir. Şimdi her iki teorinin de haklı tarafları olduğu düşünülmektedir. Literatürde kimyasal reaksiyonun kontak alanında gerçekleştiği söylenmektedir.

Friedrich Wilhelm Ostwald(1853-1932) fizikokimya kurucularından birisidir. Ostwald yakıt hücrelerinin nasıl çalıştığının teorik olarak anlaşılmasına büyük katkılar sağlamıştır. 1893'te yakıt hücresini oluşturan bileşenleri tek tek deneysel olarak belirlemiştir. Bunlar: elektrotlar, elektrolit, oksitleyici ve indirgeyiciler, anyonlar ve katyonlardır.



Şekil EK2.5. Friedrich Wilhelm Ostwald

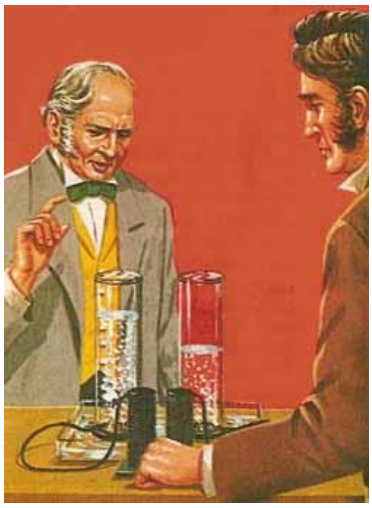
Grove gaz pilinin elektrot, gaz ve elektrolitin değdikleri noktada gerçekleştiğini belirtmiştir ancak daha fazlasını açıklamamıştır. Ostwalt ise tüm fiziksel özellikler ve kimyasal reaksiyonları göstererek Yakıt hücresi bilimsel araştırmalarının temelini oluşturmuştur.



Şekil EK2.6. Ludwig Mond

Doğrusu 19.yy'da teori ve bilimsel tartışmalar önem arz ediyor, pilin çalışmasının sebebi açıklanmaya çalışılıyordu. Bugün ise çalışmalar nasıl daha efektif bir yakıt hücresi tasarlanabilir, buna daha uygun materyaller geliştirilebilir soruları üzerine yoğunlaşmıştır. İşin temelinde yatan fizik kurallarını keşfetmek ikinci plana koyulmuştur.

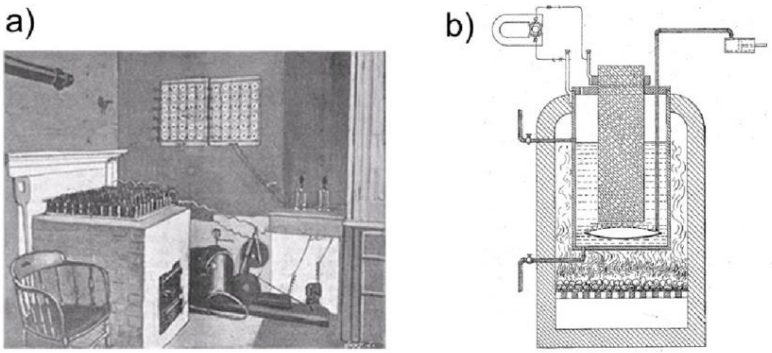
1880'lerde kömür ve kömür gazının bu araç ile doğrudan elektriğe çevrilme ihtimali üzerine durulmaya başlandı. O zamanda kömür temel yakıttı ve kömür gazına da yakıt gazı deniyordu. Grove'un gaz pili de yakıt pili şeklinde çağrılmaya sonra da yakıt hücresi denmeye başladı. 1889'da Ludwig Mond(ve asistanı Carl Langer) , Mond gazı ile çalışan bir yakıt hücresinde 6 amper/sqrfeet 0.73 V güç elde etmeyi başarmıştır. Mond'un pili elektrot olarak delikli yapıda platinyum kullanmaktaydı. Elektrolit olarak da quasi-solid formunda, daha da açıklamak gerekirse sıvı asidin porous (gözenekli) bir yapıda emilmesiyle oluşmuş bir materyal kullanarak başarı elde etmişti.



Şekil EK2.7. Charles R. Alder Wright ve C. Thompson

Aynı zamanda Charles R. Alder Wright ve C. Thompson benzer bir yakıt hücresi geliştirmişlerdi. Onlar da gazları yerlerinde tutmakta zorlandıklarını belirtiler ve hücre başına çok düşük akımlarda dahi 1 V elde edemediklerini belirtmişlerdi. Sonuçta yeterli kaynak sunulması ile bir pilin kolaylıkla yapılabileceğini ancak elde edilen düşük akımdan dolayı henüz ekonomik açıdan bir fayda sağlamayacağı sonucuna varılmıştı. Fransız araştırmacılar Louis Paul Cailleteton ve Louis Joseph Colardeau da aynı sonuca varmıştılar. Pilin ancak değerli metaller ile çalıştığını bu yüzden pratik olmadığını belirtilmişti.

1896'da William W. Jacques'in kömürü doğrudan elektrik enerjisine çevirme konusunda büyük bir buluş ortaya koydu zannedildi. Jacques'in karbon pilinde karbon elektrota hava püskürtülerek alkali elektrolitin tepkimeye girmesi sağlanıyordu. (En azından o öyle zannediyordu). Sonra gerçekte olan elektrokimyasal değil, termoelektrik bir olay olduğu anlaşıldı.



Şekil EK2.8. Jacquesin Karbon pili

O zamanlarda hidroelektrik ve buhar santralleri düşük maliyete büyük enerjiler üretebil-mekteydi. Standart piller ise basit ve kullanılabilirdi. Yakıt hücreleri her ikisine de alternatif olamazdı. Bu yüzden yakıt hücreleri uzun yıllar araştırma laboratuvarlarında kalmaya devam etmiştir.

20. yüzyılın başlarında Emil Baur geniş çaplı araştırmalar yapmıştır. Ki bunlardan biri erimiş gümüşü elektrolit olarak kullanan ve katı kil ve metal oksitleri elektrolit olarak kullanan yüksek ısılı cihazlardır. O. K Davtyan ise Sodyum Karbonat, Tungsten trioxite ve soda camına elektrotlarının iletkenliğini ve gücünü arttırmak için monazite kumuna eklemiştir. Çalışmalarının çoğu istenmeyen reaksiyonlara sebep olsa da Bauar ve Davtyanın yüksek ısılı cihazları bugünün erimiş karbon ve solid oksit yakıt hücrelerinin temelini oluşturmuştur.



Şekil EK2.9. Emil Baur



Şekil EK2.10. Francis Thomas Bacon

1930'larda Francis Thomas Bacon yakıt hücreleri konusunda çalışmaya başlamıştır. 1939'da nickel gauze elektrotları içeren ve tam 3000 psi'de çalışan bir hücre yapmıştır. Bacon yakıt hücresinin İngiliz donanmasına iyi bir kaynak olabileceğine inanmıştır. Ancak kısa süre sonra kendisine su altında ses tespiti konusunda bir araştırma görevi verilmiştiri. O da bu çalışmasını askıya aldı. Savaş bittikten sonra Bacon Cambridge'e gidip yaklaşık 20 yıl boyunca büyük çaplı sunumlar düzenlemiştir. 1958'de 10 inch çapında elektrotları bulunun bir alkali hücresini İngiliz ulusal araştırma geliştirme kuruluna sunmuştur. Bacon'un alkali pili elektrolit olarak potasyum hidroksit (KOH) kullanmaktaydı. (Oysa Grove zamanında hep asit elektrolitleri kullanılmıştır). KOH asitler kadar iyi bir performans sergilemişti. Üstelik elektrotlara zarar da vermemekteydi. Bacon'un yakıt hücresi Pratt & Whitney tarafından, Apollo uzay aracında kullanmak üzere lisanslanmıştı.

Savaştan sonra yakıt hücrelerinin tarihi daha da dallanmış olmuştur, farklı hücre türlerine göre ayrılmıştır. Bazı araştırmacılar (bacon gibi) birden çok hücre türünü incelemişlerdir.

İşte PEMFC bu türlerden birisidir. Diğer yakıt hücreleri ise Alkali fuel cells, Molten Carbonate Fuel Cells, Phosphoric Fuel Cells ve Solid Oxide Fuel Cells.

EK 3: Yakıt Pil Türleri ve Kullanıldığı Çalışmalar

(Fuel Cells, 2014)'den aktarıldı

1.PEMFC

PEM teknolojisi ilk General Electric'te 1960 yılında Thomas Grubb ve Leonard Niedrach tarafından keşfedilmiştir. Amerikan ordusu donanmasında kullanılması için geliştirilen PEM teknolojisi ilk General Electric'te 1960 yılında Thomas Grubb ve Leonard Niedrach tarafından keşfedilmiştir. Amerikan ordusu donanmasında kullanılması için geliştirilen PEM su ve lityumun karıştırılması sonucunda elde edilen hidrojen ile kullanılmıştır. Bu karışım kolaylıkla lojistik anlamda taşınabilirdir. PEMFC de oldukça kompakt ve taşınabilirdir ancak platinyum katalizörler oldukça pahalıdır.

PEM teknolojisi başta NASA'nın Gemini Projesinde de kullanılmıştır. Gemini Projesi Apollo Projesinin tatbikatı olarak eşyaların 14 gün boyunca simüle edilmiş şartlarda test edilmesidir. PEM hücreleri de seçilmiştir ancak hücre tıkanması, Membrane'den oksijen kaçımı gibi bazı teknik aksaklıklar yaşanmıştır. Bu yüzden Gemini 5'te PEMFC kullanılmamıştır.

General Electric PEMFC'yi geliştirmeye devam etmiştir. 1970'te Amerikan donanmasının oksijen toplama santralinde kullanılmıştır. 1980'de İngiliz donanması PEMFC'yi denizaltılarında kullanmaya başlamıştır. Sonrasında birden çok örgüt PEM ile ilgilenmeye başlamıştır. 90'larda Los Alamos Ulusal Laboratuvarı ve Texas Üniversitesi PEM yakıt hücrelerine gerekli platinyum miktarını düşürmek için çalışmalara başlamıştır. Şimdiki PEM hücreleri çok daha düşük oranda platinyum ile çalışabilmektedir. Ayrıca PEM çeşitli şekillerde geliştirilmeye devam edilmektedir. Örneğin Goretex materyali ile elektrolit hava koşullarına karşı güçlendirilmiştir.



Şekil EK3.1. PEMFC ile çalışan bir otobüs

PEM hücrelerinin uzay macerası çok parlak olmasa da yeryüzündeki taşıtlara uyum sağlaması için pek çok çalışma yapılmaktadır. 1995'te Ballard Systems PEM hücreli otobüsleri Vancauver ve Chicago'da test etmiştir, Daimler Chrysler tarafından

otomobillerde de test edilmiştir. PEM hücreleri insansız hava balonlarında da kullanılmıştır.

Güneş enerjisi ile çalışan Helios hava aracında altı ay devamlı uçuş amacıyla denenmiştir. Helios gündüzleri güneş enerjisiyle elektrik motorları vasıtasıyla elektroliz gerçekleştirmekte geceleri de oluşturduğu hidrojeni tekrar güneş enerjisine dönüştürmektedir. Helios 2 yıl boyunca PEMFC ile ve PEMFC'siz birkaç test uçuşu gerçekleştirmiştir.



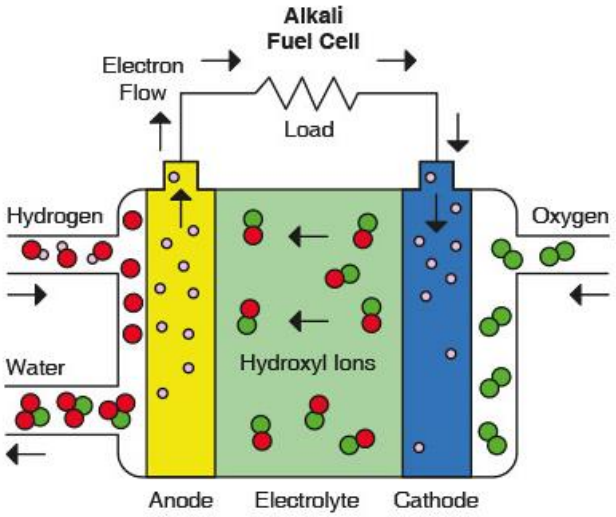
Şekil EK3.2. HELIOS Hava Aracı

Hava kirliliğinin konusunda ciddi kısıtlamalar gelmeye başladıktan sonra otomobil firmaları da PEMFC'yi çalışmaya başlamıştır. Texas ve Virginia üniversitesinde 20KW güce sahip hücre kümeleri ile hibrit araçların performansları incelemiştir. Ford ve Volkswagen gibi otomotiv devleri de PEMFC'yi test etmektedir.

1980'den bu yana PEM statik güç uygulamalarında da kullanılmaktadır. Ballard Systems 1989'da 5KW'lık bir PEM hücre kümesi tanıtmıştır. İki sene sonra GPU ve Ballard Crane Naval hava istasyonunda 250 KW'lık bir güç santrali işletmeye başlamıştır.

2.Alkali yakıt hücreleri

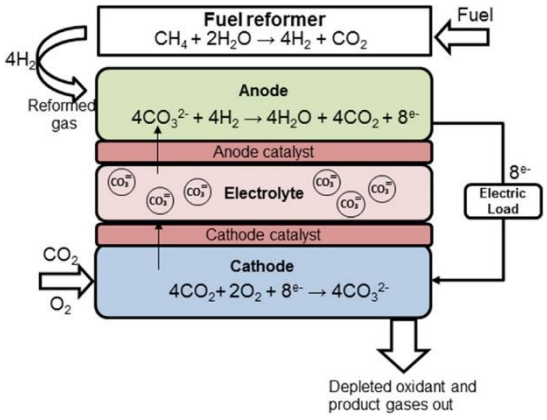
Alkali yakıt hücreleri 150-200 dereceler arasında çalışmaktadır. Bu hücrelerde OH- katottan anoda taşınmakta ve orada hidrojenle reaksiyona girerek su oluşturmakta ve elektron salınımı gerçekleştirmektedir. Bu elektronlarda dış bir devrede katoda geri aktarılır. Ve OH iyonu oluşumuna katkı sağlar. Alkali hücreler %70 verimlilik ile çalışır ve çok az bir kirliliğe sebebiyet verir. Alkali hücrelerin dezavantajları ise oldukça saf bir hidrojen yakıtına ihtiyaç duymalarıdır ki aksi halde istenmeyen reaksiyonlar gerçekleşebilir. Bir diğer dezavantajı ise katalizör olarak oldukça fazla platinyuma ihtiyaç duymasıdır, bu da maliyeti oldukça arttırır. Bu yüksek maliyetteki piller gündelik kullanım dışında kalmıştır. NASA tarafından Apollo uzay araçlarında kullanılmıştır.



Şekil EK3.3. Alkali Yakıt Hücresi

3.Erimiş karbon yakıt hücreleri

Diğer bir tür Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC), Karbonat tuzunu elektrot olarak kullanmaktadır. Bu yakıt hücresi 650 derecede çalışır. Eriyen tuzdaki Karbonat iyonları katottan anoda göç eder. Anotta hidrojenler tepkimeye girerek su, karbondioksit ve elektron açığa çıkarır. Elektronlar dış bir devreyle katoda aktarılıp, burada havadaki oksijen ve karbondioksit ile tepkimeye girerek tekrar karbonat iyonları açığa çıkarmaktadır. Yüksek sıcaklığa sahip MCFC pek çok yakıttan hidrojeni çekebilmektedir. Ayrıca karbon monoksitin pili boğması da çok daha düşük bir ihtimaldir. Katalizör olarak nikel kullanılabilmektedir ki nikel platinyumdan oldukça ucuzdur. Yüzde altmış verimlilik ile çalışır. Eğer kayıp ısı



Şekil EK3.4. Molten Carbonate Fuel Cell

co-generation ile kullanılırsa verimlilik yüzde seksene kadar çıkarılabilir. Genelde 2MW'lık bir güç üreten üniteler piyasadadır ancak 50 ile 100 MW arasında çıkış gücüne sahip tasarımlar da vardır.

İki büyük dezavantajı vardır. Birincisi sıvı elektrolit ile çalışmak çok daha karmaşıktır. İkincisi ise kimyasal reaksiyonlardan dolayı katoda karbondioksit yüklemesi yapılması gerekir. Ayrıca yüksek sıcaklık da kullanım alanlarını kısıtlar. MCFC'ler büyük güç santrallerinde kullanılır. Hali hazırda pek çok sürekli ve güçlü örnekleri kullanılmıştır ve araştırılmaya da devam edinilmektedir. Doksanlarda bir Japon firması 1kw'lık MCFC'yi 10,000 saat aralıksız çalıştırmayı başarmıştır. Şimdi 3MW'lık projeler söz konusudur, Ayrıca Mercedes Alabamaya 250 kwlık bir MCFC güç santrali kurmayı planlamaktadır.

4.Fosforik asit yakıt hücresi

Diğer bir tür de Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)'dir, 150-200 derece arasında çalışır. Elektrolit olarak Fosforik asit kullanılır. Hidrojen iyonları (protonlar) anottan katoda geçer. Anotta oluşan elektronlar da dış bir devreyle katoda aktarılır. Katotta oksijen, elektronlar ve hidrojen birleşerek su oluşturur. Katalizör olarak yine platinyum kullanılır. PAFC'ler karbon monoksit boğulmasına karşı toleranslı yakıt hücreleridir. Fosforik asit suyun kaynama noktasının altında çalışabilmektedir. Ancak önemli bir dezavantajı diğer aksamların aside karşı dirençli olmasının gerekmesidir.

Hidrojen hücre dışında bir hidrokarbon yakıtından elde edilir. Eğer gazolinden elde edilirse sülfür ayıklanmalıdır çünkü sülfür elektrot katalizörlerine zarar verir. Verimliliği yüzde kırk ila elli arasındadır, co-generation ile ısı değerlendirilirse yüzde seksenlere çıkarılabilir. Genel kullanımda 200KW a kadar güç sağlanabilir ancak 11 MW güç sağlayan üniteler de test edilmiş. Ulaşımda otobüslerde kullanım alanı bulan PAFC uzun bir ısınma süresine ihtiyaç duyar bu yüzden otomobillerde tercih edilmezler. Güç Santrallerinde de uzun zamandır kullanılan PAFC'ler elektrik kesintilerinde bazı bina aydınlatmalarının devam etmesi için kullanılmıştır.

5.Katıoksit Yakıt Hücresi



Şekil EK3.5 Siemens Katıoksit Yakıt Jeneratör Sistemi

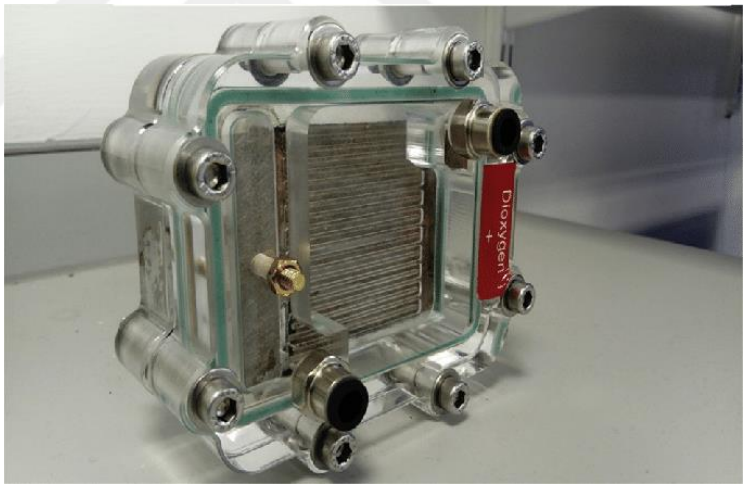
Solidoxide Fuel Cell (SOFC) ise sert seramik elektrot içeren ve 1000 dereceye yakın bir sıcaklıkta çalışan yakıt hücresidir. Zirkonyum oksit ve kalsiyum oksit ile kristal bir latis oluşturulur, bunun dışında diğer oksidanlar da elektrolitte kullanılabilmektedir. Bu elektrolit her iki tarafından da özel gözenekli yapıda elektrotlar ile kaplanmıştır. Oksijen iyonları latisten geçerek anotta hidrojen içeren bir yakıtı oksitler. Katoda da genelde hava yoluyla oksijen verilmeye devam edilir. Anotta oluşan elektrotlar katoda aktarılarak devre tamamlanır. SOFC yüzde altmışlara varan bir verimlilik ile çalışır. Aynı MOFC'ler gibi yüksek sıcaklıkta çalışmaları sebebiyle SOFC'ler de genelde güç santrallerinde kullanılmaktadır. Öte yandan SOFC'lerin küçük yapısı ve temizliği şehir alanlarında kullanılmalarında tercih edilmesine sebep olmaktadır. Siemens 220KW'lık SOFC'yi 3400 saat %53 verimlilik ile çalıştırmayı başarmıştır.

EK 4: PEMFC'de Su hareketlerini Gözlemleme Yöntemleri ve Bu Yöntemler Kullanılarak Gerçekleştirilen Deneyler

(Ijaodola, ve diğerleri, 2019)'dan aktarıldı.

Su birikimi giren yakıtın nem oranı, sıcaklık, basınç, materyal, geometri gibi pek çok değişkene bağlıdır. Su hareketini incelemek için çeşitli ampirik veriler elde etmek gerekir. Bu yüzden su birikimini tespit edebilecek bazı metotlar geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları şunlardır:

- Direct Visualization (Doğrudan Gözlemleme)
- Neutron imaging (Nötron resimlemesi)
- Nuclear magnetic resonance imaging (Tıpta bilinen kısaltması: MR)
- X-ray imaging (X-ray resimlemesi)



Şekil EK4.1. Transparan bir pil hücresi

Direct Visualization, PEM hücresinde transparan dış levhalar kullanarak görüntü alma işlemidir. Bu işlem yüksek hızlı kameralarla, dijital kayıt cihazları, CCD kamera ve kızılötesi tespit cihazları ile sağlanabilir. Bu sayede su oluşumu, damlacık gelişimi ve hareketleri incelenebilir. Ge ve Wang, hidrofobik ve hidrofilik kanallarda su oluşumunu bu yöntemle incelemişlerdir. Düşük akıntıda suyun hidrofobik kısımda yoğunlaşmaya daha meyilli olduğunu; yoğunlaşan suyun da hidrofilik kısımda birikip kanalları kapadığını gözlemlemişlerdir. (Ge & Wang, 2007)

Asla ve diğerleri, termal-dijital kameraları kullanarak transparan bir yakıt hücresi incelemişlerdir. Onlar hava akımı arttıkça sıcaklık dağılımının homojenliğinin azaldığını ve bunun sıvı su birikmesine sebep olduğunu tespit etmişlerdir. (Asla, ve diğerleri, 2019)

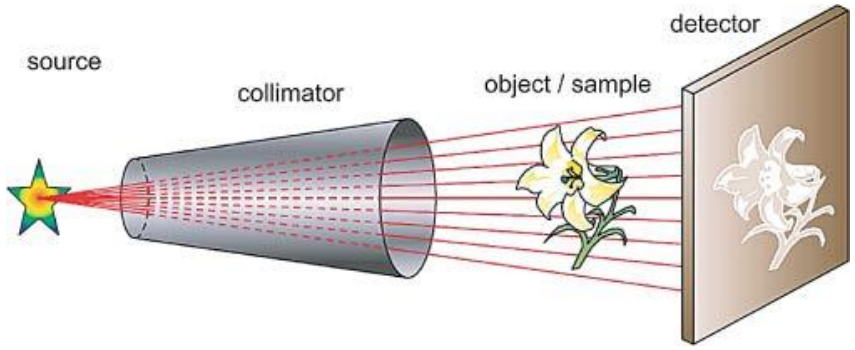
Fang-Bor ve diğerleri, katotta nem oranı arttıkça hücre performansının arttığını gözlemlemişlerdir. (Fang-Bor, Ay, Chun-Ying, & Chi-Yuan, 2006)

Irfan ve Chao-Yang, bu yöntemle PEMFC'deki su dengesini gözlemlemişlerdir. Onlar su birikiminin düşük akıntı hızında daha fazla olduğu sonucuna varmışlardır. Nem dağılımının deneyden deneye farklılık gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Ancak belirli durumlarda su oluşumunun ciddi seviyelerde oluştuğunu tespit etmişlerdir. (Irfan & Chao-Yang, 2009)

Micheal ve diğerleri, dijital mikroskopla incelediği hücrede sıvı su oluşumunun 0.4A/cm2 akım da oluştuğunu gözlemlemişlerdir. (Micheal, ve diğerleri, 2010)

Ous ve Arcoumanis bu yöntemle incelediği hücreyle, hidrojen dengesi ve hava dengesinin su oluşumuna etki ettiği sonucuna varmışlardır. (Ous & Arcoumanis, 2009)

Neutron imaging yönteminde ise gönderilen nötronların hidrojen üzerinde iz bırakır. Bu izin takip edilmesiyle su hareketi tespit edilebilir. Deney üzerinde minimal etkiye sahiptir, anlık ve bölgesel olarak bilgi alınabilmektedir. Özellikle suyun dağılımını çıkarmak için oldukça etkilidir. (Denis K, 2005)

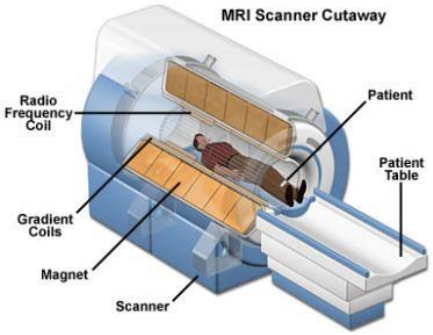


Şekil EK4.2. Nötron resimlemesi

Hickner ve diğerleri, bu yöntemi kullanarak farklı koşullarda su miktarını incelemişler ve sıcaklık arttıkça su miktarının arttığını tespit etmişlerdir. (Hickner, ve diğerleri, 2006)

Owejan ve diğerleri, bu yöntemi kullanarak interdigitated kanalları incelemişlerdir. Su birikiminin katot bölgede ve GDL de oluştuğunu tespit etmişlerdir. (Owejan, Trabold, Jacobson, Hussey, & Arif, 2006)

Nuclear magnetic resonance imaging (NMRI veya MR) yöntemi de su birikimini tespit etmekte kullanılabilmektedir. Bu yöntemle su opak yüzeyler altında da incelenebilmektedir. Çalışma sistemine etkisi yoktur, PEMFC'ye de zarar vermemektedir. Kirk ve diğerleri, bu yöntemle anot-katot aynı yönde ve karşıt yönde kanal akıntılarını incelemişlerdir. Aynı yönde akımlarda su inlet civarında birikmesine karşın, zıt yönlü akımlarda suyun homojen dağıldığını 3 boyutlu olarak gözlemleyebilmişlerdir. (Kirk, Steven, & Roderick, 2006)



Şekil EK4.3 MR Sağlık alanında yaygın olarak kullanılır.

Zachary ve Richard, oksijen indirgenmesi sonucunda oluşan suyun damlacık olmadan önce GDL'den aktığını gözlemlemişlerdir. (Zachary & Richard, 2007)

Shohji ve diğerleri, Membrane doğrudan su sağlandığında daha yüksek voltajlar edilebileceğini gözlemlemişlerdir. (Shohji, Kazuhiro, Kousuke, & Shuichiro, 2005)

X-ray yönteminin de su dağılımını gözlemlemede kullanılabileceği gözlemlenmiştir. Manke ve diğerleri, yüksek akımda hem anot hem katot bölgelerde su biriktiğini x-ray kullanarak gözlemlemişlerdir. (Manke, ve diğerleri, 2007). Ay ve diğerleri ile Lee ve diğerleri de bu yöntemleri kullanarak su hareketlerini incelemiştir. (Ay, Fang-Bor, Chun-Ying, & Yen-Ming., 2006) (Lee, Lim, Kim, Park, & Kim, 2008)

Sıvı suyun tahliyesi buhar tahliyesinden daha zordur. Sıvı sudaki yüzey gerilimi suyun tahliye olmasını zorlaştırır. Düşük sıcaklıkta su birikiminin daha fazla olduğunu gösteren pek çok çalışma vardır. (Perez-Page & Perez-Herranz, 2011) (Liu, Guo, & Ma, 2006)

PEMFC yüksek sıcaklıkta çalışınca Membrane'i kurur ve performansı düşer. (Wang, Husar, Zhou, & Liu, 2003)

Youcef ve diğerleri, hücre performansı yüksek basınçta arttığı ayrıca yüksek basıncın su atımını kolaylaştırdığını tespit etmişlerdir. (Youcef, Yasmina, & Ahmed, 2013)

Ancak anot kısımda basıncın fazla artması Membrane'in kurumasına ve geçirgenliğinin azalmasına sebep olur.

Santaralli ve Torchio, inlet basıncının 1 ile 3.1 bar arasında değiştiği durumları incelemiş ve yüksek basınçta pil performansının arttığını gözlemlemişlerdir. (Santarelli & Torchio, 2007)Amirinejad ve diğerleri, basınçla birlikte performans artışını Nerst denklemiyle açıklamışlardır. (Amirinejad, Rowshanzamir, & Eikani, 2006)

Kanal yapısını değiştirmek de PEMFC performansını etkiler. Su ve ark., paralel, interdigitated ve serpentine kanalları incelemişlerdir. Paralel kanalda merkez kısımlarda su birikimi başlarken interdigitated kanallarda bitim noktalarında birikme olduğunu tespit etmişlerdir. Serpentine kanallarda ise köşe noktalarda birikme yaşanmaktadır.

Yang ve diğerleri, serpentine kanallarda çok daha az su birikimi olduğunu gözlemlemişlerdir. (Yang, Zhang, Guo, & Liu, 2018)

Tseng ve diğerleri, su kanallarını metal bir köpüksü ile değiştirmişler ve bu köpüksünün daha fazla madde taşıyabildiğini, boşluklu yapıda olduğu için hız dağılımlarının daha homojen yapıda olduğunu göstermişlerdir. (Tseng, ve diğerleri, 2012)

Wilbertforce ve diğerleri, cfd simülasyonu ile serpentine kanalda su birikiminin kapalı noktalarda gerçekleştiğini ancak açık köpüksüde birikimin daha az olduğunu göstermişlerdir. (Wilberforce, Al Makky, Baroutaji, Sambi, & Olabi, 2017)

Mikro Porous Layer (MPL) kataliz katman ile akım kanaları arasında yoğunlaşan su buharının atılmasına yardımcı olan bir katmandır. Ayrıca GDL ile CL arasında kontak sağlar. Membrane'in hızlı kurumasına engel olur. Suyu dağıtır. Özellikle yüksek akımlarda kütle transferini arttırır.

Kim ve diğerleri, MPL'in PEMFC 'ye katkısını incelemişlerdir. MPL'i katotta bulunan, iki kısımda da bulunan ve MPL olmadan oluşturulan PEMFC'leri karşılaştırmışlardır. MPL bulunan hücreler daha kolay su atımı göstermişlerdir. Membrane'den anoda su transferine (back-diffusion) yardımcı olmuş ve suyun sıvı hale dönüşmesini azaltmıştır. MPL kütle transferini ve su aktarımını kolaylayarak PEMFC su dengesini kurulmasına katkı sağlamaktadır. (Kim, Lee, & Park, 2010)

Chen ve diğerleri de MPL'in Membrane'in nemli tutmasına ve su dağılımına yardımcı olduğu çıkarımını yapmışlardır. (Chen, Zhang, Guo, & Liu, 2016)

Blanco ve Wilkinson, benzer deneyler gerçekleştirerek MPL'in CL üzerinde su birikmesini engellediğini suyu eşit yaydığını ayrıca anot kısımdaki basınç düşmesini sağlamıştır. (Blanco & Wilkinson, 2014)

GDL'i hidrofobik materyaller ile kaplamak su atımına yardımcı olur. GDL genelde Fluorinated ethylene propylene (FEP) ya da Polytetrafluoroethlene ile kaplanabilir. Kaplanmamış GDL doğal hidrofibik yapısından dolayı daha fazla su tutar. Dolayısıyla su birikimine sebep olur. Bu da madde geçişini azaltır.

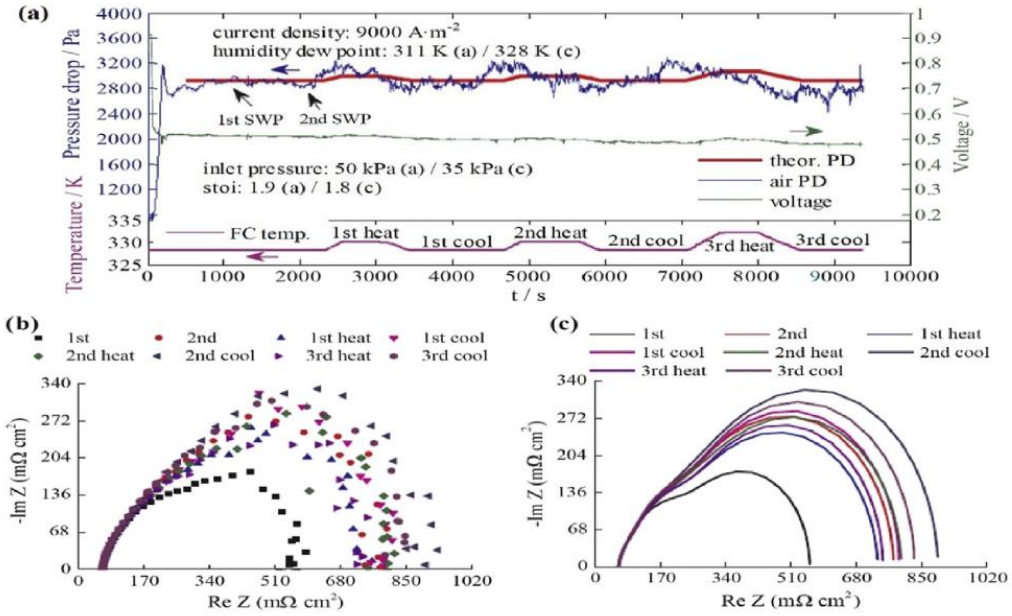
Chen ve diğerleri, GDL'i kaplamanın etkisini incemiştir. PTFE kaplanmış GDL'de kontak açısının arttığını tespit etmişlerdir. Kontak açısının artması da su atımına özellikle düşük sıcaklıkta yardımcı olmaktadır. (Chen, Liu, Zhang, & Tang, 2019)

Lim ve Wang, kütlesel olarak %10wt(wt:weight) FEP ve %40wt FEP kaplamalı PEMFC'leri incelemiştir. %10wt kaplamanın daha düzgün bir hidrofobik yüzey özelliği gösterdiği sonucuna ulaşmıştır. Ayrıca %10wt üzerinde kaplamanın kütle transferine ciddi etkide bulunduğunu gözlemlemiştir. (Lim & Wang, 2004)

Kore cumhuriyetindeki bir grup araştırmacının yaptığı araştırma sonucunda PEMFC hücre performansının nem oranıyla doğrudan ilgili olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Özellikle nemli çalışma koşularında katot kataliz tabakadaki suyun atımının gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Suyun birikmesi Membrane'in bir kısmının reaksiyona katılamayacağı ve hücre performansının düşeceği anlamına gelmektedir.

Ogungbemi ve diğerleri, 45 ile 50 dereceler arasındaki hücre performansını incelemişler ve hücrenin düşük akımda ve 45 derecede daha düşük performans gözlemlediğini tespit etmişlerdir. Bunun sebebini bu sıcaklıktaki hücrelerin elektro kimyasal olarak pasif davranmasına yormuşlardır. Yüksek akımlarda ise 45° deki hücrenin daha yüksek performans sergilediğini gözlemlemişlerdir. Bunu su birikimi, Membrane dehidrasyonu ve bazı karakteristik özellikleri ile açıklamaya çalışmışlardır. (Ogungbemi, ve diğerleri, 2019)

Sıcaklık yükseldiğinde hücre performansı büyük ölçüde Membrane'in nemli kalabilmesine bağlı olmaktadır. Düşük sıcaklıkta yoğunlaşan su bir süre sonra kanallarda birikime neden olacaktır. Akım sabit tutulduğunda (45 ve 50 ° için) su oluşumu neredeyse aynıdır. Reaksiyon hızı sıcaklığa bağlı olarak artacaktır. Dolayısıyla su oluşumu da artacaktır. Hem su yoğunlaşmasının hem de buharlaşmasının uygun seviyede olması için 45 ile 50 derece arasında optimum bir çalışma hızı olması gerekir. (Ijaodola, ve diğerleri, 2019)



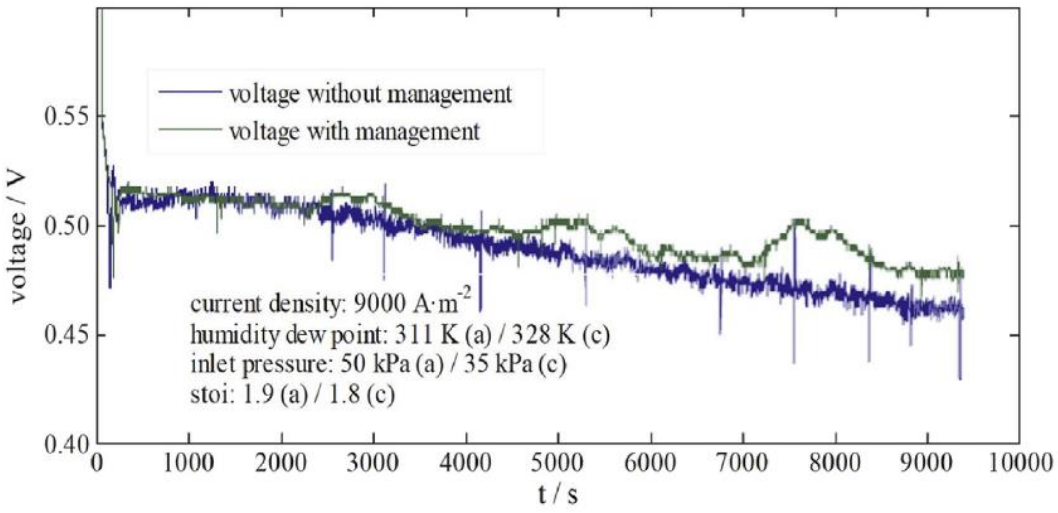
Şekil EK4.4. Yakıt hücresinde su yönetimini geliştirmek için sıcaklığı düzenlemek a) Sıcaklığı değiştirerek voltaj kontrolü b ve c) Elde edilen pil rezistans eğrileri

Li ve diğerleri, katottaki basınç düşüşünü izleyerek incemiştir. (Li, ve diğerleri, 2018) Onlar hücre sıcaklığını, giriş basıncını ve girişteki bağıl nemi kontrol ederek hücredeki su dengesini düzenleyebileceklerini açıklamışlardır. EIS (Electrochemical impedance

spectroscopy) kullanarak hücredeki su miktarını tespit etmişlerdir. Üç temel strateji izlemişlerdir. Giriş basıncını 25kPa yükselttiler ve hücrenin 25mV daha yüksek voltajda çalışmasını sağladılar. Sıcaklığı 2K yükselterek 8mV daha kazanılmasını sağlamışlardır. Giriş nemliliğine bağlı olarak da belirli bir miktar kazanmışlardır.

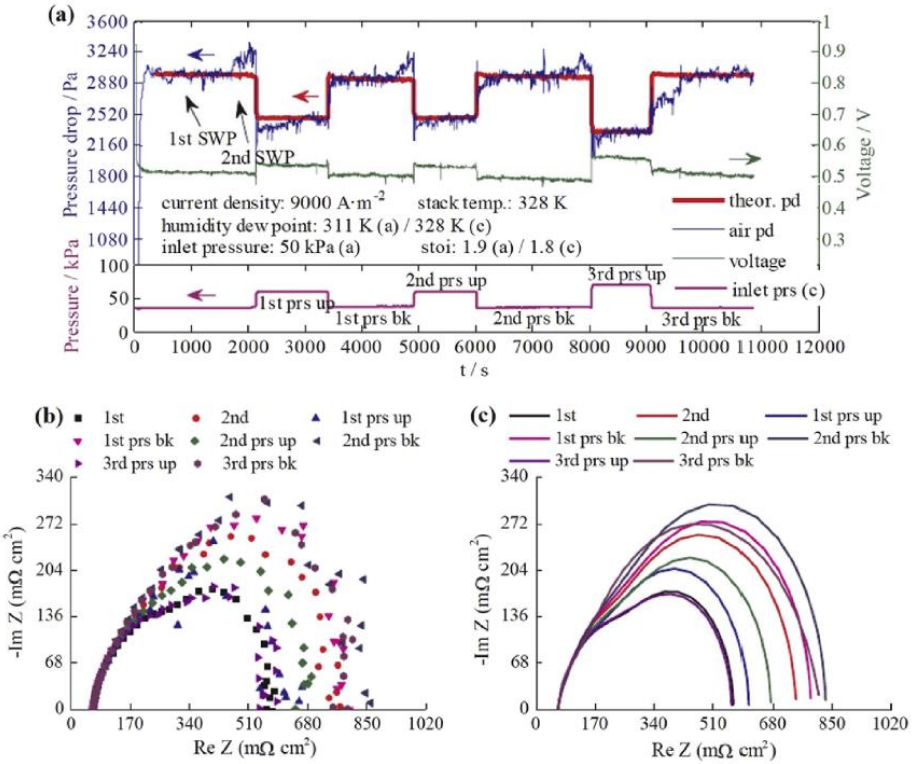
Li ve diğerleri, yaptıkları çalışmada hücrenin katot bölümünü incelemişlerdir. Öncelikle sabit basınç farkında faz miktarlarının ve voltajın dengeli olduğunu belirtip bu basınç farkını teorik olarak referans almışlardır. Sonra üç stratejiyi tek tek incelemişlerdir. İlk deneyde pilin henüz tam verimde çalışmadığı durumda (low frequency resistance- 1st SWP Çizelge 2.3'te) pilde bir su birikmesi olmadığını öne sürmüşlerdir. Pil tam çalışma durumuna geçtiğinde (high frequency resistance- 2.SWP) pil voltajı tepe noktasından düşmeye meylettiğinde pile ısı vermişlerdir. Pili ısıtarak ve soğutarak su dengesini yönetmeye ve voltajı belirli bir seviyede tutmaya çalışmışlardır.

Bu sayede pil voltajını kontrolsüz halinden daha yüksek bir değerde tutmayı başardıklarını öne sürmüşlerdir.

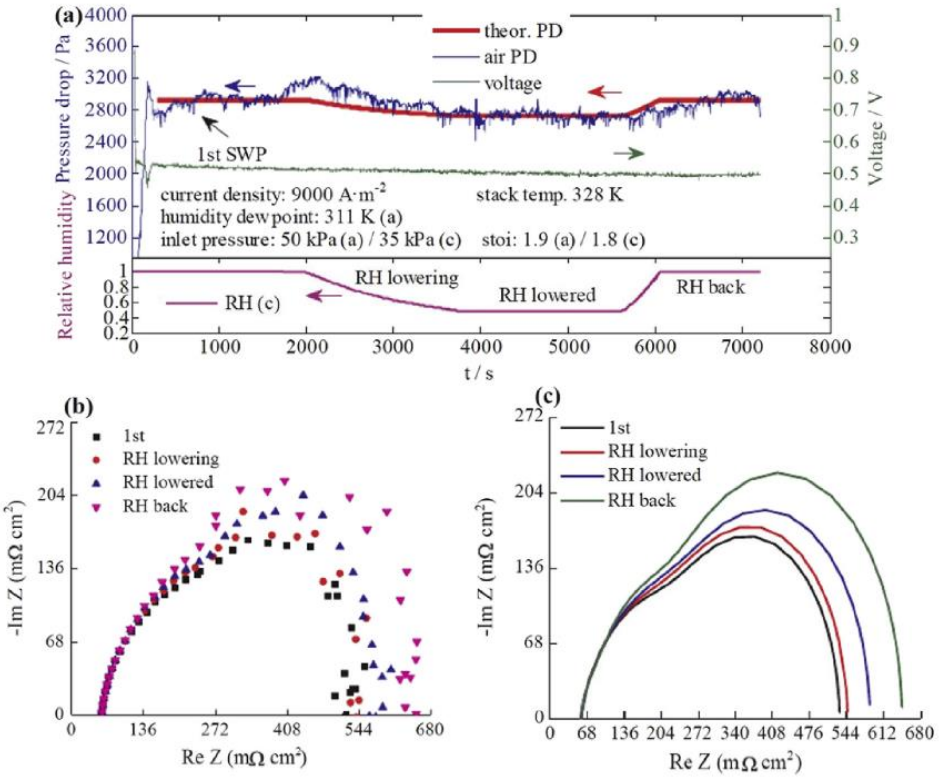


Şekil EK4.5. Sıcaklık kontrolü ile geliştirilmiş pilin kontrolsüz pille voltaj karşılaştırılması

İkinci deneyde aynı işlemi giriş basıncını anlık olarak yükselterek, üçüncü deneyde de giren oksijenli karışımın nem oranını değiştirerek yapmışlar ve böylece pil hücresini kontrol etmişlerdir.



Şekil EK4.6. Basınç düşüşü ile pil su yönetimi kontrolü a) Basıncı değiştirerek su yönetimi b) Elde edilen pil rezistans noktaları c) Elde edilen pil rezistans eğrileri



Şekil EK4.7. PEMFC hücresinin giriş bağıl nemliliği ile kontrolü a) Nemliliği değiştirerek pil kontrolü b) Elde edilen rezistans sonuçları

Bu kontrol metotları ile trend olarak voltaj düşüşü göstermeyen PEMFC davranışı elde etmeyi başarmışlardır.

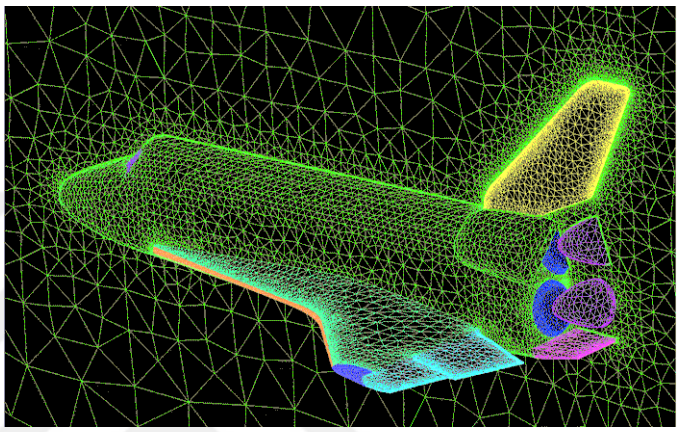
Bu stratejiler de PEMFC hücresindeki su dengesini sağlamak için kullanılabilir.

Özetle PEMFC düşük sıcaklıkta çalıştığı için su yoğunlaşıp GDL'deki reaktan transferine engel olabilir. Bu durum özellikle yüksek akımlarda gerçekleşmektedir. Ayrıca su dağılımındaki dengesizlik reaktan dağılımında da dengesizliğe sebep olarak düşük performansa sebebiyet verir.

Su yönetimi gözenekli yapıdaki elektrotlarda ve akım kanallarında incelenmelidir. Yakın zamanda su yönetimine dair bütün efor Membrane ve GDL'deki su atımına ve transferine yöneltilmiştir. Springer ve diğerleri, hem elektro ozmotik sürüklenme hem de Membrane'deki su difüzyonunu değerlendirmiş ve Membrane'den geçen suyun reaksiyon sonucu açığa çıkan suyun yanında ihmal edilebilir olduğu sonucuna varmıştır. (Springer, Zawodzinski, Wilson, & Gottesfeld, 1996)

EK 5: Zamana Bağlı Volume of Fluid Sonuçlarına Ağ Yapısı ve Diğer Faktörlerin Etkileri

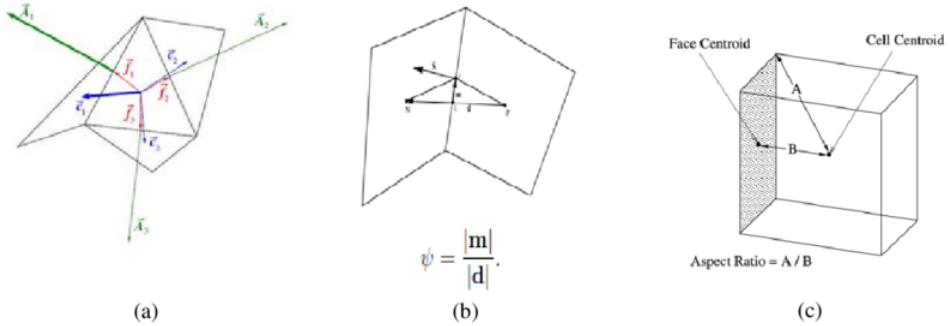
Bir analizin doğruluğunu etkileyen ilk faktör uygun ağ yapısı yapısıdır. Doğru sonuç almak ağ yapısı elemanlarının yeterli sayıda ve kalitede olması için gereklidir. Ağ yapısı elemanlarının yetersiz sayıda olması veya düşük kalitede olması, çözüm sürecinde yakınsama problemlerine ya da çözümün gerçek değerden daha farklı olmasına neden olmaktadır. Ancak ağ yapısının çok sık olması ise fazla CPU yükü demektir. Analizi gerçekleştiren kişi tarafından yapılması gereken optimum ağ yapısını kurarak yeterince doğru olan sonuca karşılanabilir süre içerisinde ulaşmaktır.



Şekil EK5.1. Bir hava aracına uygun ağ yapısı oluşturulması

Bu çalışmada farklı ağ yapısı ve çözücü ayarlarının sonuçlara etkisi karşılaştırılmıştır.

Bir ağ yapısındaki en önemli iki kalite parametresi: Orthogonal quality ve Skewness'tir. Orthogonal quality'nin mutlaka 0.1'in üzerinde olması gerekir. Skewness'ında mutlaka



Şekil EK5.2. Ağ yapısı kalite parametreleri a) Orthogonal quality b) Skewness c) Aspect Ratio

0.95'in altında olması gerekir. Bunun dışında aspect ratio ve ANSYS'in gösterdiği element quality diğer kontrol değerlerdir.

Bu kavramları açıklanacak olursa; Orthogonal quality: Ağ yapısı elemanlarının birbirlerine komşu kenar açılarının, kullanılan yapıya göre optimum olan açıya ne derece yakın olduğunu gösterir. 0 ile 1 arasındadır. Ağ yapısı kalitesi arttıkça bu sayı artar.

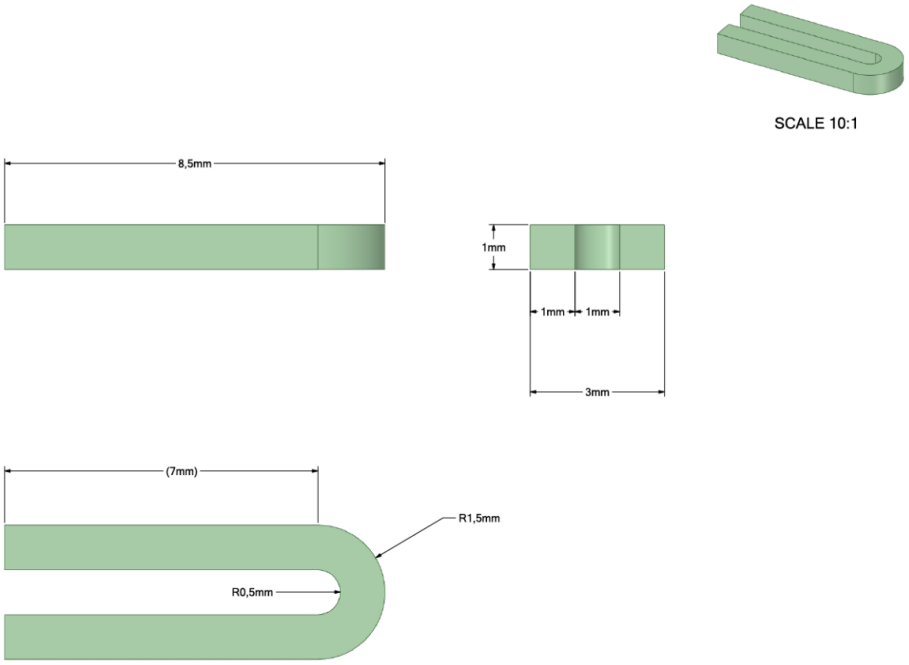
Skewness: Bir ağ yapısı elemanının kendisine eşit hacimde ve eş kenarlara sahip ideal bir ağ yapısı hücresiyle karşılaştırıldığında ne derece bir sapma gösterdiğini gösteren bir değerdir. 0 ile 1 arasındadır. Ağ yapısı kalitesi düştükçe sapma artar.

Aspect ratio: Bir ağ yapısı hücresinin ne kadar gerildiğini gösterir. Basitçe hücredeki mesafe değerlerinden birinin en büyüğünün ve en küçüğüne oranıdır. Bu mesafe değerleri hücre merkezi ile yüzey merkezleri ve/veya hücre merkezi ve hücre köşeleridir.

ANSYS Meshing element quality: Diğer değerleri harmanlayarak bir parametre verir. Genelde 0.3 üstü iyi sayılır.

Bu değerleri dikkate alarak uygun bir ağ yapısı oluşturulursa gerçeğe yakın bir sonuca ulaşılabilir. Ağ yapısı eleman sayısının hakkında yapılan bu çalışmada kullanılan geometri Şekil EK5.3'te gösterilmiştir.

Ağ yapısı oluşturmakta kullanılan birden fazla method vardır. Bu methodlardan bazıları: tetrahedronal, hexahedronal, sweep ve multizone methodlarıdır (Örn: SpaceClaim için). İsimlerinden anlaşılabileceği gibi tetrahedron seçeneğinde 4 kenardan oluşan piramit ağ yapısı elemanları oluşturulur, hexahedron seçeneğinde mümkün mertebe hexahedron elemanlar kalan bölümlere de tetrahedron ağ yapısı oluşturulur. Sweep metodunda bir source ve bir target yüzey seçilir. Bu source yüzeyde oluşturulan ağ yapısı kesit alanıyla gerdirilerek target'a doğru göre istenilen adette tekrarlanarak bir ağ yapısı oluşturulur. Multizone methodu, sweep methoduna benzer ancak yayılım seçilen targeta bağlı olmaktan ziyade otomatik ve çok yönlüdür.



Şekil EK5.3 Ağ yapısı etkisi incelemede kullanılan geometri

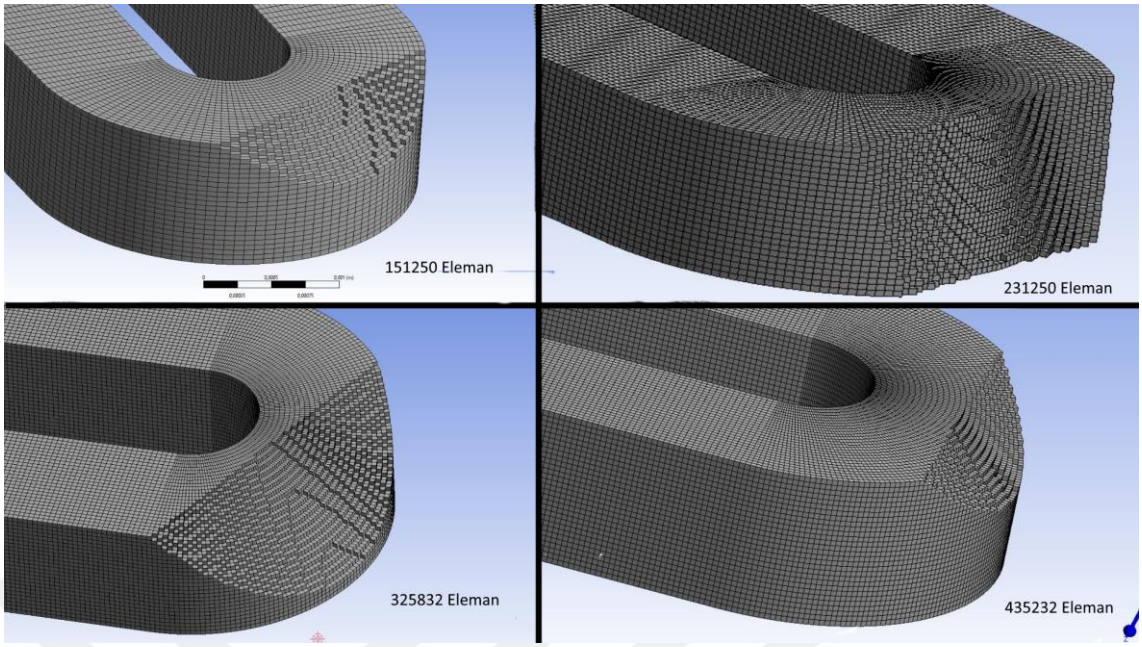
Bu çalışmada kullanılan geometri tek yönlü bir kanal geometrisi olduğundan sweep method veya multizone methodu oldukça iyi bir ağ yapısı çıkaracaktır. Bu çalışmada 1x1 mm kesit alanına sahip spaceclaim ortamında hazırlanan kanal yaklaşık 17 mm uzunluğundaki kanal geometrisinden farklı boyutlarda elemanlar ile ağ yapısı geometrileri oluşturulmuştur.

Maximum Ağ yapısı elemanı boyutu değiştirilerek 4 adet farklı eleman sayılarında sahip caseler oluşturulmuştur:

151250 eleman (164268 node)
231250 eleman (250796 node)
325832 eleman (352107 node)
435232 eleman (467190 node)

Bu oluşturulan ağ yapıları ile aynı başlangıç koşulu ve zaman adımı, yakınsama kriterlerine sahip bir CFD analizi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Ağ yapılarının büküm bölgelerindeki görünümleri Şekil EK5.4'te verilmiştir.



Şekil EK5.4. Ağ yapısı elemanlarına bağlı bükümdeki kesit alanı görünümleri

Ağ yapısı oluşturulurken seçilen eleman boyutları Çizelge EK5.1'de, kalite değerleri Çizelge EK5.2'de gösterilmiştir.

Çizelge EK5.1. Eleman sayısının eleman boyutuna göre değişimi

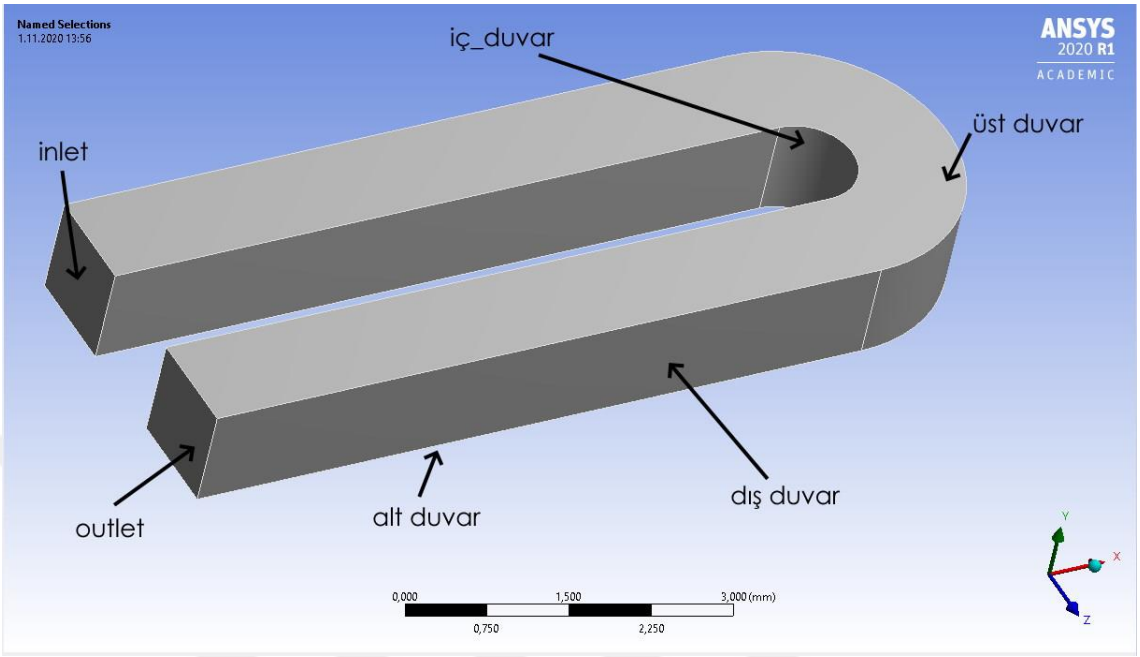
Number of Elements	Number of Nodes	Defaults: Element size	Edge Sizing: Number of Divisions	Edge: Sizing Behaviour
151250	164268	7.8E-5	25	SOFT
231250	250796	5.1E-5	25	SOFT
325832	352107	3.9E-5	25	SOFT
435232	467190	3.5E-5	25	SOFT

Çizelge EK5.2. İncelenen durumlar için kalite parametreleri

Node Sayısı	**Eleman Sayısı**	**Ortalama Element Quality**	**Ortalama Skewness**	**Ortalama Orthogonal Quality**	**Ortalama Aspect Ratio**
467190	435232	0,964	3,10E-03	0,99999	1,204
352107	325832	0,966	3,47E-03	0,99999	1,1813
250796	231250	0,952	2,70E-03	0,99999	1,3066
164268	151250	0,775	4,13E-03	0,99995	1,8102

Analizlerde bazı özel bölümlerde daha sık (ya da fine yapıda) ağ yapısı oluşturmak gerekebilir. Bu bölümler analistin -tecrübesine veya evvelki analizlerine dayanarak- kritik bulduğu, aktif bölgelerdir. ANSYS Meshing program paketi kendi başına bu bölgeleri tespit edemez. Dolayısıyla bütün elemanlar için genel bir kalite değeri verir. Bu değerler

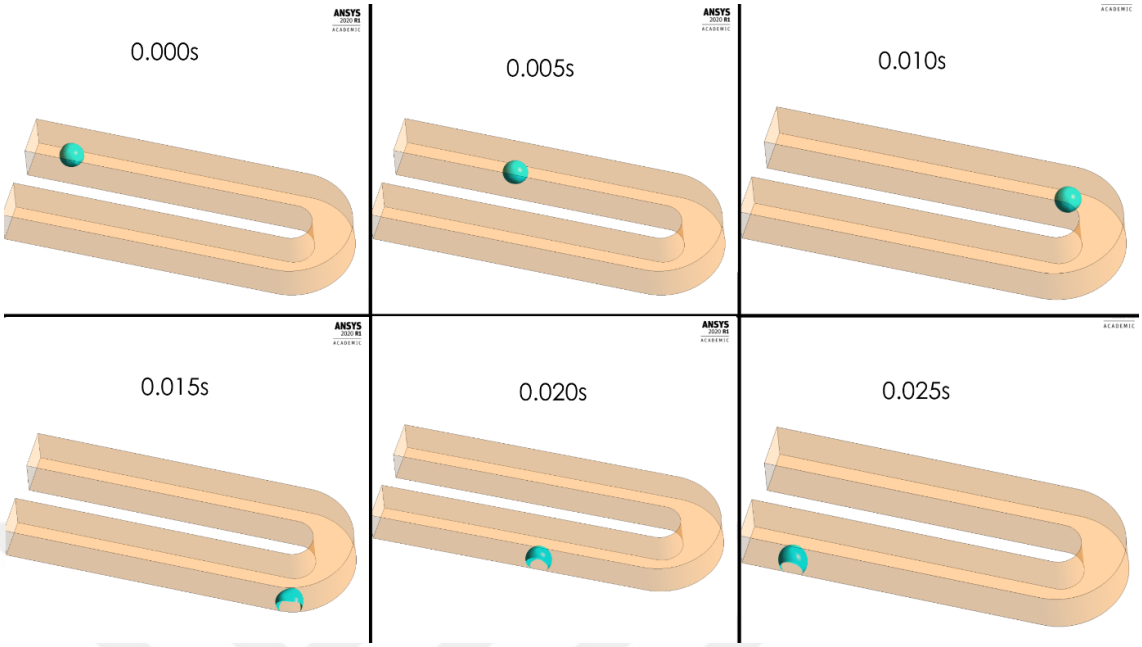
başlangıç noktası olarak kullanışlıdır ancak gerçek manada ağ yapısı kalitesini belirlemez.



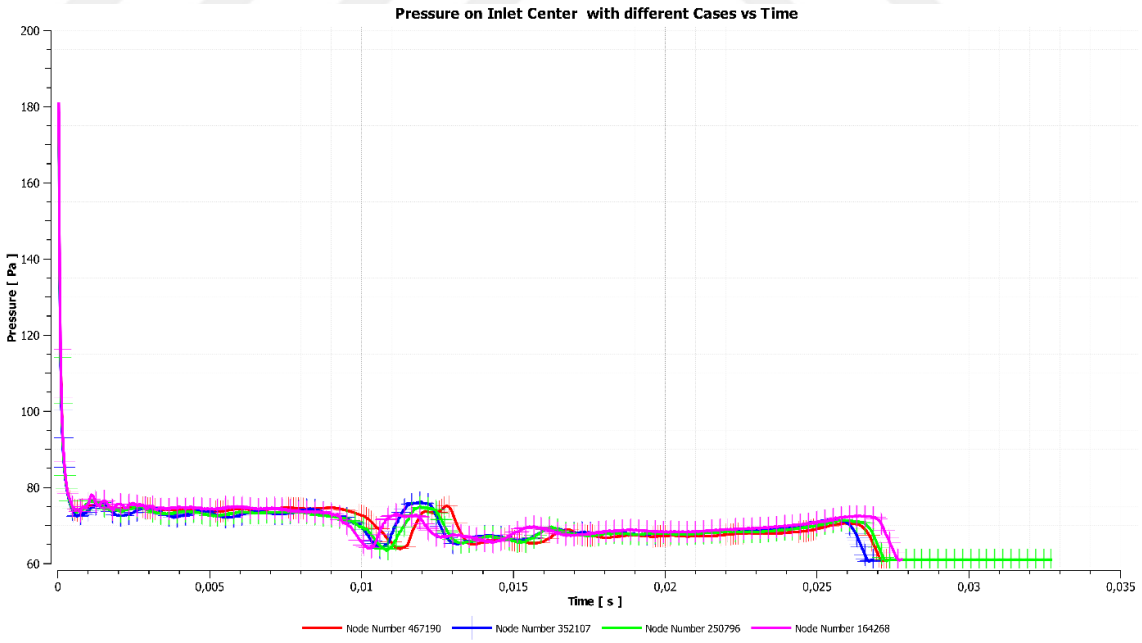
Şekil EK5.5 Geometrideki sınır tabakalarının isimlendirilmesi

Bir inlet ve bir outletten oluşan kanal geometrisi ANSYS WB Spaceclaim'de, ağ yapısı da ANSYS Meshing de oluşturulmuştur. Çözümde 0.6mm çapına sahip küresel bir su kütlesi inlet yakınlarına konumlandırılmıştır, Inleten 4m/s ile sürekli bir hava akımı sağlanmaktadır. Outlet kısmı atmosfer basıncına açılmaktadır. Bütün duvarlar su ile 140° kontak açısında modellenmiştir. Analizde Multiphase-Volume of Fluid Methodu kullanılmıştır. Methodlar: PISO Pressure – Velocity Coupling, Least Squares Cell Based Spatial Discretization, PRESTO! Pressure, Second Order Upwind Momentum Equation, Geo-Reconstruct Volume Fraction, ve First Order Implict Transient Formulation kullanılmıştır.

Simule edilen analiz görüntüsü Şekil EK5.6'da gösterilmiştir.



Şekil EK5.6. Damlacık yolu



Şekil EK5.7. Inletin ortasındaki bir noktada farklı ağ yapıları için basınç değişimi

Node Number	Time Step Size	Max Iteratıons/Time Steps	Convergence Criteria Continuity: x-velocity: y-velocity: z-velocity:	Other Convergence Conditions:Pressure on a point on Inlet Stop Criterion	Ignore Iterations Before	Use Iteratio ns	Other Convergence Conditions:Velocity on a point on Inlet Stop Criterion	Ignore Iteratıons Before	Use Iteration s	Export data every second
352107	5,00E-06	100	1,00E-05	1,00E-02	5	1	1,00E-02	0	1	3,00E-05
250796	5,00E-06	100	1,00E-05	1,00E-02	5	1	1,00E-02	0	1	3,00E-05
164268	5,00E-06	100	1,00E-05	1,00E-02	5	1	1,00E-02	0	1	3,00E-05
467190	5,00E-06	100	1,00E-05	1,00E-02	5	3	1,00E-02	0	1	8,00E-05

Şekil EK5.8. Tüm durumlar için çözücü ayarları

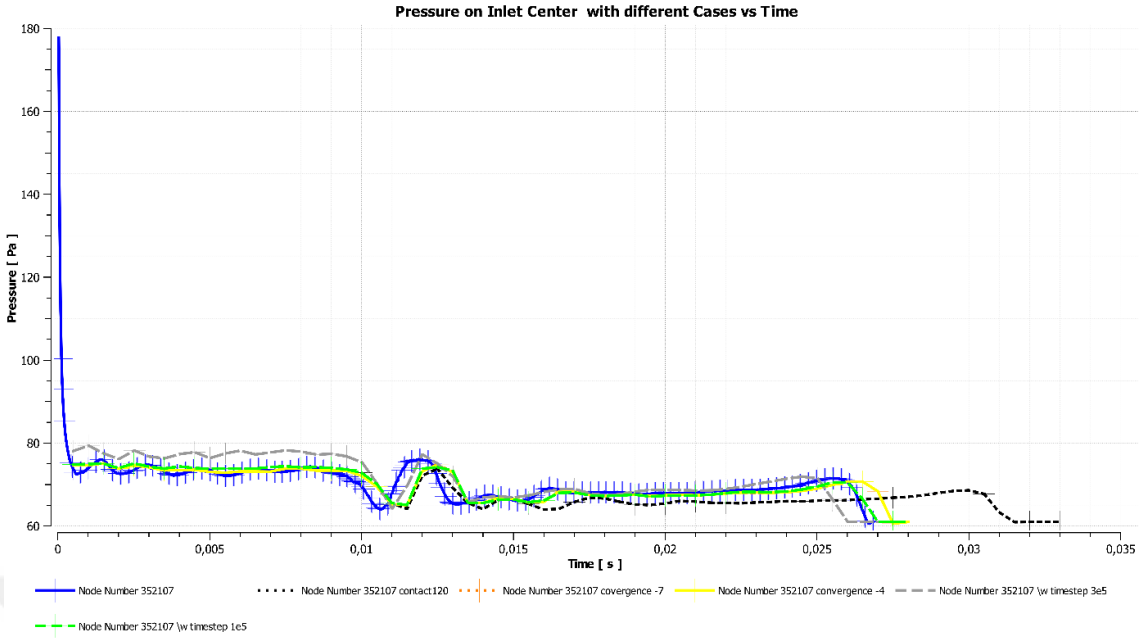
Çözüm sonucunda inletteki basınç değişimi zamana bağlı olarak Şekil EK5.7'de verilmiştir. Sonuçlarda basınç değeri bakımından %5 in altında bir sapma gözükmektedir. Ancak zaman bakımından sapma daha fazladır.

Sonuçlara etki edebilecek diğer etkenler de incelenmek istenmiş bunun için 350bin elemanlı ağ yapısında farklı çözücü ayarlarıyla bazı çalışmalar yapılmıştır.

Çizelge EK5.3'te çözüm koşulları verilmiştir. Zaman adımının, yakınsama kriterlerinin etkileri gözlemlenmiştir. Ayrıca kontak açısının değişik olduğu bir durum eklenmiştir. Şekil EK5.9'da elde edilen inlet basıncı-zaman grafiği verilmiştir.

Çizelge EK5.3. Aynı eleman sayılı ağ yapısından farklı çözücü ayarları ile analiz gerçekleştirilmesi

Tablo Tagi	Time Step Size	Max Iterations/Time Steps	Convergence Criteria Contuniuty: x-velocity: y-velocity: z-velocity:	Other Convergence Conditions:Pressure on a point on Inlet	Ignore Iterations Before	Use Iterations	Other Convergence Conditions:Velocity on a point on Inlet Stop Criterion	Ignore Iteratıons Before	Use Iterations	Export data every second
Node Number 352107	5,00E-06	1,00E+02	1,00E-05	1,00E-02	5,00E+00	1,00E+00	1,00E-02	0,00E+00	1,00E+00	3,00E-05
Node Number 352107 \w timestep 1e-5	1,00E-05	1,00E+02	1,00E-05	1,00E-02	5,00E+00	1,00E+00	1,00E-02	0,00E+00	1,00E+00	5,00E-04
Node Number 352107 \w timestep 3e-5	3,00E-05	2,00E+02	1,00E-05	1,00E-02	5,00E+00	1,00E+00	1,00E-02	0,00E+00	1,00E+00	5,00E-04
Node Number 352107 convergence -7	5,00E-06	3,00E+02	1,00E-07	1,00E-03	0,00E+00	1,00E+00	1,00E-02	0,00E+00	1,00E+00	5,00E-04
Node Number 352107 convergence -4	5,00E-06	3,00E+02	1,00E-04	1,00E-02	0,00E+00	1,00E+00	1,00E-02	0,00E+00	1,00E+00	5,00E-04
Node Number 352107 contact120	1,00E-05	3,00E+02	1,00E-07	1,00E-03	0,00E+00	1,00E+00	1,00E-02	0,00E+00	1,00E+00	5,00E-04



Şekil EK5.9. Aynı eleman sayılı ağ yapısının farklı çözücü ayarları ile verdiği sonuçlar

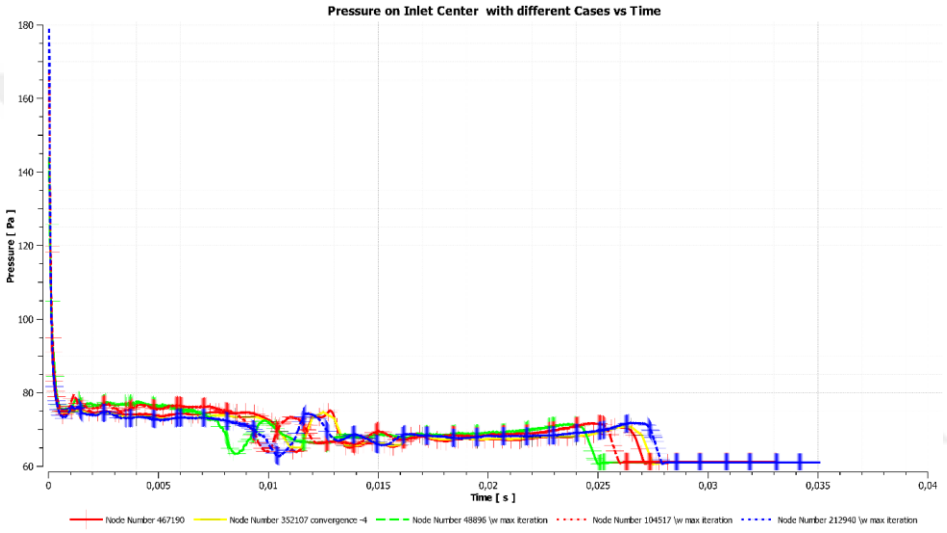
Şekil EK5.9. Aynı eleman sayılı ağ yapısının farklı çözücü ayarları ile verdiği sonuçlar'da inlet basıncının zaman bağlı incelendiği durumlar, varsayılan durum, zaman adımının 1E-5s olduğu durum, zaman adımının 1E-3s olduğu durum, residual yakınsama kriterlerinin 1E-7 olduğu durum, residual yakınsama değerlerinin 1E-4 olduğu durum ve kontak açısının 140 yerine 120 olduğu bir durum incelenmiştir.

Yakınsama kriteri çözüme bir etki göstermemiştir, sarı ve turuncu eğrilerin tam olarak üst üste oturmuştur. Bunun dışında zaman adımının, değişmesi grafiklerde değişikliklere yol açmıştır. Bu sonuçların gerçek bir başlangıç-sınır tabaka değişikliğinde oluşacak bir grafikte ile farkı incelenmek amacıyla tüm duvarlarda 140° kontak açısı olan bir koşul eklenmiştir. Bu eğri beklenildiği üzere diğer eğrilerden oldukça ayrılmıştır.

Benzer şekilde yalnız eleman sayılarının değiştiği, iterasyon ve yakınsama dereceleri yüksek olan Çizelge EK5.4'te verilen beş analizin incelenmesi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge EK5.4 Ağ yapısı eleman sayısına bağlı sonuç değişimi incelemesi: Çözücü ayarları

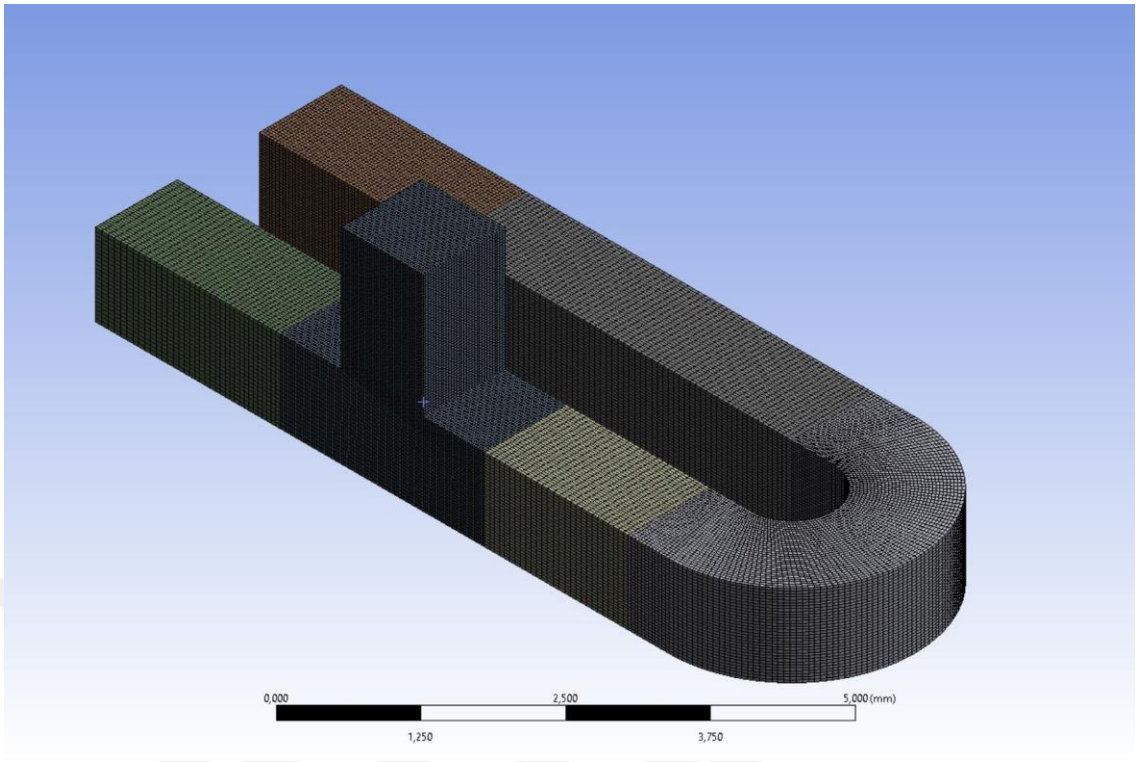
Tablo Tagi	Time Step Size	Max Iterations/Time Steps	Convergence Criteria Contuniuty: x-velocity: y-velocity: z-velocity	Other Convergence Conditions:Pressure on a point on Inlet	Ignore Iterations Before	Use Iterations	Other Convergence Conditions:Velocity on a point on Inlet Stop Criterion	Ignore Iteratıons Before	Use Iterations	Export data every second
Node Number 467190	0,000005	100	0,00001	0,01	5	3	0,01	0	1	0,00008
Node Number 352107 \w timestep 1e-5	0,00001	100	0,00001	0,01	5	1	0,01	0	1	0,0005
Node Number 212940-w\ Max Iteration	0,00001	10000	0,000001	0,00001	0	1	0,00001	0	1	0,00003
Node Number 104517 -w\ Max Iteration	0,00001	10000	0,000001	0,00001	0	1	0,00001	0	1	0,00003
Node Number 48896-w\ Max Iteration	0,00001	10000	0,000001	0,00001	0	1	0,00001	0	1	0,00003



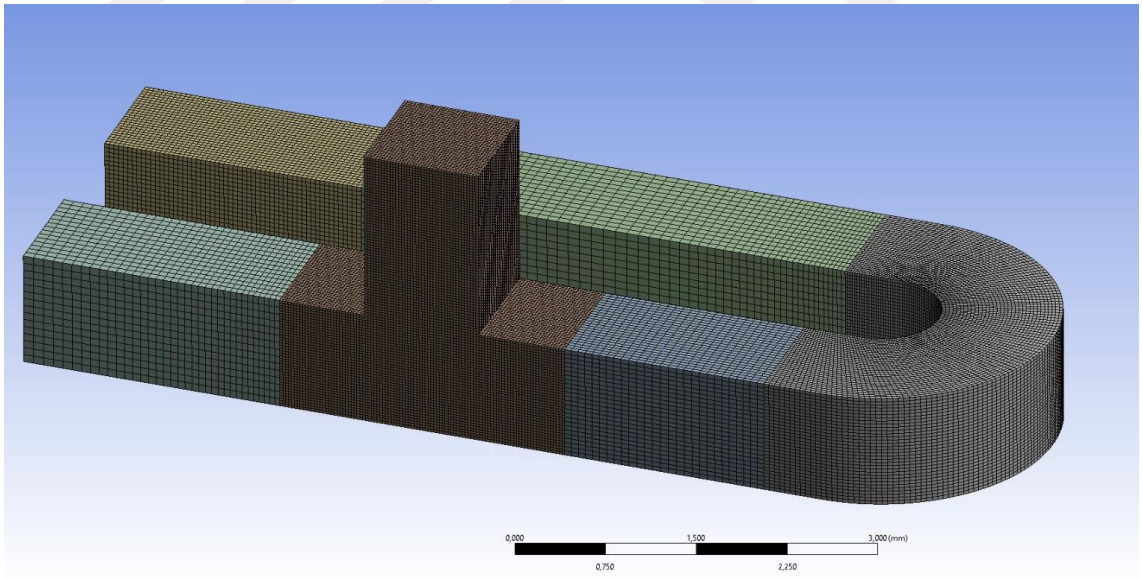
Şekil EK5.10 Farklı ağ yapısı eleman sayısındaki sonuçların incelenmesi

En doğru sonuca en yüksek sayıda elemanlı ağ yapısı ile ulaşıldığı varsayıldığında, yani kırmızı çizgi (467190) ideal değere en yakın eğri kabul edildiğinde, buna en yakın eğri sarı (352107 eleman) ardından kesik çizgili mavi (212940 eleman) hemen ardından kesik çizgili kırmızı (104517 eleman) en son da yeşil eğri (48896 eleman) gelmektedir. Eğrilerin hepsinde zamansal fark (grafikteki yatay doğru üzerinde kayma) gözükmektedir.

Son olarak ağ yapısında eleman sayısının yanında ağ yapısının etkilerinin de incelenmesi için başka bir geometri benzer eleman sayılarında iki farklı ağ yapısı incelenmiştir.



Şekil EK5.11 Ağ yapısı A: Shared Topology 490974 node sayılı ağ yapısı



Şekil EK5.12 Ağ yapısı B: Non-shared Topology 497813 node sayılı ağ

Şekil EK5.11ve Şekil EK5.12'de görülen iki ağ çok yakın sayıda elemanlara sahiptir. Her iki ağ yapısında da geometri niteliklere göre bölünmüştür. Her iki ağ yapısında da aynı geometri kullanılmıştır. Bu geometri bir inlet ve iki outletten oluşmaktadır. Su damlacığının hareketini incelemede büküm bölümü ve birinci outlet kritik bölgelerdir.

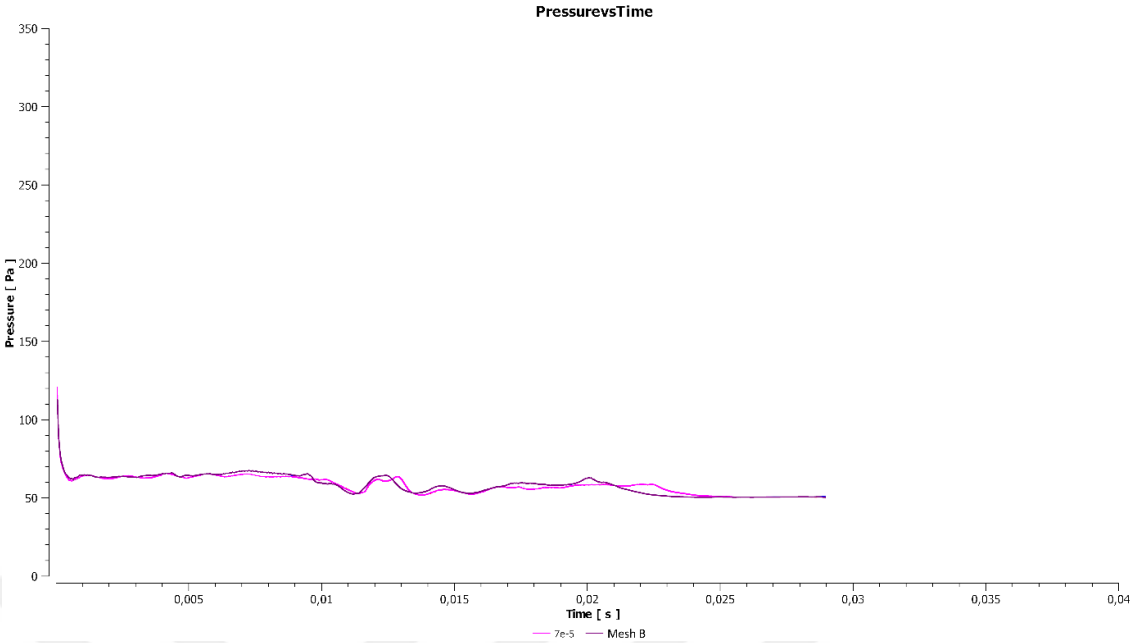
Bunun nedeni bu bölgelerde su damlacığının büküm geometrisi veya akışın iki outlete bölünmesi sebepleriyle deformasyona uğrayacak olmasıdır. Her iki geometride de büküm ve outlet çevresi bölgelerde sık ağ kullanılmıştır.

İki ağ yapısı arasındaki fark ise ağ yapısı A'da bölümler arasındaki geçişlerde ortak nodlar kullanılmışken yani kesit alanları sweep geometrisi boyunca aynı iken, Ağ yapısı B de her bölüm kendi içinde ayrı ağ yapılarına bölünmüş, geçişler de kontak bölgeleri olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge EK5.5 Ağ yapısı A ve Ağ yapısı B kalite değerleri

Node sayısı	Averaged Element Quality	Averaged Aspect Ratio	Averaged Orthogonal Quality	Averaged Skewness
497813	0,97	1,12	0,99	0,03
490974	0,87	1,53	0,99	0,04

Ağ yapısı B 'de parçalar kendi içerisinde node'lara bölündüğü için Ağ yapısı B daha iyi bir aspect ratioya sahiptir. Dolayısıyla Ağ yapısı B'nin genel kalitesi daha iyidir. Ancak Ağ yapısı A'da 'shared topology' metodu kullanıldığı için kontak alanlarında ağ yapısı kaymamıştır. Her iki ağ yapısında da inlete yakın bir bölümde başlangıç hızı sıfır bir su damlacığı oluşturulmuştur. Inlet kısmından 4 m/s hava akışı sağlanırken outletlerin her ikisi de atmosfer basıncına açılmaktadır. Her iki ağ yapısı için de sınır koşulları ve çözücü ayarları tamamen aynıdır. Bu işlemlerin sonuçlarında inlete yakın bir noktadaki basınç değişim grafikleri Şekil EK5.13'te verilmiştir.



Şekil EK5.13 Ağ yapısı A ve Ağ yapısı B karşılaştırılması

Her iki ağ yapısında kabul edilebilir ölçüde örtüşür sonuçlar vermiştir.

Özetlemek gerekirse bir hesaplamalı analizin sonucunu en çok etkileyen faktörler:

- Eleman sayısı
- Ağ yapısı
- Zaman Adımının boyutu

dir.

Bu faktörler sonuçlarda değer doğrusunda genelde az zaman eğrisinde ise daha fazla bir sapmaya yol açmaktadır.ANSYS Fluentin ücretsiz akademik versiyonu en fazla 512bin eleman (veya nod) sayısına izin vermektedir. Öte yandan Ağ yapısı eleman sayısı- Zaman adımı – Yakınsama Kriteri ve (Her eğer her adımda yakınsama kriteri sağlanamıyorsa) maksimum iterasyon sayısı çözüm süresini etkilemektedir.

Yapılan analizlerin süresi damlacığın davranışına göre 8çekirdekli işlemciye sahip bir kişisel bilgisayarda düşük eleman, hafif yakınsama koşulları, uzun zaman adımları için 6 saatten kısa sürerken, daha yoğun ağ yapısı ve ağır yakınsama koşulları ve kısa zaman adımlarında 1 haftaya kadar çıkabilmektedir. Buna rağmen yüksek detaylı yapılan

analizler de ağ yapısına bağlı olarak birebir aynı olmayan sonuçlar vermektedir. Aynı analiz tekrarlandığında farklı sonuçlar da verebilmektedir.

Bir analizin ideal sonuçtan farklı olmasının bazı sebepleri şunlardır:

- Yetersiz eleman sayısı
- Yakınsama kriterlerinin fazla hafif olması
- Yetersiz iterasyon sayısı (yakınsama kriteri sağlanamıyorsa)
- Zaman adımının fazla büyük olması
- Ağ yapısının mükemmel olmaması
- İnsan hatası faktörü
- Analizin başındaki bir sapmanın analiz sonuna kadar birikmesi (kartopu etkisi)
- Kontrol kriterlerinin ideal olmaması
- Kullanılan çözüm metodunun ideal olmaması

  Bir analizin gerektiğinden fazla uzun sürmesinin bazı sebepleri ise şunlardır:
- Çok fazla nod
- Yakınsama kriterlerinin fazla ağır olması
- Maksimum iterasyon sayısının fazla olması*(Yakınsama kriteri sağlanamıyorsa)
- Zaman adımının çok küçük olması
- Kontrol bölümündeki katsayılarının çok küçük olması

Nod sayısı arttıkça analiz süresi üstel olarak artmaktadır. Yakınsama kriteri de analiz süresini etkilemektedir. Residual eğrileri zaman adımı içerisinde yakınsama kriterine -bir seviyeden sonra- yaklaşamayabilir. Bu da yaklaşma hareketi durduktan sonraki iterasyonlar boşuna yapılmış demektir.

Yapılan bu çalışma sonucunda görülmüştür ki, tamamen aynı başlangıç ve sınır koşullarındaki analizler dahi farklı sonuçlar verebilmektedir. Bu genel dağılımdan uzak eğrileri veriye katmayarak ve elde edilecek sonuçlarda karşılaştırma yaparken buradaki hata payını dikkate almak ve gerekirse analizleri tekrarlamak önemlidir.