

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİLİ VE MİKRO BOYUTLU KANALLARDA İKİ FAZLI SIVI KATI AKIŞI
VE MANYETİK TANECİKLERİN AKIŞTAN AYRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Sevilay GÜRBÜZ**

Anabilim Dalı : Makina Mühendisliği

Programı : Isı Akışkan

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. İ. Yalçın URALCAN

MAYIS 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİLİ VE MİKRO BOYUTLU KANALLARDA İKİ FAZLI SIVI KATI AKIŞI
VE MANYETİK TANECİKLERİN AKIŞTAN AYRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Sevilay GÜRBÜZ
(503071116)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Nisan 2011
Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Mayıs 2011**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. İ. Yalçın URALCAN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prf. Dr. İsmail TEKE (YTÜ)
Prf. Dr. Hasan Güneş (İTÜ)**

MAYIS 2011

ÖNSÖZ

Bilim, zor ve sabır isteyen bir uğraş olsa da cezbediciliği yadsınamayacak kadar kuvvetlidir. Birey bu uğurda çıktığı yolda desteklerle daha verimli işler ortaya çıkarır.

Tez konumun belirlenmesi ve yürütülmesinde desteğini esirgemeyen danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. İ. Yalçın Uralcan'a teşekkürü borç bilirim.

İki yıllık yüksek lisans eğitimim boyunca 2210 yurt içi yüksek lisans burs programı dahilinde maddi destek sağlayan TÜBİTAK ailesine teşekkür ederim.

Deneyisel düzeneğin hazırlanmasında teknik desteklerinin yanında manevi desteklerini de esirgemeyen ısı tekniği laboratuvarı teknisyenleri Niyazi Güven, Mehmet Kumcu ve Kazım Can'a teşekkür ederim.

Kütüphane kaynaklarından verimli şekilde yararlanmamı sağlayan kütüphane çalışanlarına, teknik bilgi paylaşımında yardımlarını esirgemeyen; Hollanda'da matematik ve fizik alanındaki araştırma merkezlerinden CWI üyesi olan Sayın Willem Haverkort'a, İstanbul Teknik Üniversitesi Fizik Mühendisliği öğretim üyesi Sayın Yrd. Doç. Dr. Baki Altunçevahir'e, tasarlanan kanalların işlenmesinde yardımcı olan malzeme bölümü araştırma görevlileri Ali Taner Kuzu ve Umut Karagüzel'e, sayısal çözümlemelerde yardımcı olan Buğra Şelenbaş'a, desteklerini esirgemeyen yurttaki oda arkadaşlarıma, bu süreç içerisinde çalışma ortamını paylaşma hoşgörüsünde bulunan Ar. Gör. Esra Ünver'e teşekkürü borç bilirim. En büyük destekçim aileme desteklerinden dolayı minnettarım.

Nisan 2011

Sevilay Gürbüz
(Makina Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY.....	xix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1 Tanecik Ayırma Yöntemleri	3
2.1.1 Manyetik kuvvet ile tanecik ayırma yöntemi.....	7
2.2 Konunun Fiziksel ve Matematik Temelleri	12
2.2.1 Manyetizma.....	12
2.2.2 Manyetik maddelerin sınıflandırılması.....	15
2.2.3 Miknatısın oluşturduğu manyetik alan	16
3. MATEMATİK MODEL VE SAYISAL ÇÖZÜMLEME	19
3.1 Matematik Model	19
3.1.1 Kanal şeklinin belirlenmesi.....	19
3.1.2 Tanecikli akışın modellenmesi.....	22
3.1.3 Tanecikli akışta manyetik alanın modellenmesi	29
3.2 Sayısal Çözümleme	31
3.2.1 Ağ yapısı ve kanalda sıvı akışının incelenmesi.....	31
3.2.2 Kanal içerisine tanecik beslenmesi.....	32
4. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	37
5. SONUÇLAR.....	41
5.1 Sayısal Çözümleme ve Sonuçları.....	41
5.1.1 Kanal geometrisinin belirlenmesi.....	41
5.1.2 Belirlenen kanallar içinde sıvı akışı	51
5.1.3 Belirlenen kanallar içinde tanecikli akış	61
5.1.3.1 Kanal 111’de yapılan tanecikli akış çalışması	61
5.1.3.2 Kanal 121’de yapılan tanecikli akış çalışması	64
5.1.3.3 Kanal 141’de yapılan tanecikli akış çalışması	66
5.1.3.4 Kanal 114’de yapılan tanecikli akış çalışması	71
5.2 Deneysel Çalışma ve Sonuçları.....	98
5.2.1 Belirlenen kanallarda tanecik-su akışı	98
5.2.1.1 Kanal 141’de tanecik-su akışı	98
5.2.1.2 Kanal 114’de tanecik-su akışı	100
5.2.2 Belirlenen kanallarda manyetik alan etkisiyle tanecik ayırma.....	101
5.2.2.1 Kanal 141’de manyetik alan etkisiyle tanecik ayırma çalışmaları	101
5.2.2.2 Kanal 114’de yapılan manyetik alan etkisiyle tanecik ayırma çalışmaları	108

6. DEĞERLENDİRME	111
KAYNAKLAR.....	113
EKLER	117
ÖZGEÇMİŞ.....	129

KISALTMALAR

DPM	: Ayrık faz modeli (<i>Discrete Phase Model</i>)
UDF	: Kullanıcı tanımlı fonksiyon (<i>User Defined Function</i>)
μTAS	: Birçok analiz işlemini bir araya toplayan mikro boyutlu sistemler (<i>micro total analysis systems</i>)
VOF	: Akışkan hacmi modeli (<i>Volume of Fluid</i>)
MDT	: Manyetik yolla ilacın hedeflenen noktaya ulaştırılması (<i>Magnetic Drug Targeting</i>)
SIMPLE	: Yarı kapalı model (<i>Semi-Implicit Method</i>)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Manyetizmada kullanılan kavramlar ve birimleri (Furlani, 2001).	14
Çizelge 3.1 : Giriş hızı ile Re sayısının değişimi.	20
Çizelge 3.2 : Çalışmada kullanılan parametreler ve değerleri.	29
Çizelge 3.3 : r-n parametrelerine bağlı mıknatıs konumu.	30
Çizelge 4.1 : Deney düzeneği bileşenleri.	38
Çizelge 5.1 : Şekil 5.11'de verilen x, y, z değişkenlerine karşılık gelen kanal numaraları.	52
Çizelge 5.2 : Her bir kanal için elde edilen xc'ye yönelim yüzdeleri.	53
Çizelge 5.3 : 111 kanalında 1 mm/s giriş hızı için tanecikli akış sonundaki debiler. 61	
Çizelge 5.4 : 111 kanalında 1 mm/s giriş hızı için tanecikli akış sonunda elde edilen xc'yi tercih eden taneciklere ait özellikler.	62
Çizelge 5.5: 111 kanalında 1 mm/s giriş hızı için tanecikli akış sonunda elde edilen c'yi tercih eden taneciklere ait özellikler.	63
Çizelge 5.6 : 121 kanalında 10 mm/s giriş hızı için tanecikli akış sonunda elde edilen suya ait kütleli debi miktarları.	64
Çizelge 5.7 : 121 kanalında 10 mm/s giriş hızı için tanecikli akış sonunda elde edilen xc'yi tercih eden taneciklere ait özellikler.	65
Çizelge 5.8 : 121 kanalında 10 mm/s giriş hızı için tanecikli akış sonunda elde edilen c'yi tercih eden taneciklere ait özellikler.	66
Çizelge 5.9 : 141 kanalında 1 mm/s giriş hızı için tanecikli akış sonunda elde edilen suya ait kütleli debi miktarları.	67
Çizelge 5.10 : 141 kanalında 1 mm/s giriş hızı için tanecik beslendikten 112 sn sonra her bir çıkıştan çıkan tanecik miktarları.	68
Çizelge 5.11 : 141 kanalında 5 mm/s giriş hızı için tanecikli akış sonunda elde edilen suya ait kütleli debi miktarları.	68
Çizelge 5.12 : 141 kanalında 5 mm/s giriş hızı için tanecik beslendikten 23 sn sonunda her bir çıkıştan çıkan tanecik miktarları.	68
Çizelge 5.13 : 141 kanalında 10 mm/s giriş hızı için tanecikli akış sonunda elde edilen suya ait kütleli debi miktarları.	70
Çizelge 5.14 : 141 kanalında 10 mm/s giriş hızı için tanecik beslendikten 13 sn sonra her bir çıkıştan çıkan tanecik miktarları.	71
Çizelge 5.15 : 114 kanalında 1 mm/s giriş hızı için tanecikli akış sonunda elde edilen suya ait kütleli debi miktarları.	71
Çizelge 5.16 : 114 kanalında 1 mm/s giriş hızı için tanecik beslendikten 93.2 sn sonunda her bir çıkıştan çıkan tanecik miktarları.	72
Çizelge 5.17 : 114 kanalında 5 mm/s giriş hızı için tanecikli akış sonunda elde edilen suya ait kütleli debi miktarları.	72
Çizelge 5.18: 114 kanalında 5 mm/s giriş hızı için tanecik beslendikten 19.22 sn sonunda her bir çıkıştan çıkan tanecik miktarları.	73
Çizelge 5.19 : 114 kanalında 10 mm/s giriş hızı için tanecikli akış sonunda elde edilen suya ait kütleli debi miktarları.	73

Çizelge 5.20 :	114 kanalında 10 mm/s giriş hızı için tanecik beslendikten 10 sn sonra her bir çıkıştan çıkan tanecik miktarları.....	75
Çizelge 5.21 :	10mm*35mm*10mm ölçülerindeki NdFeB mıknatısının oluşturduğu manyetik alanın deneysel ve teorik sonuçları.....	77
Çizelge 5.22 :	141 kanalına 1 mm/s hız ile giren tanecik-su asıltısına r30n55 konumunda bulunan mıknatısın etkisi sonucunda elde edilen suya ait kütleli debi miktarları.....	90
Çizelge 5.23 :	r30n55 konumundaki mıknatısın oluşturduğu manyetik alan altındaki tanecikli akışta 120 s sonunda elde edilen çıkışlardaki tanecik miktarları.....	90
Çizelge 5.24 :	141 kanalına 1 mm/s hız ile giren asıltı içindeki taneciklerin r40n50 konumundaki mıknatıs ile yönlendirilmeleri sonucunda çıkışlara yönelen suya ait kütleli debi miktarları.....	91
Çizelge 5.25 :	141 kanalında 1 mm/s giriş hızı ve r40n50 mıknatıs konumu için tanecikli akışta 114 s sonunda elde edilen suya ait kütleli debi miktarları.....	92
Çizelge 5.26 :	114 kanalında 1 mm/s giriş hızı için tanecikli akış sonunda elde edilen suya ait kütleli debi miktarları.....	94
Çizelge 5.27 :	r30n40 konumundaki mıknatısın oluşturduğu manyetik alan etkisi altındaki 114 kanalına 1 mm/s hız ile giren asıltı içindeki tanecik beslendikten 95 sn sonunda her bir çıkıştan çıkan tanecik miktarları.....	95
Çizelge 5.28 :	114 kanalında 5 mm/s hız için tanecikli akış sonunda elde edilen suya ait kütleli debi miktarları.....	95
Çizelge 5.29 :	114 kanalında 5 mm/s giriş hızı için tanecik beslendikten 12.41 sn sonunda her bir çıkıştan çıkan tanecik miktarları.....	96
Çizelge 5.30 :	114 kanalında 10 mm/s giriş hızı için manyetik etki altındaki tanecikli akış sonunda asıltıdaki suya ait kütleli debi miktarları.....	96
Çizelge 5.31 :	114 kanalında 10 mm/s giriş hızında tanecik beslendikten 10 sn sonra her bir çıkıştan çıkan tanecik miktarları.....	97
Çizelge 5.32 :	141 kanalında manyetik etki olmadığında deneysel çözümleme sonucunda 13 mm/s giriş hızı için bir dakika sonunda her bir çıkıştan çıkan asıltı miktarları.....	99
Çizelge 5.33 :	141 kanalında manyetik etki olmadığında deneysel çözümleme sonucunda 1.79 mm/s giriş hızı için bir dakika sonunda her bir çıkıştan çıkan asıltı miktarları.....	100
Çizelge 5.34 :	114 kanalında manyetik etki olmadığında deneysel çözümleme sonucunda 7 mm/s giriş hızında her bir çıkıştan bir dakika sonunda çıkan miktarlar.....	100
Çizelge B.1 :	Deneysel modellemede kullanılan ölçüm ve diğer aletler.....	119

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Simetrik olmayan sıkıştırılmış akış ayrılması modeli (Takagi ve diğ., 2005).....	3
Şekil 2.2 : Hidrodinamik eleme modeli (Yamada ve Seki, 2005).	4
Şekil 2.3 : Setler etrafındaki akıştan yararlanarak tanecik ayırma yöntemi (Huang ve diğ., 2004).	5
Şekil 2.4 : Dönüştürücü tarafından oluşturulan ses dalgası sonucu taneciklerin birbirinden ayrılması (Pamme, 2007).	6
Şekil 2.5 : Yığınlaştırma yöntemi yardımıyla manyetik olan ve olmayan taneciklerin birbirinden ayrılması.....	8
Şekil 2.6 : Manyetik taneciklerin hedef hücreyi yakalaması ve dış manyetik etki ile yönlendirilmeleri.	9
Şekil 2.7 : Bir mıknatısın oluşturduğu manyetik dipol ve manyetik alan şiddeti (H) eğrilerinin gösterimi (Furlani, 2001).....	16
Şekil 2.8 : Bir çubuk mıknatısın (a) H çizgileri. (b) B çizgileri (c) H_d , M, B' nin mıknatısın içerisindeki yönelimleri (Furlani, 2001).....	17
Şekil 2.9 : (a)Dikdörtgenler prizması şeklindeki mıknatısın kutupları. (b) B_x, B_y, B_z ve M' in yönelimlerinin gösterimi.....	17
Şekil 3.1 : Tanecikler arası konumlanma(Crowe ve diğ., 1998).....	28
Şekil 3.2 : Kanal ve mıknatısın yerleşimi: (a) Üstten görünüş. (b)İzometrik görünüş.....	29
Şekil 3.3 : Modellemede kullanılan kanalın üstten görünüşü.....	30
Şekil 3.4 : Modellemede kullanılan kanalın ağ yapısı.....	31
Şekil 3.5 : DPM penceresi.....	33
Şekil 3.6 : DPM penceresinde Physical Models seçeneği.....	34
Şekil 4.1 : Deneysel modelleme sonucunda hazırlanan düzenek.....	37
Şekil 5.1 : Tasarlanan ilk kanal ve tanecik davranışı (a)Manyetik etki yok. (b)Manyetik etki var.....	41
Şekil 5.2 : $f=3\text{mm}$ için farklı e değerlerine karşılık gelen akım fonksiyonu konturleri-hız vektörleri (a) $e=1.5\text{ mm}$. (b) $e=7.5\text{ mm}$	43
Şekil 5.3 : Girdap etkisinin azaltılması ve 1 çıkışı tercih eden asıltı miktarını arttırmak için düşünülen kanallarda sayısal çözümler sonucunda elde edilen suya ait akım fonksiyonu konturleri-hız vektörleri (a) $e=7.5\text{ mm}$, $f=6\text{ mm}$ (b) $e=7.5\text{ mm}$, $f=6\text{ mm}$ ve rampa keskin köşesine yuvarlatma biçimi verilmesi.....	44
Şekil 5.4 : $e=15\text{ mm}$, $f=1.5\text{ mm}$ uzunluklarına sahip kanalda yapılan sayısal çözümleme sonucunda suya ait akım fonksiyonu konturleri-hız vektörleri.....	45
Şekil 5.5 : Çıkışlar arasındaki ayırım yüzde farkını arttırmak amaçlı rampa üst köşesindeki dar kesitin g kadar uzatılması.....	45

Şekil 5.6 :	$e=15$ mm için farklı g ve f değerlerinde elde edilen akım fonksiyonu konturleri-hız vektörleri (a) $g=3$ mm, $f=3$ mm (b) $g=3$ mm, $f=6$ mm (c) $g=6$ mm, $f=3$ mm (d) $g=6$ mm, $f=6$ mm.....	46
Şekil 5.7 :	Kanal çıkış biçimleri ve f 'nin değişiminin ayırmaya etkisi; akım fonksiyonu konturleri - hız vektörleri (a)1 çıkışının düzleştirilmesi ve $f=3$ mm (b)1 çıkışının düzleştirilmesi ve $f=6$ mm (c)her iki çıkış kanal biçiminin değiştirilmesi ve $f=6$ mm.....	48
Şekil 5.8 :	2 çıkışının düşeyde f ile aynı konuma yerleştirilmesi sonucu kanalda oluşan basınç değişimi.....	48
Şekil 5.9 :	Sıvının 1 çıkışını tercih etmesi için 2 çıkışında direnç oluşturmak amacıyla tasarlanan kanal geometrisi.....	49
Şekil 5.10 :	Sıvının 1 çıkışını tercih etmesi için 2 çıkışında direnç oluşturmak amacıyla tasarlanan kanallarda farklı f değerlerinde oluşan akım fonksiyonu konturleri-hız vektörleri (a) $f=0$. (b) $f=1.5$ mm.(c) $f=3$ mm. (d) $f=4.5$ mm. (e) $f=6$ mm.....	50
Şekil 5.11 :	Belirlenen kanal geometrisi.....	51
Şekil 5.12 :	$x=a$ için farklı z değerlerinde elde edilen xc 'ye yönelim yüzdesi (a) $y=0$ (b) $y=a$ (c) $y=2a$ (d) $y=4a$	54
Şekil 5.13 :	$x=a$ için farklı y değerleri için elde edilen xc 'ye yönelim yüzdesi. (a) $z=0$ (b) $z=a$ (c) $z=2a$ (d) $z=4a$	55
Şekil 5.14 :	Farklı giriş hızlarında 100 kanalına ait hız vektörleri- xc ağzında oluşan hız vektörleri (a)1 mm/s (b)2.5 mm/s (c)5 mm/s (d)7.5 mm/s (e) 10 mm/s.....	56
Şekil 5.15 :	111 kanalında farklı giriş hızlarında rampa üst köşesi ardındaki keskin köşe ve xc kolunda girdap oluşumu (a)1 mm/s (b)10 mm/s.....	58
Şekil 5.16 :	121 kanalına ait hız vektörleri (a)1 mm/s (b)10 mm/s.....	59
Şekil 5.17 :	141 kanalına ait hız vektörleri (a)1 mm/s (b)10 mm/s.....	60
Şekil 5.18 :	111 kanalına ait 1 mm/s giriş hızı için taneciklerin yörüngesi ve hız değerleri.....	62
Şekil 5.19 :	121 kanalına ait 10 mm/s giriş hızı için taneciğin yörünge ve hız değerleri.....	65
Şekil 5.20 :	141 kanalı için 1 mm/s giriş hızında taneciklere ait hız değerleri.....	67
Şekil 5.21 :	141 kanalı için 5 mm/s giriş hızında a)sadece sıvı olma durumdaki sıvıya ait hız vektörleri b)tanecik-sıvı asıltısı için taneciklere ait hız değerleri.....	69
Şekil 5.22 :	141 kanalında 10 mm/s giriş hızı için taneciklere ait hız değerleri.....	70
Şekil 5.23 :	114 kanalı için 1 mm/s giriş hızında taneciklere ait hız değerleri.....	72
Şekil 5.24 :	114 kanalı için 5 mm/s giriş hızında asıltıdaki taneciklere ait yörüngeler ve hız değerleri.....	73
Şekil 5.25 :	114 kanalında 10 mm/s giriş hızı için (a)kanalda sadece sıvı olduğu durumdaki hız vektörleri (b)tanecikli akışta taneciklere ait hız değerleri ve tanecik yörüngeleri.....	74
Şekil 5.26 :	Miknatisin etrafında oluşturduğu manyetik alanın teori ile karşılaştırılması için kurulan deney düzeneği.....	76
Şekil 5.27 :	$x=0, z=0$ noktasında B_y 'nin y ile değişiminin deneysel ve teorik sonuçlarının karşılaştırılması.....	77
Şekil 5.28 :	Deneysel çalışma ve sayısal çözümlemede kullanılan taneciğe ait M-H eğrisi.....	78
Şekil 5.29 :	Miknatis ile kanalın yerleşimi ve r - n parametrelerinin konumu.....	80

Şekil 5.30 : Kanala farklı giriş hızlarında giren tanecik-su asıltısındaki taneciklerin, r15n25 konumundaki mıknatısın oluşturduğu manyetik alan etkisi altındaki davranışları (a)1 mm/s (b)5 mm/s (c)10 mm/s.....	81
Şekil 5.31 : Kanala farklı giriş hızlarında giren tanecik-su asıltısındaki taneciklerin, r15n40 konumundaki mıknatısın oluşturduğu manyetik alan etkisi altındaki davranışları (a)1 mm/s (b)2 mm/s (c)5 mm/s (d)10 mm/s.....	83
Şekil 5.32 : r15n40 konumundaki mıknatısın oluşturduğu manyetik alan etkisi altında bulunan, kanala farklı giriş hızlarında giren tanecik-su asıltısındaki suya ait akım fonksiyonu konturleri (a)2 mm/s (b)5 mm/s (c)10 mm/s.....	84
Şekil 5.33 : Farklı giriş hızlarında, r15n40 konumundaki mıknatısın oluşturduğu manyetik alan etkisi altındaki tanecik-su asıltısında suya ait basınç konturleri (a)2 mm/s (b)5 mm/s (c)10 mm/s.....	85
Şekil 5.34 : r30n45 konumundaki mıknatısın 1 mm/s hızla kanala giren asıltıya etkisi sonucu a)asıltıdaki tanecik hız değerleri ve yörüngeleri b)c ağzında oluşan ters akış gösterimini sağlayan asıltı içerisindeki suya ait hız vektörleri.....	87
Şekil 5.35 : 141 kanalında 1 mm/s giriş hızında taneciklerin kanalda kalma süreleri (a) manyetik etki yok.(b)manyetik etki var (r30n45).....	88
Şekil 5.36 : Farklı konumlardaki mıknatısın 1 mm/s hızla kanala giren asıltıya etkisi sonucu oluşan tanecik hız değerleri ve yörüngeleri a)r30n50 b)r30n55.....	89
Şekil 5.37 : 141 kanalına 1 mm/s hız ile giren asıltı içindeki taneciklerin r40n50 konumundaki mıknatıs ile yönlendirilmeleri sonucunda tanecik hız değerleri ve yörüngeleri.....	91
Şekil 5.38 : r40n50 konumundaki mıknatıs etkisindeki 1 mm/s giriş hızına sahip asıltıdaki (a)suya ait basınç konturleri (b) taneciklerin kanalda kalma süreleri.....	92
Şekil 5.39 : 114 kanalında r30n40 konumundaki mıknatısın oluşturduğu manyetik alan etkisinde 1 mm/s giriş hızında asıltıdaki taneciklere ait hız değerleri.....	94
Şekil 5.40 : 114 kanalı için 5 mm/s giriş hızında manyetik alan altında asıltıdaki taneciklere ait hız değerleri.....	96
Şekil 5.41 : 114 kanalı için 10 mm/s giriş hızında taneciklere ait hız değerleri.....	97
Şekil 5.42 : 141 kanalı için manyetik etki olmaması durumunda kanala 13 mm/s giriş hızı ile giren tanecik-su asıltının deneysel olarak görüntülenmesi..	99
Şekil 5.43 : 114 kanalına 7 mm/s hızla giren asıltıdaki taneciklerin davranışının deneysel olarak gözlenmesi.....	101
Şekil 5.44 : 141 kanalı için 13 mm/s giriş hızında ve r30n25 mıknatıs konumu için taneciklere ait görüntü.....	102
Şekil 5.45 : 141 kanalı için 13 mm/s giriş hızında ve r30n45 mıknatıs konumu için asıltıdaki taneciklere ait deneysel çalışma sonucundaki görüntü....	103
Şekil 5.46 : 141 kanalı için 13 mm/s giriş hızında ve r30n50 mıknatıs konumu için asıltıdaki taneciklere ait görüntü.....	104
Şekil 5.47 : 141 kanalı için 13 mm/s giriş hızında ve r40n25 mıknatıs konumu için asıltıdaki taneciklere ait görüntü.....	104
Şekil 5.48 : 141 kanalı için 13 mm/s giriş hızında ve r40n50 mıknatıs konumu için asıltıdaki taneciklere ait görüntü.....	105

Şekil 5.49 : 141 kanalı için 1.79 mm/s giriş hızında ve r20n20 mıknatıs konumu için asıltıdaki taneciklere ait görüntü.....	106
Şekil 5.50 : 141 kanalı için 1.79 mm/s giriş hızında ve r30n45 mıknatıs konumu için deneysel sonuç (a) c ağzında ters akış sonucu ağızdan içeriye giren hava kabarcıkları yuvarlak içine alınmıştır.(b) c ağzından kabarcık girişi ve xc ağzında kabarcıkların toplanması.....	107
Şekil 5.51 : 114 kanalında 7 mm/s giriş hızı ve r30n40 mıknatıs konumu sonucunda oluşan tanecik davranışı.....	108
Şekil 5.52 : 114 kanalında 20 mm/s giriş hızı ve r30n40 mıknatıs konumu sonucunda oluşan tanecik davranışı.....	109
Şekil A.1 : Mıknatısa ait : (a) B_x ' in mıknatısın yatay konumu ile değişimi. (b) F_x ' in mıknatısın yatay konumu ile değişimi. (c) B_y ' in mıknatısın yatay konumu ile değişimi. (d) F_y ' in mıknatısın yatay konumu ile değişimi.....	117
Şekil A.2 : Mıknatısın y=3mm uzaklıkta oluşturduğu manyetik alanın x ve z koordinatlarına göre değişimi.....	118
Şekil B.1 : Transverse probuna ait özellikler (F.W.BELL)	122

SEMBOL LİSTESİ

- χ : Maddenin hacimsel duyarlılığı (hassaslık – duygunluk - *susceptibility*)
 χ_m : Maddenin kütleli duyarlılığı (m^3/kg)
 χ_t : Tanecik hacimsel manyetik duyarlılığı
 χ_s : Akışkanın manyetik duyarlılığı
 μ_0 : Serbest uzayın (boşluk)manyetik geçirgenliği $= 4\pi * 10^{-7} \text{ W}/(\text{A} \cdot \text{m})$
 μ : Maddenin manyetik geçirgenliği (N/A^2)
 μ_r : Bağıl manyetik geçirgenlik
 T_C : Curie Sıcaklığı
 T : Mutlak sıcaklık (K)
 M_s : Mıknatısın doyma manyetizasyonu (A/m)
 x_n, y_m, z_k ($n/m/k=1,2$): Mıknatısın köşe koordinatları.
 St : Stoke's sayısı
 k : Boltzman sabiti $= 1.4 * 10^{-23} \text{ J/K}$
 D_t : Tanecik çapı (m)
 V_t : Tanecik hacmi (m^3)
 $\mathbf{B}$: Manyetik alan vektörü (Manyetik indüksiyon : Manyetik akı (alan) yoğunluğu) (T)
 $\mathbf{B}_0$: Dış ortamdan kaynaklanan manyetik alan vektörü (T)
 $\mathbf{B}_m$: Maddenin mıknatıslanması sonucu oluşan manyetik alan vektörü (T)
 $\mathbf{M}$: Mıknatıslanma vektörü (Birim hacimdeki manyetik dipol moment) (A/m)
 H : Manyetik alan şiddeti (A/m)
 H_a : Mıknatıs tarafından tanecik merkezine uygulanan manyetik alan şiddeti (A/m)
 H_{ax} : Mıknatıs tarafından tanecik merkezine uygulanan x yönündeki manyetik alan şiddeti (A/m)
 H_{ay} : Mıknatıs tarafından tanecik merkezine uygulanan y yönündeki manyetik alan şiddeti (A/m)
 H_{az} : Mıknatıs tarafından tanecik merkezine uygulanan z yönündeki manyetik alan şiddeti (A/m)
 Re : Reynolds sayısı
 η : Akışkanın dinamik viskozitesi (Pa.s)
 Re_t : Tanecik Re sayısı: Göreceli Re sayısı
 ϑ : Akışkan kinematik viskozitesi (m^2/s)
 ρ : Akışkanın yoğunluğu (kg/m^3)
 α_t : Boşluk oranı (*void fraction*)
 V_{Tt} : Asıltıdaki toplam tanecik hacmi (m^3)
 V_T : Toplam asıltı hacmi (m^3)
 $\bar{\rho}_t$: Tanecik yığın yoğunluğu (*bulk density* - kg/m^3)
 ρ_t : Tanecik yoğunluğu (kg/m^3)
 θ_r : Tanecikler arası göreceli hız (m/s)
 m_t : Tanecik kütlesi (kg)
 F : Tanecik üzerine etkiyen toplam kuvvet (N)
 F_g : Yerçekimi kuvveti

F_y : Yüzdürme /kaldırma kuvveti (N)
 F_a : Atalet kuvveti (N)
 F_K : Akışkanın hareketinden dolayı oluşan kaldırma kuvveti (N)
 F_m : Manyetik kuvvet: Kelvin kuvveti (N)
 f : Tanecik üzerine etkiyen ek kuvvetler (N)
 F_D : Sürüklenme kuvveti (N)
 C_D : Sürüklenme katsayısı
 A : Tanecik projeksiyon alanı (m^2)
 u : Akışkan hızı (m/s)
 u_t : Tanecik hızı (m/s)
 f : Sürüklenme faktörü
 $\bar{D}$: Tanecik çapının kanal yarı yüksekliğine oranı
 h : Kanal yarı yüksekliği (m)
 $K=1.61$
 $\bar{s}$: Taneciğin kanal merkezine olan uzaklığının kanal yarı yüksekliğine oranı
 L : sıvı veya katı taneciğin tek bir eleman veya etrafındaki elemanlardan izole edildiği kabulü için gerekli uzunluk (m)
 L_e : tam gelişmiş akış için gerekli asgari uzunluk: hidrodinamik giriş uzunluğu (m)
 D_h : hidrolik çap (m)
 r : Mıknatıs ile kanal koordinat merkezleri arasındaki düşey mesafe (mm)
 n : Mıknatıs ile kanal koordinat merkezleri arasındaki yatay mesafe (mm)

MİLİ VE MİKRO BOYUTLU KANALLARDA İKİ FAZLI SIVI KATI AKIŞI VE MANYETİK TANECİKLERİN AKIŞTAN AYRILMASI

ÖZET

Manyetik ayırma kolay, güvenilir, ucuz ve verimli olması dolayısıyla çevre, endüstri, tıp gibi farklı ve geniş bir alana yayılır. İlk zamanlar su ve toprağın ağır metallerden ayrılması işleminde başvuru alan ayırma yöntemi manyetik taneciğin keşfiyle biyokimya, biyoanalitik, biyomedikal gibi disiplinler arası bilimlerde de dikkat çekmiştir.

Manyetik tanecikler manyetik alan altında yönlendirilebilen taneciklerdir. Mikro hatta nano boyutta elde edilebilmeleri manyetik ayırmanın çok büyük sistemlerden lab-on-a-chip olarak ifade edilen birçok laboratuvar işlemlerini santimetre boyutlarındaki yongalara toplayan sistemlere dek kullanım olanağı bulmasını sağlar. Ayırma işleminde hücre yapısına zarar vermemeleri, küçük sistemlere uygulanabilirliğiyle, DNA saflaştırma, amino asit, protein gibi sarfiyatın pek istenmediği çalışmalarda başvurulur.

Deneysel olarak uygulanması veya gözlenmesi zor olan sistemler bilgisayar teknolojisi kullanılarak manyetik tanecikler yardımıyla kanser hücrelerinin ayrılması, kanser düzeyinin belirlenmesi, damar içinde yeterli dozda ilacın hedeflenen noktaya ulaştırılması gibi çalışmaların ortaya çıkmasını sağlar.

Sunulan bu çalışmada, iki çıkışlı bir kanaldan geçirilen asıltıdaki taneciklerin, manyetik alan vasıtasıyla, yüksek oranda sudan ayrılarak istenilen çıkışa yönlendirilmeleri amaçlanır.

Çalışmada mikrokanal içinden akan 20 mikron çapındaki manyetik taneciklerden oluşan seyreltik asıltının, manyetik alan altındaki davranışı sayısal ve deneysel olarak modellenir. Bir kanalda laminar akış sergileyen asıltı içindeki manyetik tanecikler, kanal dışına yerleştirilen sürekli mıknatıs tarafından yolundan saptırılmaya çalışılır. Tanecik, dış mıknatısın oluşturduğu manyetik alanın doğurduğu manyetik kuvvet ile sürüklenme ve atalet kuvvetleri arasındaki denge sonucunda hareket eder.

Tanecik davranışı, Fluent paket programında ayrık faz modeli (DPM) ile çözümlenir. Programda dış mıknatısın oluşturduğu manyetik kuvvet, C dilinde yazılmış kullanıcı tanımlı fonksiyonla (UDF) Fluent'e girilir.

Çalışmada farklı kanal şekilleri ve hızlarda sıvı akışı çözümlemesi yapılmış ve bunların sonucunda belirlenen kanal için tanecik ve manyetik etki incelenmiştir. Sayısal sonuçlar hazırlanan mikroyapı ile elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: manyetik ayırma, manyetik mikrotanecik, mikrokanalda akış.

TWO PHASE SOLID-LIQUID FLOW IN MILLI AND MICRO SIZED CHANNELS AND THE SEPARATION OF MAGNETIC PARTICLES

SUMMARY

As it is easy, credible, cheap and efficient magnetic separation has spreaded to different and vast fields like environment, industry and medicine. With the discovery of magnetic particle, the separation method which is first referred to in the process of separation of water and soil from heavy metals, it attracted attention among the sciences such as biochemistry, bioanalytics, and biomedical.

Magnetic particles are the particles that can be directed under magnetic area. Obtaining them in micro even nano shape provided magnetic separation used in from big sized systems to Lab-on-a-chip, various methods have been miniaturized for the separation of small particles. In the separation process with doing no harm to cell construction to be adaptable miniaturized systems, it is applied to DNA purification, aminoacid, protein studies which aren't desired to be consumption.

The systems which are hard to observe and apply experimentally contributed to studies which include separation of cancer cells, determination of the level of cancer, transmission of the expected level of drug in vein via computer technology and with the help of magnetic particles.

In the study that is carried out it is intended that particles, leaving from high amount of water are directed to desired exit from a double exit channels by magnetic area.

Within the study, dilute flow that is formed of magnetic particles 20 micron in diameter flowing in a channel its manners under magnetic area are modelled numerically and experimentally. The magnetic particles in the suspension that is in the condition of laminar flow are tried to be deviated constantly by a permanent magnet placed outside the channel. The particle's trajectory resulted from magnetic, drag and inertial forces.

The motion of particle solved by Fluent 6.3.26 with discrete phase model (DPM). In programme the affect of permanent magnet to magnetic particle is a function (user defined function-UDF) written in C code and compiled to Fluent by Microsoft Visual Studio.

Here different channel shapes and velocities used only for liquid flow and the results of that used for defined channels in magnetic particles and magnetic force. The results of our simulations using Fluent DPM model is compared with experimental results obtained using our own microfabricated systems.

Keywords: magnetic separation, magnetic microparticles, microfluidic flow.

1. GİRİŞ

Teknolojideki gelişmeler mili ve mikro boyutlu kanal üretmeye olanak vermekle beraber, bu olanakların bilgisayar desteği ile yürütülmesi, yeni araştırma imkanlarını da beraberinde getirmiştir. Bu gelişmelerin başında “lab-on-a-chip” olarak ifade edilen bir çok laboratuvar işlemlerini (taşıma, toplama, tanı, sulandırma vb.), santimetre boyutlarındaki yongalara toplayan aygıtlar ve mikro boyutlu aygıtlarda aynı anda bir çok çözümlemenin beraber yapılmasına imkan sağlayan sistemler (*micro total analysis systems* - μ TAS) gelmektedir. Bu sayede yerden kazanmakla kalmayıp, sistemin daha ucuza üretimi, kişi etkileşimi olmadan daha hızlı ve güvenilir sonuçlar elde edilmesi sağlanmaktadır.

Günümüzde başta biyokimya olmak üzere biyomedikal, biyoanalitik alanlarındaki çalışmalarda μ TAS vb. sistemlerden yaygın olarak yararlanılmaktadır. Bu alanlarda yapılan çalışmalar daha çok mikroakış ve mikroakış içerisinde tanecik ayırma üzerinedir. Burada kullanılan tanecik terimi, küçük boyutlu maddeye karşılık gelmekte olup, bu, demir, gümüş vb. maddeler olabileceği gibi hücre, protein, amino asit de olabilir.

Mikrokanal içinde yapılan akışlar mikroakış olarak ifade edilmekle beraber, mikro akış yongaları protein, DNA asıltısı (*suspension*), hücre asıltıları gibi sarfiyatın pek istenmediği küçük hacimli numuneler için uygundur (Pamme, 2007). Buradan da anlaşılacağı gibi mikro boyutlu sistemlerde tanecik ayırmak için başvurulacak yöntemlerin hassasiyeti yüksek olmalıdır.

Manyetik ayırma son yirmi yıldır disiplinler arası çalışmalarda kullanılmakla beraber ayırma yöntemi olarak eski bir geçmişe sahiptir.

Ülkemizde çevre sorunlarının giderilmesinde öne çıkan manyetik ayırmanın temel kullanım amacı saflaştırmadır. Kömürün zenginleştirilmesi veya kalitesini geliştirme olarak adlandırılan kükürtlü bileşenlerin kömürden ayrılması işleminde manyetik ayırmaya başvurulur. Burada ayırma, kömürün negatif manyetik duyarlık gösterip mıknatıs tarafından itilmesi ve kömürün yanma verimini düşüren piritin (FeS_2 :Demir

sülfür) manyetik duyarlılığının yüksek olması sonucu mıknatıs tarafından çekilmesine dayanır (Çiçek, 1988). Demir ile yapılan işlemlerde de aynı uygulama vardır. Demirin zenginleştirilmesi, manyetik özellik gösteren ve önemli bir cevher olan demirin gang denilen ve demirin zenginliğini azaltan maddeden temizlenmesidir.

Manyetik ayırmanın biyokimya, biyoteknoloji, tıbbi bilimlere aktarılmasında bu çalışmanın da temelini oluşturan manyetik taşıyıcı veya manyetik tanecik kavramı önemli bir yer tutmaktadır.

Manyetik tanecik, manyetik etki altında yönlendirilebilen taneciktir. Manyetik tanecikler manyetik alana duyarlık derecelerine göre adlandırılıp genel olarak ferromanyetik (manyetik alandan çok etkilenen madde) , paramanyetik (manyetik alandan orta şiddette etkilenen madde) ve diamanyetik (manyetik alandan pek etkilenmeyen veya manyetik alandan olumsuz etkilenen madde) olarak adlandırılırlar. Bu taneciklerin mikro hatta nano boyutlarda elde edilebilmesi ve manyetik alan altındaki davranışları birçok alanda kullanım olanağı bulmasını sağlamıştır. Manyetik tanecikler günümüzde tıbbi önemi dışında su, toprak gibi kir barındırılmak istenmeyen ortamlarda filtre görevi görmektedirler.

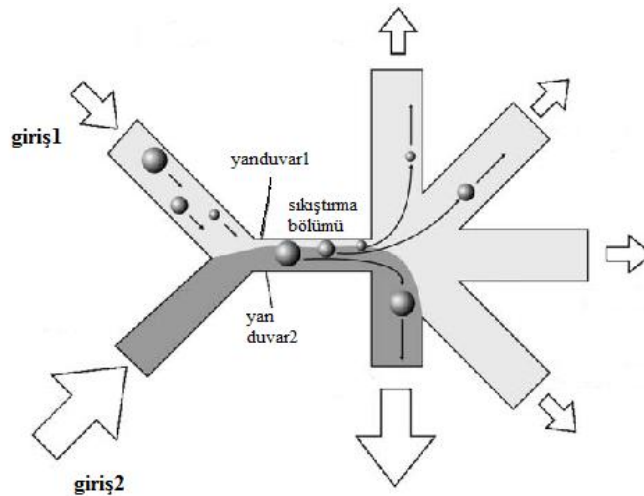
Şenel ve diğ. (2006) yaptıkları çalışmada manyetik poli mikrotanecikler ile atık sulardan ağır metal iyonlarının uzaklaştırmasını sağlamışlardır. 150-200 µm boyut aralığındaki manyetik tanecikler kullanılarak çevre kirliliğine neden olan ağır metaller (demir, bakır, çinko, kobalt, mangan, uranyum, kadmiyum, civa, kurşun, arsenik vb.) ortamdan uzaklaştırılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 Tanecik Ayırma Yöntemleri

Tanecik ayırma yöntemleri tanecik boyutuna, yoğunluğuna, şekline, elektriksel özelliklerine bağlı olabileceği gibi akış şekline de bağlı olabilir. Mili ve mikro boyutlu kanallarda kullanılan tanecik ayırma yöntemlerinden birkaçına aşağıda değinilmiştir.

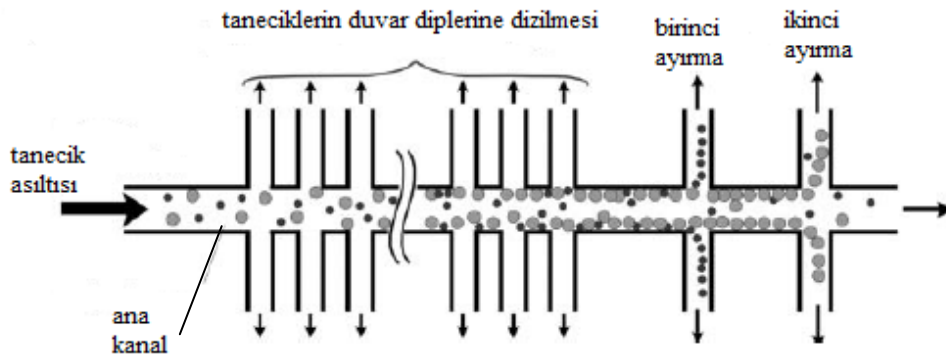
Sıkıştırılmış akış ayrılması (*pinched flow fractionation*), tanecik boyutuna bağlı olarak yapılan, mikrotanecik ve hücre ayırmalarında kullanılan bir yöntemdir. Şekil 2.1’de genel hatlarıyla verilen yöntemde giriş1’den farklı boyutlarda taneciklerin oluşturduğu asıltı, giriş2’den ise tampon çözelti (*buffer solution*) yollar. Her ikisi de laminar akış sergileyen çözeltiler, sıkıştırma bölümü olarak adlandırılan kanalın dar kısmına ulaştıklarında, daha büyük debiye sahip tampon çözelti, tanecik çözeltisini yanduvvar1 olarak ifade edilen duvar kenarına itmeye çalışır. Laminar akışın da etkisiyle tanecik asıltısı yanduvvar1’e yakın hareket ederken asıltıdaki büyük tanecikler ağırlıklarının etkisiyle, tanecik asıltısını terk ederek tampon çözelti bölgesine geçerler. Dar kanaldan sonra genişleyen kanala geçen iki laminar akış, genişleyen kanalın şekline bağlı olarak kollara ayrılır.



Şekil 2.1 : Simetrik olmayan sıkıştırılmış akış ayrılması modeli (Takagi ve diğ., 2005).

Bu şekilde farklı boyutlardaki tanecikler boyut farkından ve laminar akış özelliklerinden yararlanılarak ayrılmış olur. Sistemin verimi, genişleyen kanaldaki kollarda değişiklik yapılarak veya çıkışlara vakum etkisi yapılarak arttırılabilir. Bu yöntem, genişleyen kanalda kolların simetrik olup olmamasına bağlı olarak, sıkıştırılmış akış ayrılması veya simetrik olmayan sıkıştırılmış akış ayrılması olarak da adlandırılabilir (Takagi ve diğ., 2005; Andersen ve diğ., 2009).

Hidrodinamik eleme (*Hydrodynamic filtration*), taneciklerin boyut ve akış kontrolüne bağlı olarak ayrılmasına dayanır. Kanal mikro boyutta, uzun ve kollara ayrılacak şekilde tasarlanır. Farklı boyutlardaki taneciklerin oluşturduğu asıltı kanala ilk yollandığında tanecikler Şekil 2.2’de gösterilen ana akış olarak ifade edilen akıştan ayrılmazlar; başta kollara geçiş yoktur. Asıltı yollanmaya devam edilirken bir yandan da kollardaki direnç düşürülerek taneciklerin ana kanalın duvar diplerinde dizilmeleri sağlanır. Ayırma işleminde duvar diplerinde dizilen taneciklerden küçük boyutluların, çaplarından dolayı, büyük boyutlulara nazaran duvara daha yakın olmasından yararlanır. Bu durumda akış kollara ulaştığında küçük boyutlu tanecikler kollardaki direncin azaltılması sonucu ana akıştan ayrılır. Bu şekilde küçük boyutluların ayrılması sağlanabileceği gibi direnç daha da düşürülerek daha büyük boyutlular da ayrılabilir. Sistemin verimi yüksek olup deneme esnasında kanal şartları değiştirilerek verim daha da arttırılabilir (Yamada ve Seki, 2005).

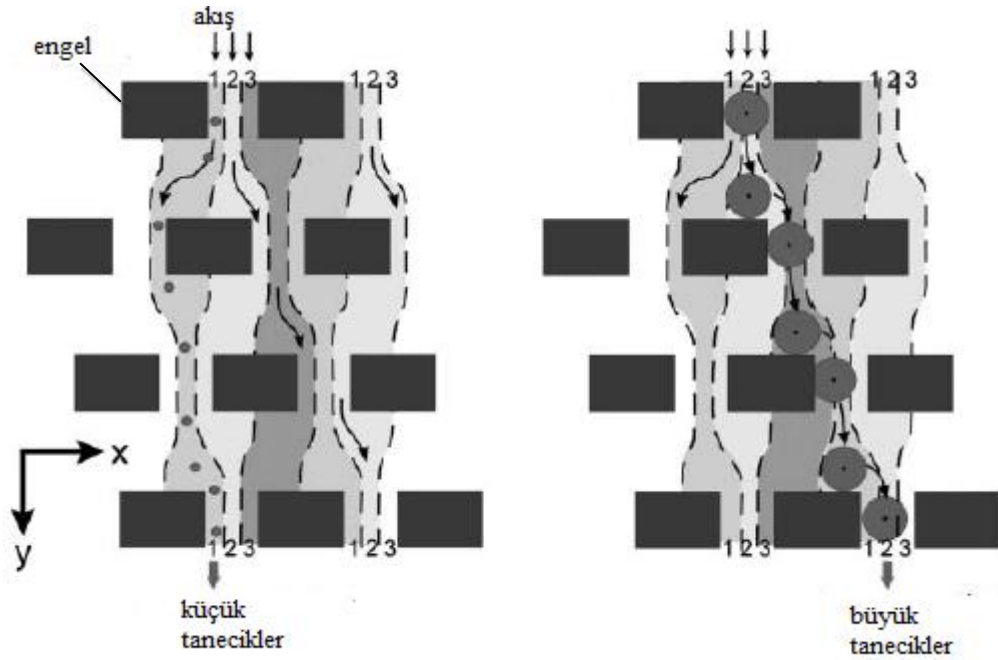


Şekil 2.2 : Hidrodinamik eleme modeli (Yamada ve Seki, 2005).

Engel ya da settler filtre olarak kullanılmaları dışında etraflarındaki akışın doğru tasarlanmasıyla tanecik ayırmada da kullanılabilirler.

Yanal yer değiştirme (*Lateral displacement*), DNA moleküllerinin ayrılmasında başvurulan yöntemlerden biridir. Bu yöntemde tanecik boyutuna bağlı ayırma yapılır.

Şekil 2.3’de şekli verilen yöntemde setler belli bir düzene göre yerleştirilmiştir. Setlerin konumu, aralarındaki mesafe, sayıları denemeler sonucunda belirlenir. Eğer tanecik boyutu setler arasındaki mesafeden çok küçükse tanecikler akışı bozmayacak şekilde akışı izlerler. Kanala giren asıltı laminer özellikte olup, akış genelde iki veya üç setten sonra düzene girerek yatayda kanala girdiği noktadan çıkar. Küçük tanecikler de laminer akışı izleyerek aynı x konumundan çıkarlar. Bunun yanında eğer tanecik boyutu ile settler arasındaki mesafenin boyutu yakınsa tanecikler laminer akışı değiştirme eğilimi göstererek x konumunda ilerlerler. Bu şekilde tanecikler boyutları vasıtasıyla farklı noktalardan çıkarak ayrılmış olurlar. Yöntemle kısa sürede ve yüksek verimde ayırma elde edilebilmektedir. Sistemin performansı tanecik boyutuna ve hıza bağlıdır. Laminer akış içinde her taneciğin bir yörüngesi vardır; tanecikler ancak dış etki dışında yayılımla (difüzyon) yolundan saptırılabilirler. Yayılımın etkisini göstermesi için belirli bir süre geçmesi gerekmektedir. Yöntemde gereken sürenin sağlanmaması için debi yüksek istenir; bu da yöntemi diğer yöntemlerden ayıran önemli bir özelliktir.



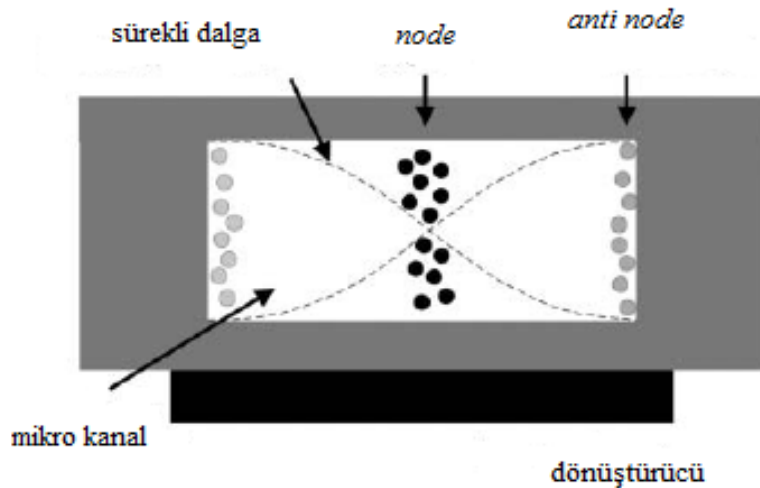
Şekil 2.3 : Setler etrafındaki akıştan yararlanarak tanecik ayırma yöntemi (Huang ve diğ., 2004).

Brownian mandalı (*Brownian ratchet*), DNA moleküllerinin yayılım katsayılarından yararlanılarak akıştan ayrılmasında başvurulmuş bir yöntemdir. Yanal yer değiştirme yöntemine benzer olup burada setler simetrik yerleştirilmemiştir. DNA molekülleri düşük debiyle pompalanırlar. Bu nedenle, çoğu zaman setlerin birinden diğerine

geçerken yayılıma uğrarlar. Öyle ki, bir önceki yöntemle ters düşerek büyük boyutta olanlar laminer akışı izleyerek x konumunda pek yer değişikliğine uğramazken, küçük boyutlu olanlar yayılımın etkisiyle x konumunda tersine davranırlar. Bu yöntemde taneciklerin yayılıma uğraması için belli bir sürenin geçmesi gerekmektedir. Bu süre kimi zaman kısa kimi zaman da saatler alabilir. Yöntem yayılımın oluşmasının zaman alması, setlerin simetrik olmaması ve yayılım kontrolünün zor olmasından dolayı pek tercih edilmemektedir.

Elektrik alanından yararlanarak yapılan ayırmada, alan hacim oranının yüksek olmasından dolayı Joule ısısı kullanılır. Yöntem amino asit, DNA molekülleri, protein ve peptitlerin verimli şekilde ayrılmasında uygulanır. Bu ayırma yönteminde set ve elektrik alanın beraber kullanıldığı, yük/boyut oranına bağlı ayırma vb. şekillerde ayırma yapılır.

Ses basıncı ile ayırma, akışa dik yönde sürekli ve genellikle ayarlanabilir ses dalgası yaratılarak, oluşturulan akustik kuvvet yardımıyla, mikrotanecik ve biyolojik hücrelerin ayrıştırılmasında kullanılır. Şekil 2.4’de ses dalgası piezoelektrik dönüştürücü tarafından oluşturulmuştur. Kanalin merkezi “node”, kenarları ise “anti node” olarak ifade edilir. Tanecik üzerindeki akustik kuvvet akustik alana, taneciğin ve ortamın özelliklerine bağlıdır. Akustik kuvvet tanecik hacmi ile orantılı olduğu gibi aynı zamanda ortam ile taneciğin yoğunluk ve sıkıştırılabilirliğine de bağlıdır. Bu ilişki kuvvetin merkez veya kenar boyunca yönünü belirler.



Şekil 2.4 : Dönüştürücü tarafından oluşturulan ses dalgası sonucu taneciklerin birbirinden ayrılması (Pamme, 2007).

Kaynaklara göre, ses üstü davranış, hücrelere ve biyolojik materyallere zarar vermemektedir. Bu yöntem açık kalp ameliyatında, kanın lipit damlalarından arındırılmasında kullanılarak dikkat çekmiştir. Akustik kuvvetin hacimle orantılı olmasından dolayı yöntem küçük molekül veya nano tanecik uygulamalarında tercih edilmez (Pamme, 2007).

Optik kuvvet ile ayırma, tanecik veya hücre üzerindeki optik kuvvet optik kutuplanmaya bağlıdır. Ayırma tanecik boyutundaki farka veya sapma nispetine bağlıdır. Yöntem organik olmayan, polimerik ve biyolojik taneciklere uygulanabilir.

Yukarıda verilen yöntemler ve bunların dışındaki yöntemlerle ilgili daha ayrıntılı bilgi Pamme (2007)'den bulunabilir. Mili ve mikro boyutlu kanallarda bu yöntemler dışında, sunulan çalışmanın da temelini oluşturan, taneciklerin manyetik duyarlılığına (*magnetic susceptibility*) bağlı olarak da ayırma yapılır.

2.1.1 Manyetik kuvvet ile tanecik ayırma yöntemi

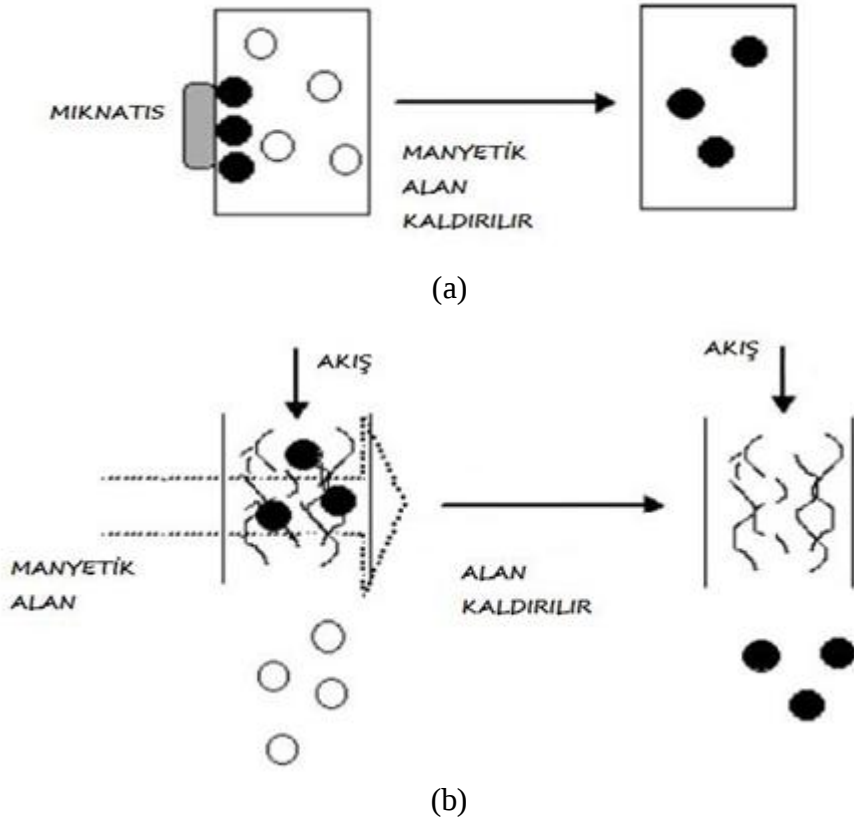
Genel anlamda manyetik kuvvet, ayrılması istenen maddenin manyetik duyarlılığına bağlıdır. Malzemenin manyetik duyarlılığı arttıkça, üzerine uygulanan manyetik kuvvet de artar.

Manyetik ayırma kaynaklarda farklı kullanım alanı bulmakla beraber bunun sonucunda farklı şekillerde sınıflandırılır. Genellikle kullanılan tanecikten çok akışa bağlı olarak yığılma ve sürekli ayırma olarak iki şekilde incelenir.

Yığılma yönteminde ayrıştırılmak istenen asıltı bir kanaldan geçirilirken, üzerine etkiyen manyetik kuvvetin etkisiyle, manyetik taneciğin kanal duvarında vb. sabit tutulmasıdır. Sabitlenen tanecik, asıltı kanaldan geçtikten sonra bir kaba alınır ya da üzerinde işlem yapılacaksa (boyut, manyetik duyarlılık tayini vb.) bir sonraki işleme geçirilir. Şekil 2.5'de yığılma yönteminin kullanımı görülmektedir. Şekil 2.5a'da manyetik olan ve olmayan taneciklerin bir arada bulunduğu asıltıda, manyetik taneciklerin mıknatıs tarafından duvarda sabitlenerek, manyetik olmayanlardan ayrılması gösterilmektedir. Şekil 2.5b'de ise manyetik tanecikler, duvar yerine matris denilen ağda sabitlendirilerek, manyetik olmayanlardan ayrıştırılmışlardır.

Yığılma uygulama açısından kolay olmakla beraber, manyetik taneciklerin duvarda tutturulmasıyla kümelenmeye (taneciklerin manyetik etki ile üst üste

binmesi sonucu topak oluşturması) neden olurlar. Bu nedenle sistemin toplama verimi sürekli ayırma yöntemine göre düşüktür.



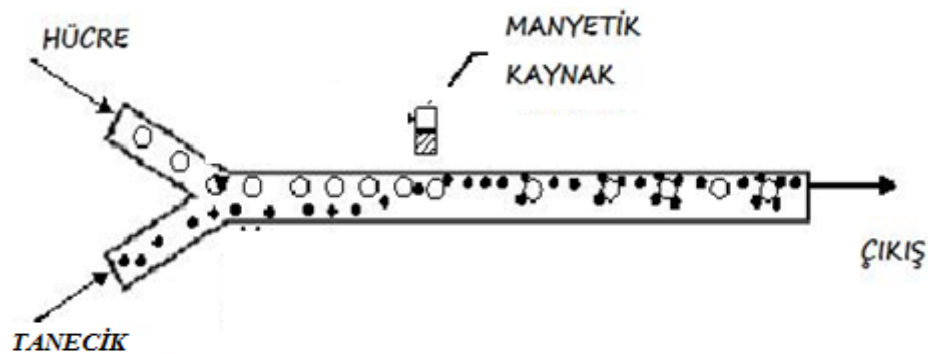
Şekil 2.5 : Yığınlaştırma yöntemi yardımıyla manyetik olan ve olmayan taneciklerin birbirinden ayrılması a) taneciklerin duvarda sabitlendirilmesi b)taneciklerin matris olarak ifade edilen ağda sabitlendirilmesi.

Sürekli ayırma yönteminde tanecik, kanal içindeki akış ve manyetik alanın da etkisiyle üzerine uygulanan kuvvetler dahilinde bir davranış sergiler. Tanecik, bir yandan kanal içinde akarken bir yandan da manyetik duyarlılığı, boyutu, kanal şekli, akış hızı vb. etmenlerin katkısıyla akış içinde istenilen yönde yönlendirilerek, kanaldan uzaklaştırılır. Burada kullanılan süreklilik kavramı taneciklerin oluşturduğu asıltının kanala sürekli beslenmesi ve aynı şekilde taneciklerin kanaldan uzaklaştırılmasının sürekli olması olarak ifade edilebilir.

Manyetik ayırma her ne kadar model olarak ikiye ayrılrsa da birçok uygulamada, iki modelin beraber kullanılmasının daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Tutma (yığınlaştırma yöntemi) - bırakma (sürekli ayırma) şeklinde ilerleyen, yıkama (*washing*) dolaşımı (sirkülasyon) olarak bilinen sistemlerde iki modelin iç içe geçtiği görülür (Ramadan ve Gijs, 2009).

Kaynaklarda bu ayırma şekillerinden farklı olarak, hücre içinde ayırma olarak ifade edilen, özel bir ayırma şekli de kullanılmaktadır. Manyetik ayırma, hücrelerle çalışıldığında en genel anlamıyla iki türe ayrılır. Birinci türde, ayrılacak hücreler kendiliğinden manyetik moment gösterirler ve manyetik ayırma, hiçbir modifikasyon yapılmadan gerçekleştirilebilir. Doğada bu özelliğe sadece iki tür hücre vardır: kırmızı kan hücreleri (eritrositler) ve manyetotaktik bakteri hücreleri. Eritrositler yüksek miktarda paramanyetik hemoglobin içerirler. Manyetotaktik hücreler ise hücre içerisinde küçük manyetik partiküller içerirler. İkinci türde ise karışımdaki bir veya daha fazla manyetik olmayan bileşene, manyetik olarak işaretlenmiş kuyruk takılır. Böylece hücre ile ortam arasında olması gereken manyetik duyarlılık sağlanır. Manyetik işaret bağlanması, çeşitli doğal afinite ligandlar kullanılarak gerçekleştirilir. Manyetik işaretlerin ve manyetik ayırıcıların kullanıldığı hedef hücrelerin saflaştırma işleminde üç temel basamak vardır: hücre süspansiyonunun manyetik işaretlerle karıştırılması; uygun bir manyetik ayırıcı kullanılarak oluşan kompleksin ayrılması ve süpernatantın ayrılması (Şenel ve diğ. , 2006).

Dikkat edilmesi gereken şu ki bu ayırma şekilleri birbirinden farklı olmakla beraber iç içe de geçmektedirler. Şekil 2.6’da ayırma, hedeflenen tanecığın üzerine kaplanan ligand sayesinde yakalanmasından dolayı hücre içindeki ayırmaya örnek teşkil etmekte olup, aynı zamanda manyetik kaynağın etkisiyle manyetik tanecığın istenen yöne yönlendirilerek çıkışa ilerlemesi bakımından da sürekli ayırma yöntemine örnektir.



Şekil 2.6 : Manyetik taneciklerin hedef hücreyi yakalaması ve dış manyetik etki ile yönlendirilmeleri.

Günümüze kadar manyetik ayırmayla ilgili birçok deneysel, sayısal veya analitik çalışma yapılmış olup bunlardan dikkat çeken birkaçına aşağıda değinilmiştir.

Manyetik tanecikler manyetik etiketli hücrelerin yakalanması, taşınması, tayini için katı taşıyıcı olarak görev alırlar.

Zhou ve diğ. (2009) yaptıkları deneysel çalışmada ayırma, yakalanan taneciklerin fiziksel özellik ya da geometrisinden çok hedeflenen tanecik üzerine kaplanan ligand ile manyetik mikrotanecikler üzerine konan reseptör (ligandı algılayan) arasındaki kimyasal bağlanmaya bağlıdır. Kanal iki giriş ve iki çıkışlı olmakla beraber, giriş bölümünün bir tarafından hedef mikrotanecikler ve hedeflenmeyen aynı zamanda manyetik duyarlılığı olmayan tanecikler, diğer tarafından ise manyetik tanecikler yollanır. Deneyde çapları 2.8 μm streptavidin kaplı manyetik tanecikler, 0.4 μm biotin kaplı polystiren bazlı hedef tanecikler ile 0.4 μm hedeflenmeyen tanecikler kullanılmıştır. Kullanılan yonga iki amacı yerine getirecek şekilde tasarlanmıştır. Yonganın serpantin şeklindeki ilk kısmında (kuluçka bölümü), farklı iki girişten yollanan hedef tanecikler ile manyetik tanecikler arasındaki kimyasal bağın yüksek olması amaçlanır. Yonganın ayırıcı olarak belirtilen ikinci kısmında ise akış özelliği ve manyetik ayırma birlikte kullanılmıştır. Bu kısımda ligand kaplı hedef taneciklere bağlanan manyetik tanecikler, kanalın sol tarafında bulunan mıknatısa yönelirken, manyetik duyarlılıkları bulunmayan ikinci tanecikler (hedeflenmeyen) ise akışın laminer olmasından dolayı kanalın sağ tarafından akarlar. Akış sonunda bir çıkıştan manyetik olan ve hedef taneciklerin geçimi, diğer çıkıştan ise manyetik olmayan taneciklerin geçimi sağlanır. Bu yolla hedef tanecik ile hedeflenmeyen tanecik ayrılmış olur.

Günümüzde biyoteknoloji, biyoanalitik, biyomedikal alanında yapılan çalışmalar, erken tanı imkanı sağlamanın yanında hastalığın derecelendirilmesinde de önem taşımaktadır. Özellikle kanser tedavilerinde, kanser düzeyi tam olarak saptanamadığından, kimi hastalarda son dönemde yapılması gerek görülen kemoterapi gibi yöntemler, başlangıç aşamasında olanlara da yapılmıştır. Bu da yanlış tanı dolayısıyla yanlış yöntem anlamına gelmektedir.

Han ve diğ. (2006) yaptıkları çalışmada manyetik ayırma aracılığıyla kanser düzeyini saptamayı amaçlamışlardır. Çalışmada kanda asıltı halde bulunan göğüs kanser hücrelerinin, manyetik alan altında beyaz kan hücreleriyle benzer davranışı göstererek, manyetik etkiye ters cevap vermelerinden yararlanılmıştır. Burada iki aşamalı bir sistem tasarlanmış olup; bu sistemin ilk aşaması manyetik ayırma temelli iken ikinci aşama kanser düzeyinin saptanması amacıyla hücrelerin elektrofiziksel

özelliklerine dayanmaktadır. İlk kısımda kanal içine yerleştirilen ferromanyetik bir tel, dışarıdan uygulanan manyetik alan sonucunda etrafında yüksek manyetik alan gradyeni oluşturur. Kanda bulunan kırmızı kan hücreleri manyetik duyarlılığa sahip olmalarından (paramanyetik madde) dolayı bu alan gradyenine yaklaşarak tele yani kanal merkezine doğru hareket ederler. Diyamanyetik (manyetik etkiyi iten - manyetik olmayan madde) özellikteki beyaz kan hücreleri ve kanser hücreleri ise gradyenin ters yönü olan, duvar diplerine kaçarlar. Bu şekilde bir giriş ve üç çıkışlı olan kanalın kenar çıkışlarından beyaz kan hücreleri ve kanser hücreleri, orta kısmından da kırmızı kan hücreleri akar. Bu şekilde taneciklerin manyetik duyarlılıklarına bağlı olarak ayrılmasıyla ilk aşama tamamlanmış olup diğer aşamaya geçilir. İkinci aşamada, beyaz kan hücreleri ile kanser hücrelerinin elektrofiziksel özellikleri saptanıp hücrenin kanser düzeyi belirlenir (*micro electro impedans*).

Bilgisayar kapasitelerinin artması ve insan vücudu üzerine yapılan çalışmalar sonucundaki bilgiler, yeni araştırma olanakları doğurmakta ve önceki kullanılan yöntemler sorgulanmaktadır. Yapılan bazı çalışmalarda, verilen bir ilacın gerektiği dozda verilip verilmediği veya dozun vücut tarafından ne kadarının kullanıldığı araştırılmıştır.

Haverkort ve diğ. (2009a) , Kenjeres ve Stuart (2009) yaptıkları çalışmalar birbirinin devamı ve ortak çalışmalar olup, burada MDT (*Magnetic Drug Targeting* - ilacın hedeflenen noktaya ulaştırılması amaçlı yapılan sistemler) atardamar üzerine uygulanmıştır. Yapılan bu çalışmalarda, MDT ile, damar üzerinde gerçek tıbbi davranışı saptamak, dozu ve yan etkileri azaltmak amaçlanmıştır.

Manyetik kuvvet tanecik çapının üçüncü kuvveti ile orantılıdır. Basit anlatımıyla, bir taneciğin çapı ne kadar büyük olursa, üzerine etkiyen kuvvet de büyüyecek; çapı büyük olan taneciğin daha küçük çaplı tanecikten ayrılması kolaylaşacaktır. Bu şekilde yapılan ayırma için boyutsal ayırım ifadesi kullanılır.

Afshar ve diğ. (2009) yığınlaştırma ve sürekli ayırma yöntemlerini birleştirerek yaptıkları mikrokanal ve elektromıknatıs sayesinde, 1 μm ve 2.8 μm çaplarındaki manyetik tanecikleri, boyut farkından yararlanarak ayırmışlardır. Çalışmada farklı çaplarda, her ikisi de manyetik özellikte olan tanecik kullanılarak, boyut ayırımı yapılmıştır. Çalışmada asıl amaç, aynı sistem baz alınarak, farklı yapıdaki manyetik taneciklerin kullanılması durumu için parametrik inceleme yapmaktır. Tanecik ve

ortam özelliğine bağlı, manyetik hareketlilik olarak tabir ettikleri parametre sayesinde aynı manyetik etki altında, farklı ortam ve tanecikler için sistemin cevabı irdelenmiştir.

Manyetik ayırma ile yapılan birçok çalışmada, ayırmanın yanında tanecik dengesinin de göz önüne alındığı gözlemlenir. Bu nedenle akışı bozmaması ve ayırmada kolaylık sağladığından, laminar akış tercih edilir (Han ve diğ., 2006 ; Pamme ve diğ., 2006).

Pamme ve diğ. (2006) yapılan çalışmada 2.8 µm ve 4.5 µm çaplarında, farklı manyetik özellik sergileyen, üç maddenin ayrıştırılması amaçlanmıştır. Burada manyetik tanecikler birbirinden boyut farkına dayanarak; manyetik olanla olmayanlar ise akış şekline (laminar akış) ve manyetik duyarlılığa dayanarak birbirlerinden ayrıştırılmışlardır.

2.2 Konunun Fiziksel ve Matematik Temelleri

Bu bölümde sonraki bölümlerin daha kolay ve doğru anlaşılabilmesi için bazı kavramlar üzerinde durulmuştur.

2.2.1 Manyetizma

Uzayın belirli bir noktasındaki yerçekimi alanı g , birim kütle başına etkiyen yerçekimi kuvvetidir. Benzer olarak uzayda bir noktada bir cisme etkiyebilecek bir manyetik kuvvet cinsinden manyetik alan vektörü B (manyetik indüksiyon: manyetik akı yoğunluğu) tanımlanabilir (Serway ve Beichner, 2002). Manyetik kuvvet, manyetik alan vektörü ve maddenin manyetik özelliklerinin fonksiyonudur.

Maddenin manyetik durumu, mıknatıslanma vektörü (M) ile ifade edilir. Mıknatıslanma vektörünün büyüklüğü, maddenin birim hacmindeki net manyetik momente eşittir. Bir maddeye dışarıdan bir manyetik alan uygulandığında, madde de mıknatıslanmasına bağlı olarak manyetik alan oluşturur. Maddedeki toplam manyetik alan, Denklem (2.1)'de verildiği gibi hem dışarıdan uygulanan manyetik alan hem de maddenin mıknatıslanmasına bağlı olarak oluşturduğu manyetik alanların toplamından oluşur.

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_o + \mathbf{B}_m = \mathbf{B}_o + \mu_0 \mathbf{M} \quad (2.1)$$

B:Toplam manyetik alan (vektörü)(Manyetik indüksiyon:Manyetik akı yoğunluğu-T)

B₀ : Dış ortamdan kaynaklanan manyetik alan vektörü (T)

B_m : Maddenin mıknatıslanması sonucu oluşan manyetik alan vektörü (T)

M:Mıknatıslanma vektörü (Birim hacimdeki manyetik dipol moment - A/m)

μ_0 :Serbest uzayın (boşluk) manyetik geçirgenliği $= 4\pi 10^{-7} \frac{W}{Am} \left(\frac{W}{Am} = \frac{Henry}{m} = N/A^2 \right)$

Denklemlerde koyu renk vektör ifadesine karşılık gelmekte olup Denklem (2.1)'de

$H = \frac{B_0}{\mu_0}$ eşitliği kullanılarak Denklem (2.2) elde edilir.

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M = \mu_0 (H + M) \quad (2.2)$$

H: Manyetik alan şiddeti (A/m)

Bir önceki bölümde de belirtildiği gibi maddeler manyetik özellikleri bakımından genel olarak üç şekilde adlandırılırlar. Bunlar ferromanyetik, paramanyetik ve diamanyetikdir.

Genellikle paramanyetik ve diamanyetik maddelerde (2.3) denklemindeki gibi **M** mıknatıslanması, **H** alan şiddetiyle orantılıdır.

$$M = \chi H \quad (2.3)$$

Burada χ niceliğine, maddenin hacimsel duyarlılığı denir ve maddenin manyetiklenme derecesine karşılık gelmektedir. Boyutsuz bir ifade olan χ 'nin maddenin yoğunluğuna bölünmesiyle elde edilen m³/kg birimindeki yeni ifadeye ise maddenin kütleli duyarlılığı (χ_m) denir.

Paramanyetik maddelerde χ pozitif ve **M** ile **H** vektörü aynı yönlüdür yani mıknatıs etkisine yönelim vardır. Diamanyetik maddelerde ise χ negatif ve **M** ile **H** vektörleri ters yönlüdür.

(2.3) eşitliğinin (2.2) denkleminde uygulanmasıyla (2.4) denklemi elde edilir.

$$B = \mu_0 (1 + \chi) H = \mu H \quad (2.4)$$

μ : Maddenin manyetik geçirgenliği (N/A^2)

Maddenin manyetik geçirgenliğinin serbest uzayın manyetik geçirgenliğine oranına bağlı manyetik geçirgenlik adı verilir ve (2.5)'de verilen bağıntıdan elde edilir.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \chi = \frac{B}{B_0} = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (2.5)$$

Paramanyetik $\mu > \mu_0$

Diamanyetik $\mu < \mu_0$

Ferromanyetik $\mu \gg \mu_0$

Paramanyetik ve diamanyetik maddeler için χ çok küçük olduğundan bunların μ değeri yaklaşık olarak μ_0 'a eşittir.

Ferromanyetik maddelerde **M**, **H**'nin lineer fonksiyonu değildir. Bunun nedeni μ 'nün maddenin karakteristik özelliği olmaması, maddenin önceki durumuna ve geçirdiği işlemlere bağlı olmasıdır. Ferromanyetik maddelerde B ile H arasındaki bağıntı histeresiz eğrisiyle elde edilir (Else, 2005).

Manyetizmada üç temel sistem kullanılır. Bunlardan biri CGS veya Gaussian, diğer ikisi de MKS veya SI ve bunu referans alarak türetilen Kennelly ve Sommerfeld dönüştürücü sistemleridir. SI birim sistemi Sommerfeld dönüştürücüsü ile kullanılır (Furlani, 2001). Çizelge 2.1'de kullanılan sistemler ve kavramların özet hali verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Manyetizmada kullanılan kavramlar ve birimleri (Furlani, 2001).

Sembol	Tanım	SI	CGS-Gaussian
H	Manyetik alan şiddeti	A/m	Oe (Oerst)
B	Manyetik akı yoğunluğu	Tesla	Gauss
M	Manyetizasyon (Mıknatıslanma)	A/m	emu/cm ³
Φ	Manyetik akı	Webers	Maxwells

Kaynaklarda Çizelge 2.1'de verilen birimler genellikle iç içe geçmektedir; birimler arasındaki bazı bağıntılar aşağıda verilmiştir.

$$1 \text{ Oe} = 1000/4\pi \text{ A/m}$$

$$1 \text{ Gauss} = 10^{-4} \text{ T}$$

$$1 \text{ emu/cm}^3 = 1000 \text{ A/m}$$

$$1 \text{ emu} = 4\pi 10^{-10} \text{ Wb.m}$$

$$1 \text{ Maxwell} = 10^{-8} \text{ Webers}$$

Sunulan bu çalışmada da sonuçlar bölümünde taneciğe ait özellikler verilirken H ifadesi Oe, moment ifadesi de emu cinsinden verilmiştir.

2.2.2 Manyetik maddelerin sınıflandırılması

İlk ve ikinci bölümün başında maddelerin manyetik sınıflandırılmalarına değinilmiş; bu bölümde ise sınıflandırmalar hakkında daha geniş bilgi verilmektedir.

Burada duyarlıklarına bağlı olarak üç tür madde incelenmekle beraber kaynaklarda bu maddelere ek olarak antiferromanyetik ve ferrimanyetik olmak üzere iki madde de incelenilir. Bu çalışmada bu maddelere değinilmesine gerek görülmemiştir.

Ferromanyetik maddeler; demir, kobalt, nikel, gadolinyum (manyetik soğutucu olarak kullanılır), disprosiyum vb. oldukça kuvvetli manyetik maddelerdir. Bunlar genellikle sürekli mıknatısların (*permanent magnets* - çubuk mıknatıs vb.) yapımında kullanılırlar. Bu maddelerin atomları, çok küçük manyetik kuvvet altında dahi birbirine paralel olarak yönelmeye çalışan, atomik manyetik dipollere sahiptirler. Manyetik dipoller bir kere paralel hale getirildikten sonra dış alan ortamdaki kaldırılabilir bile madde mıknatıslanmış olarak kalır. Bu sürekli yönelme komşu manyetik momentler arasındaki kuvvetli etkileşimden kaynaklanır.

Paramanyetik madde; alüminyum, kalsiyum, lityum, manganez, sıvı oksijen, azot oksit, ozon, platin, paladyum, krom vb. maddelerdir. Paramanyetik maddelerin duyarlılıkları 0 ile 1 arasındadır. Madde bir dış manyetik alan içine konulduğu zaman, atomik dipoller, alan yönünde yönelmeye zorlanırlar ancak manyetik etki, maddeyi rastgele yönlere yönleltmeye çalışan ısısal hareketin etkilerini yenmelidir.

Bazı koşullar altında paramanyetik maddelerin mıknatıslanmasının alanla doğru, mutlak sıcaklıkla ters orantılı olduğu Pierre Curie tarafından bulunmuştur.

$$M = C \frac{B}{T} \quad (2.6)$$

Ferromanyetik bir maddenin sıcaklığı, Curie sıcaklığı (T_C) denen bir sıcaklığa ulaşınca maddenin kendiliğinden mıknatıslığı kaybolur ve madde paramanyetik duruma geçer. Curie sıcaklığının altında manyetik momentler paralel dizildiklerinden madde ferromanyetiktir. Curie sıcaklığının üstünde ise dipoller gelişigüzel yönelmekte ve madde paramanyetik özellik kazanmaktadır.

Diamanyetik madde; bakır, gümüş, kurşun, antimon, bizmut vb. metaller, bütün yarımetaller ve organik maddeler gibi sürekli manyetik dipole sahip olmayan maddelerdir. Diamanyetik maddelerin mıknatıslanmaları çok zayıf ve mıknatıslayıcı alanla zıt yönlüdür. Bu maddeler, kuvvetli bir mıknatıs tarafından hafifce itilirler.

2.2.3 Mıknatısın oluşturduğu manyetik alan

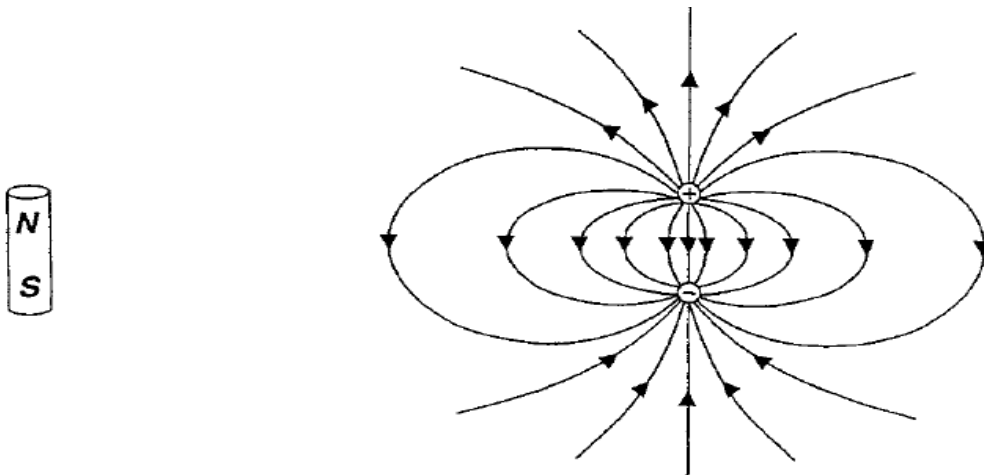
Manyetik alan akım vasıtasıyla oluşturulabildiği (elektro manyetik alan - elektromıknatıs) gibi sürekli mıknatıslar tarafından da oluşturulabilir.

Yapılan incelemelerde, manyetik alan kaynağı olarak genellikle gücünün tespit edilmesinin kolay olması nedeniyle elektromıknatıs kullanıldığı görülür. Kaynaklarda elektromıknatıs ile yapılan birçok çalışma yer alır (Afshar ve diğ., 2009; Sinha ve diğ., 2009; Haverkort ve diğ., 2009a).

Sunulan çalışmada manyetik alan kaynağı olarak sürekli mıknatıs tercih edilmiştir. Sürekli mıknatıslar elektromıknatıslara göre yüksek mıknatıs alanı oluşturmaları, enerji harcamamaları, ısı açığa çıkarmamaları ve biyolojik hücrelere zarar vermemeleri bakımından avantajlıdır (Furlani, 2005).

Manyetizmadaki temel kavramlardan biri de manyetik dipoldür. + ve – yüklü iki parçacığın aralarında elektrik dipolü oluşturduğu kabulünden mıknatısın kutupları olan N ve S manyetik kutup çifti de manyetik dipol olarak düşünülür. Manyetik dipol bir manyetik momente (m - A.m² (Sommerfeld) ; emu (CGS) ; Wb.m (Kennelly)) sahiptir. Şekil 2.7’de mıknatısın manyetik dipol çizgileri gösterilmiştir.

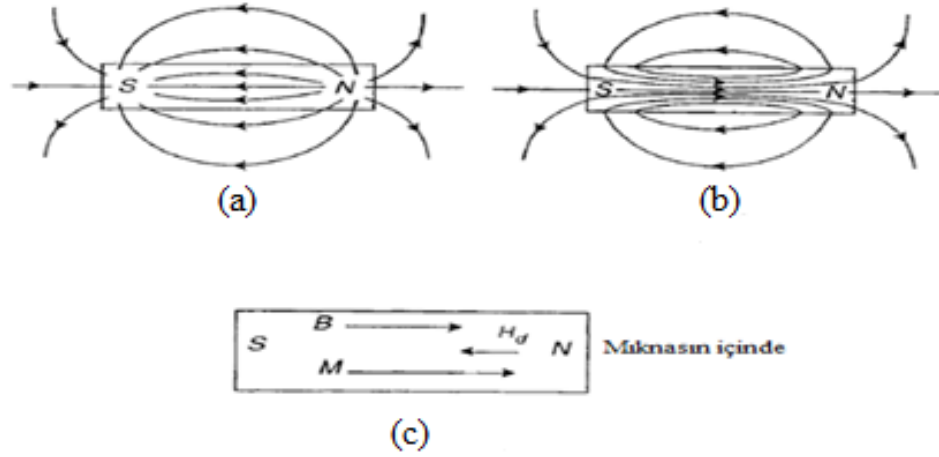
Manyetizasyon veya mıknatıslanma (M) terimi mıknatıs için birim hacimdeki net manyetik dipol momentinin ölçüsüdür. Bu tanımdan $\mathbf{M} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum_i \mathbf{m}_i}{\Delta V}$ ile ifade edilir. $\sum_i \mathbf{m}_i$: verilen ΔV hacimdeki toplam dipol moment vektörü.



Şekil 2.7 : Bir mıknatısın oluşturduğu manyetik dipol ve manyetik alan şiddeti (H) eğrilerinin gösterimi (Furlani, 2001).

Sunulan çalışmada sürekli mıknatıs olarak dikdörtgen kesitli çubuk mıknatıs kullanılmıştır.

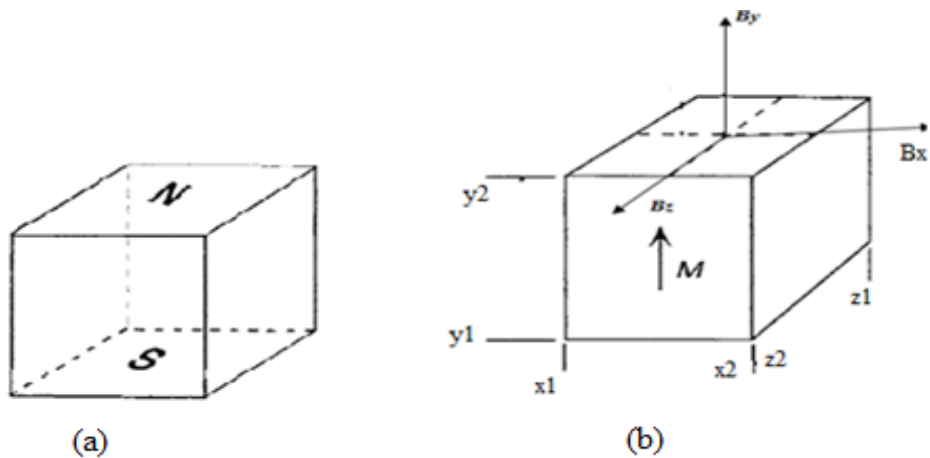
Şekil 2.8’de çubuk mıknatıslarda manyetik alan şiddeti (H) ve manyetik alan yoğunluğu (B) çizgilerinin mıknatıs içindeki yönelimi verilmiştir.



Şekil 2.8 : Bir çubuk mıknatısın (a) H çizgileri. (b) B çizgileri (c) H_d , M , B 'nin mıknatısın içerisindeki yönelimleri (Furlani, 2001).

Şekil 2.8’de görüldüğü gibi çubuk mıknatıslarda B manyetik alan çizgileri kapalı bir yüzeyde süreklilik sağlarken aynı şey H için kullanılamaz. Bir mıknatısa dışarıdan bir manyetik alan etkiğinde mıknatıs içinde bu alana zıt yönde bir zıt mıknatıslanma (demanyetizasyon - H_d) oluşur. Dolayısıyla mıknatıs içinde H_d 'nin etkisiyle H 'nin kapalı bir eğri boyunca süreklilik sağlaması engellenir.

Mıknatısın oluşturduğu manyetik alan belirtilirken mıknatısın şekli, konumu ve manyetizasyon yönüne dikkat edilmeli ve bu ifadeler doğru saptanmalıdır. Sunulan çalışmada da kullanılan dikdörtgen kesitli mıknatısın oluşturduğu manyetik alan vektörleri Şekil 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2.9 : (a)Dikdörtgenler prizması şeklindeki mıknatısın kutupları. (b) B_x , B_y , B_z ve M ' in yönelimlerinin gösterimi.

Dikdörtgenler prizması şeklindeki bir mıknatısın manyetizasyon yönü y kabul edilirse x, y, z yönlerinde oluşan manyetik alan yoğunluğu ifadeleri aşağıdaki gibi ifade edilirler (Noporth ve diğ., 2007; Smistrup ve diğ., 2007).

$$B_x(x, y, z) = \frac{\mu_0 M_s}{4\pi} \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 (-1)^{n+m} * \ln[A(x, y, z, z_1, z_2, x_n, y_m)] \quad (2.7a)$$

$$A(x, y, z, z_1, z_2, x_n, y_m) = \frac{(z-z_1)+[(x-x_n)^2+(y-y_m)^2+(z-z_1)^2]^{(1/2)}}{(z-z_2)+[(x-x_n)^2+(y-y_m)^2+(z-z_2)^2]^{(1/2)}} \quad (2.7b)$$

$$B_y(x, y, z) = \frac{\mu_0 M_s}{4\pi} \sum_{k=1}^2 \sum_{n=1}^2 \sum_{m=1}^2 (-1)^{k+n+m} * \tan^{-1} \left[\frac{(x-x_n)*(z-z_k)}{(y-y_m)} g(x, y, z, x_n, y_m, z_k) \right] \quad (2.8a)$$

$$g(x, y, z, x_n, y_m, z_k) = \frac{1}{[(x-x_n)^2+(y-y_m)^2+(z-z_k)^2]^{(1/2)}} \quad (2.8b)$$

$$B_z(x, y, z) = \frac{\mu_0 M_s}{4\pi} \sum_{k=1}^2 \sum_{m=1}^2 (-1)^{m+n} \ln[L(x, y, z, z_k, x_1, x_2, y_m)] \quad (2.9a)$$

$$L(x, y, z, z_k, x_1, x_2, y_m) = \frac{(x-x_1)+[(x-x_1)^2+(y-y_m)^2+(z-z_k)^2]^{(1/2)}}{(x-x_2)+[(x-x_2)^2+(y-y_m)^2+(z-z_k)^2]^{(1/2)}} \quad (2.9b)$$

M_s : Mıknatısa ait doyma manyetizasyonu (A/m)

x_n, y_m, z_k (n/m/k:1,2) mıknatısın köşe koordinatlarıdır. Burada kullanılan x, y, z koordinat sistemi mıknatısa ait koordinat sistemi olup kanal için yapılan işlemlerde sistemler arasındaki geçiş dikkate alınmalıdır (Furlani, 2001; Furlani, 2005). Manyetik alanın tanecik üzerine uyguladığı kuvvet hesaplanırken (2.7a) - (2.9b) denklemlerindeki manyetik alan ifadelerine dolayısıyla mıknatısa ait bir sabit olan M_s değerine ihtiyaç vardır. Kaynaklarda verilen M_s değerinin ve teoreminin sınanması amacıyla mıknatısın etrafında oluşturduğu manyetik alan ifadesi sonuçlar bölümünde verilen deney düzeneği kurularak da elde edilmiş ve Denklem (2.7a) - (2.9b) ile karşılaştırılmıştır.

3. MATEMATİK MODEL VE SAYISAL ÇÖZÜMLEME

Sunulan çalışmada $8 \cdot 10^{10}$ Tanecik/m³H₂O derişikliğinde, 20µm çapında, 6586 kg/m³ yoğunluktaki demir bazlı taneciklerden oluşan asıltı kullanılmaktadır. Asıltı bir giriş ve iki çıkışlı dikdörtgen kesitli kanaldan akarken, dışarıdan dikdörtgenler prizması şeklindeki NdFeB (neodyum iron boron) mıknatıs tarafından oluşturulan manyetik alan vasıtasıyla yönlendirilmektedir. Bu yönelim sonucunda su ile taneciğin birbirinden en uygun şekilde ayrılması amaçlanmaktadır.

Bu bölümde belirlenen sayısal çözümleme vasıtasıyla kanal şeklinin, suyun kanala giriş hızının, mıknatısın farklı noktalara yerleştirilmesi sonucu oluşan manyetik kuvvetlerin ayırmaya etkisi irdelenmiştir.

3.1 Matematik Model

Modelleme iki aşama olarak düşünülmüştür. İlk aşamayı ayırma için kullanılacak kanalın belirlenmesi, ikinci aşamaya belirlenen kanal üzerinde tanecik ve manyetik alan etkisinin incelenmesi almıştır.

3.1.1 Kanal geometrisinin belirlenmesi

Mili ve mikro boyutlu sistemlerde tanecik ayırma işlemlerinde, laminar akış kanal şeklinin belirlenmesinde önemli bir yer teşkil eder. Laminar akış özelliğindeki seyreltik asıltılarda (*dilute flow*) dışarıdan bir etki yoksa; tanecik, sıvı akışıyla benzer davranış sergiler (Modak ve diğ., 2009). Bu sonuç tanecikli çözümlerin uzun zaman aldığı göz önüne alınınca çalışmalarda büyük kolaylık sağlamıştır. Bu sayede üzerinde çalışılan kanalda, sadece sıvı için yapılan çözüm, taneciğin davranışını da verir. Tanecik davranışının saptanması, manyetik kuvvetin nereden uygulanması gerektiği hakkında bilgi verir fakat sıvı ile taneciğin benzer davranış sergileyeceği kabulü, laminar akış ve seyreltik akış şartlarında geçerlidir (Crowe ve diğ., 1998). Aşağıda sunulan çalışmaya ait akış rejimi ve asıltıya ait bazı özellikler irdelenmiştir.

Akış rejiminin belirlenmesi: Kanal içindeki akış rejimi Re sayısı ile belirlenir.

Sunulan bu çalışmada 1, 2.5, 5, 7.5 ve 10 mm/s olmak üzere beş farklı giriş hızı üzerinde çalışılmıştır. Kanal geometrisinin belirlenmesindeki tasarım aşamaları, sonuçlar bölümünde yer almakla beraber, kanal girişinde tanecik yığılmaları ve tıkanma olmaması ve kanal işlenebilirliği göz önüne alınarak, giriş kesiti 3mm*0.6mm olarak belirlenmiştir. Denklem (3.1)'den hidrolik çapı 1 mm olarak belirlenen kanal ve akışkan olarak su ($\eta_{su} = 10^{-3} \text{ Pa.s}$) kullanımı için her bir hız değerine karşılık gelen Re değeri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

$$Re = u D_h \rho / \eta \quad (3.1)$$

η , u ve ρ sırasıyla akışkanın dinamik viskozitesi (Pa.s), hızı (m/s) ve yoğunluğudur (kg/m^3).

D_h : Karakteristik uzunluk: Hidrolik çap (m)

Çizelge 3.1 : Giriş hızı ile Re sayısının değişimi.

Hız (mm)	Re
1	1
2.5	2.5
5	5
7.5	7.5
10	10

Çizelge 3.1'den Re'un 1-10 arasında değiştiği dolayısıyla laminar akış özelliği gösterdiği görülür.

Asıltı özelliğinin belirlenmesi: Bir asıltının seyreltik olması, ele alınan akışta tanecik hareketinin, akışkan kuvvetleri (sürüklenme, kaldırma vb.) ile kontrol edildiği; seyreltik olmaması veya çamur vb. yoğun olması (*dense flow*), tanecik hareketinin tanecikler arası çarpışmalar ile kontrol edildiği anlamına gelir (Crowe ve diğ., 1998). Bir asıltının seyreltik veya yoğun olması kabulü, momentum cevap zamanı (*momentum response time*) ile taneciklerdeki çarpışmalar arasındaki zaman aralığı oranından bulunup, gerekli işlemler yapılarak Denklem (3.2c) şeklini alır.

$$\alpha_t = \frac{V_{Tt}}{V_T} \quad (3.2a)$$

$$\bar{\rho}_t = \rho_t \alpha_t \quad (3.2b)$$

$$\frac{\bar{\rho}_t D_t \vartheta_r}{3\eta} < 1 \quad (3.2c)$$

α_t : Boşluk oranı (*void fraction*)

V_{Tt} : Asıltıdaki toplam tanecik hacmi (m^3)

V_T : Toplam asıltı hacmi (m^3)

$\bar{\rho}_t$: Tanecik yığın yoğunluğu (*bulk density* - kg/m^3)

ρ_t : Taneciğin yoğunluğu (kg/m^3)

θ_r : Tanecikler arası göreceli hız (m/s)

D_t : Tanecik çapı (m)

η : Sıvı dinamik viskozitesi ($Pa.s$)

Modellemenin başında verildiği gibi $8 \cdot 10^{10}$ Tanecik/ $m^3 H_2O$ derişikliğinde, tanecik çapı $20 \mu m$ ve yoğunluğunun $6586 kg/m^3$ olduğu göz önüne alınarak α_t değeri $3.34991 \cdot 10^{-4}$, $\bar{\rho}_t$ değeri $2.2063 kg/m^3$ olarak belirlenir. (3.2c) denkleminin sol tarafı küçük boyutlu kanallarda ve laminar akış durumunda, sonuçlar bölümünden de görülebileceği gibi hız parametresinin yüksek oranlarda değişmeyeceği göz önüne alınınca, sonucun 10^{-3} ile 10^{-4} mertebelerinde çıkacağı dolayısıyla akışın seyreltik olduğu kabul edilebilir.

Yukarıda yapılan incelemeler sonucunda akışın laminar ve seyreltik asıltı olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışmada tanecik ile sıvının benzer davranışlar sergileyeceği sonucu göz önüne alınarak, kanal tasarımına geçilir.

Tasarım aşamasında ilk olarak yapılan çalışmalar incelenmiştir. Kaynak taramalarında, ayırma amaçlı kullanılan kanalların, sistemde deneysel veya sayısal olarak modellenmesinin ve kontrolünün kolay olması, önceden üzerinde fazlasıyla çalışma yapıldığından genellikle düz dikdörtgen kesitli olduğu görülür (Afshar ve diğ., 2009; Sinha ve diğ., 2009). Bu çalışmalarda ayırma kavramı, taneciğe farklı yönelimler sergiletmek (manyetik olanların mıknatısa yakın konumda olmaları vb.) olarak kullanılıp, tek çıkışlı kanallardır.

Bu çalışmada tanecik ile suyun en uygun şekilde birbirinden ayrılması amaçlandığından, tek çıkışlı düz dikdörtgen kesitli kanallar amacı gerçekleştirememektedir. Bu noktada kanal tasarımında dikkat edilmesi gereken bazı öncelikler belirlenmiş ve aşağıda verilmiştir.

- Sistemin amacı tanecikleri sıvıdan ayırmak olduğundan, suyun ve taneciklerin ayrı yönelmeleri için en az iki çıkışlı bir kanala ihtiyaç vardır.

- Kanal tasarlanırken kanalda girdap vb. etkiler istenmez.
- Sayısal olarak modellenebilir olan kanalın aynı zamanda deneysel modele de yatkın olması yani işlenebilir olması istenir.

Bu bölümde kanal tasarımı ile ilgili gerekli bilgi verildiği düşünülüp sonuçlar bölümünde kanal seçiminin aşamaları ve kanallarda yapılan değişiklikler anlatılmıştır. Bu bölümden sonra kanal seçimi yapılmış kabul edilerek tanecikli akışa geçilmiştir.

3.1.2 Tanecikli akışın modellenmesi

Bu bölümde, kanal geometrisi bir önceki bölümde belirlenen modelde, sıvı-katı asıltısı kanal içinden akarken, dışarıdan uygulanan manyetik etkiye cevabının, sayısal olarak çözülmesi amaçlanmıştır. Sayısal çözümleme Fluent 6.3.26 sonlu hacimler farkına dayanan paket programıyla yapılmıştır.

Tanecikli akış, sıvı-katı iki fazlı akış olup Fluent’de genel anlamda iki fazlı akış için Euler, VOF (*volume of fluid*) , karışım (*mixture*) ve ayrık faz (*discrete phase model - DPM*) modelleri kullanılmaktadır. Öncelikle bu modellerden hangisinin bu çalışma için uygun olduğunun belirlenmesi gerekmektedir.

İki fazlı akış modellerinden VOF modeli, birbiriyle karışmayan iki akışkan arasındaki akışı incelediğinden, üzerinde çalışılan problem için uygun değildir.

Karışım modeli, kabarcıklı akış, yoğun hacim oranlarında (tanecik hacim derişikliği $> \% 10$) ve atmosfere açık akışlarda uygundur. Kaynak araştırmalarında Euler ve karışım modellerinin yoğun çözeltiler için uygun olduğu, ayrık faz modelinin (DPM) ise tanecik hacim oranının $\% 10$ ’u geçmediği akışlarda ve tanecik izlemede en iyi sonucu veren model olduğu belirtilir. Hacimsel derişiklik değerinin $\% 10$ ’u geçmediği asıltılarda taneciğın ilk konum, hız, boyut ve sıcaklığı bilindiğinde ayrık faz modeli (DPM) sistem için uygulanabilir. (Fluent; Kenjeres ve Stuart, 2009; Haverkort ve diğ., 2009; Modak ve diğ., 2009).

Sunulan çalışmada kullanılan asıltıdaki taneciğın hacimsel derişikliği $3.35 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3\text{T} / \text{m}^3\text{H}_2\text{O}$. Taneciğın ilk konum ve giriş hız değeri bilindiğinden DPM sistem için uygulanabilir. DPM modelinin uygulanışında iki yaklaşım bulunmaktadır; hangi yaklaşımın kullanılacağıının tespiti çözümü etkilemekle beraber çözüm safhalarını da etkilemektedir.

Bunlar kaynaklarda bağımsız (*uncoupled*) ve bağımlı (*coupled*) yaklaşımlar olarak geçmektedirler.

Bağımsız model yaklaşımı, sabit sürekli faz (akışkan) akış alanı olarak da ifade edilir. Bu modelde akışkan, ayrık fazın (tanecik) hareketini sürüklemeye ve türbülans gibi etkilerle etkilerken, taneciğin sıvıya etkisi olmadığı kabul edilir. Model kolay uygulanabilirliği ve kısa zamanda çözüme ulaşması bakımından birçok çalışmada kullanılmıştır (Haverkort ve diğ., 2009b).

Bağımlı model yaklaşımı, etkileşimli akış olarak da ifade edilir. Bu yaklaşımda her iki fazın birbirlerinden etkilendikleri kabulü yapılır. Modelde sürekli ve ayrık faz denklemleri her iki faz için yakınsama sağlanana kadar çözülür. Modelin uygulama aşamasında önce sıvı faz çözülür, sıvı faz için yakınsama şartı sağlandıktan sonra tanecik yolları ve tanecik ile akışkan için yakınsama kriteri sağlanana kadar iterasyon yapılır. Model bir önceki modele göre çözümlerin uzun zaman alması bakımından pek tercih edilmese de daha hassas sonuç vermesi bakımından üstündür.

Yukarıda taneciğin boşluk oranının küçük olduğu ve asıltının seyreltik akış özelliğinde olduğu gösterilmişti. Kaynaklarda bu durumda, kesin olmamakla beraber akış, bağımsız kabul edilerek devam edilmesi önerilmektedir. Bunun yanında Modak ve diğ., (2009) yaptıkları çalışmada seyreltik asıltılar için yapılan bu kabulün, yoğun asıltılar için yapılamayacağını belirtmişlerdir. Aynı zamanda asıltıdaki taneciklerin, üzerlerine uygulanan manyetik kuvvet sonucunda manyetik alana yönelirken, arkalarında düşük basınç oluşturduğu ve bunun sıvı akışını etkilediğini göstermişlerdir. Yaptıkları çalışmada manyetik alan etkisi olmadan % 50 gibi eşit ayırmayı sağladıkları bir sistem üzerinden devam edip bu çıkarımlara ulaşmışlardır. Sunulan bu çalışmada ise ayırma işleminin, % 70'e % 30 olduğu kanallara da uygulandığı yani basınç etkisinin önemli bir sorun teşkil edebileceği göz önüne alınmalıdır. Bu çalışmada her ne kadar boşluk oranı düşük olsa da asıltıyı oluşturan taneciklerin yüksek yoğunlukta olmaları, akışı etkileyebileceği anlamını taşır. Ayrıca kaynaklarda yer alan çalışmalarda tanecik çapları 4 - 5 μm iken bu çalışmada 20 μm olduğu göz önünde tutulunca daha hassas sonuç elde edilebileceği de düşünülerek bağımlı model tercih edilmiştir.

Bağımlı modelde çözüme daha çabuk ulaşmak için önce kanalda sadece sıvı olduğu düşünülüp, sıvı için yakınsamış çözüm elde edildikten sonra tanecik beslemesi

önerilir (Fluent). Alt kısımda sayısal modelin uygulanışı verilmiştir fakat bundan önce asıltı içerisindeki tanecik davranışının saptanması için tanecikler üzerine etkiyen kuvvetlerin belirlenmesi gerekmektedir.

Asıltı içerisindeki tanecik davranışının saptanması

Ayrık faz modelinde Lagrange modeli uygulanır. Ayrık faz (küresel tanecik; damlacık veya kabarcığı temsilen seçilir) sürekli faz içinde dağınmıştır.

Tanecik için Newton denge denklemi Denklem (3.3)'de verildiği gibi yazılır.

$$\frac{d\mathbf{u}_t}{dt} = \frac{\sum \mathbf{F}}{m_t} \quad (3.3)$$

$\mathbf{u}_t$: Tanecik hızı (m/s)

m_t : Tanecik kütlesi (kg)

$\mathbf{F}$: Tanecik üzerine etkiyen toplam kuvvet (N)

Fluent'de bu ifade genişletilerek tanecik yörünge denklemi için Denklem (3.4) elde edilir.

$$\frac{d\mathbf{u}_t}{dt} = f_s(\mathbf{u} - \mathbf{u}_t) + \mathbf{g}(\rho_t - \rho)/\rho_t + \mathbf{f}/m_t \quad (3.4)$$

ρ : Akışkan yoğunluğu (kg/m³)

$\mathbf{u}$: Akışkan hızı (m/s)

$\mathbf{f}$: Tanecik üzerine etkiyen ek kuvvetler (N)

Denklemden $\mathbf{f}$ ek kuvvet olarak belirtilmekle beraber basınç gradyeni, Brownian kuvveti, Saffman kaldırma kuvveti olabileceği gibi bu çalışmadaki gibi manyetik kuvvet de olabilir.

Manyetik sistem içinde tanecik hareketi değişik kuvvetler içerir. Bunlar bütün alan kaynaklarından kaynaklı manyetik, viskoz sürüklenme, atalet, yerçekimi, kaldırma (yüzdürme – *buoyancy*) kuvvetleri ve ısı kinetikleri, tanecik akışkan etkileşimleri (akış alanına yönelim), tanecikler arası etkileşimler (manyetik çift etkileşimi, elektrik çift katman etkileşimi, Van der Waals kuvveti) sonucu oluşan kuvvetlerdir (Furlani,2005).

Asıltıdaki taneciğe etkiyen başlıca kuvvetler ve modellemedeki şartlar için elde edilen bazı değerler aşağıda verilmiştir.

-Yerçekimi kuvveti:

$$F_g = \rho_t \frac{4}{3} \pi r_t^3 g \quad (3.5)$$

$$F_g = 6586 * \frac{4}{3} \pi (10 * 10^{-6})^3 * 10 = 2.75 * 10^{-10} N$$

-Yüzdürme kuvveti/Kaldırma kuvveti:

$$F_y = \rho \frac{4}{3} \pi r_t^3 g \quad (3.6)$$

$$F_y = 10^3 * \frac{4}{3} \pi (10 * 10^{-6})^3 * 10 = 4.1888 * 10^{-11} N$$

-Atalet kuvveti:

$$F_a = m_t \frac{du_t}{dt} \quad (3.7)$$

Kuvvet, hız dağılımına bağlı olarak değişir.

-Tanecik akışkan etkileşimleri: Taneciğin hacimsel derişikliğine bağlı olarak farklı şekillerde ifade edilir. Bu çalışmada bağımlı model seçilerek hesaba katılması sağlanmıştır.

-Brownian kuvveti: Genellikle mikron altı taneciklerde yayılım etkisi sonucunda oluşan kuvvettir. Çoğu uygulamalarda hesaba katılmayan bu kuvvetin hesaba katılıp katılmayacağı Gerber ve diğ. (1983)'nin yaptıkları çalışma sonucunda belirledikleri tanecik çap şartı yardımıyla belirlenir. Yaptıkları çalışmada sıvı içerisinde asıltı halde bulunan Fe_3O_4 taneciklerinin üzerine etkiyen kuvvetler hesaplanırken Brownian kuvvetinin etkime şartını Denklem (3.8)'de verilen şekilde belirlemişlerdir. Çalışma Fe_3O_4 tanecikleri baz alınarak yapılmış olsa da kaynaklarda tanecik yapısı gözetlenmeyip, referans çalışma olarak farklı tanecikler için de kullanılmıştır.

$$|F|D_t \leq kT \quad (3.8)$$

$|F|$: Tanecik üzerine etkiyen toplam kuvvet (N)

k: Boltzman sabiti = $1.4 * 10^{-23}$ J/K

T: Mutlak sıcaklık (K)

D_t : Tanecik çapı (m)

Bu işlem sonucunda elde edilen tanecik çapı, modelde verilen tanecik çapından büyük ise yukarıda verilen (3.3) ve (3.4) denklemleri, yayılım etkisini göz ardı ettikleri için geçerliğini kaybederler (Furlani, 2005). Bu çalışmada yerçekimi ve

kaldırma kuvvetleri 10^{-10} N mertebelerinde iken NdFeB mıknatısı için manyetik kuvvet EK.A'da verildiği gibi 10^{-9} N mertebelerinde izler. Bu değerler Denklem (3.8)'de yerleştirilip gerekli işlemler yapıldığında $D_t \leq 4.2 * 10^{-12}$ bulunur. Bu değer kullanılan tanecik çapından çok küçük olduğundan Brownian kuvveti ihmal edilir.

-*Sürüklenme kuvveti*: Tanecik üzerindeki sürüklenme kuvveti Denklem (3.9a)'da verildiği gibi sıvı içindeki taneciğin durgun olmadığı göz önüne alınarak Denklem (3.9b)'de verilen göreceli veya tanecik Re sayısını ortaya çıkarmıştır. Sürüklenme kuvveti ifadesinde alt simge olarak s sembolü önceden sıvı için kullanıldığından D (*drag*) sembolü kullanılmıştır.

$$\mathbf{F}_D = \frac{1}{2} \rho C_D A |\mathbf{u} - \mathbf{u}_t| (\mathbf{u} - \mathbf{u}_t) \quad (3.9a)$$

$\mathbf{F}_D$: Sürüklenme kuvveti (N)

ρ : Akışkan yoğunluğu (kg/m^3)

C_D : Sürüklenme katsayısı

A: Tanecik projeksiyon alanı (m^2)

$\mathbf{u}$: Akışkan hızı (m/s)

$\mathbf{u}_t$: Tanecik hızı (m/s)

$$Re_t = \frac{\rho D_t |\mathbf{u} - \mathbf{u}_t|}{\eta} = \frac{D_t |\mathbf{u} - \mathbf{u}_t|}{\vartheta} \quad (3.9b)$$

Re_t : Taneciğin Re sayısı: Göreceli Re sayısı

D_t : Tanecik çapı (m)

η : Akışkan dinamik viskozitesi (Pa.s)

ϑ : Akışkan kinematik viskozitesi (m^2/s)

$Re_t < 1$ olması durumunda sürüklenme sonucunda oluşan basınç gradyeni ve kayma gerilmesini hesaba katan Stokes sürüklenme katsayısı C_D Denklem (3.10) aracılığıyla elde edilir.

$$C_D = \frac{24}{Re_t} \quad (3.10)$$

Denklem (3.10) düşük Re sayılarında iyi sonuçlar verirken Re'un yüksek değerlerinde atalet kuvveti ihmal edilemediğinden Stokes sürüklenme katsayısı küçük

kalmaktadır. Bu durumda $Re_t \approx 5$ için Oseen, Stokes analizine birinci dereceden atalet kuvvetlerini de ekleyip yaptığı düzenlemeyle sürüklenme katsayısını Denklem (3.11)'deki şekilde elde etmiştir (Crowe, 1998; White, 2006).

$$C_D = \frac{24}{Re_t} \left(1 + \frac{3}{16} Re_t \right) \quad (3.11)$$

Kaynaklarda C_D sürüklenme katsayısı dışında f sürüklenme faktörü de kullanılır. Dolayısıyla tanecik hareket denkleminde sürüklenme kuvveti Denklem (3.12)'de verildiği gibi de ifade edilir.

$$\mathbf{F}_D = 3\pi\eta D f(\mathbf{u} - \mathbf{u}_t) \quad (3.12)$$

Farklı Re_t için sürüklenme faktörü eşitlikleri aşağıda verilmiştir (Crowe, 1998).

$$f = \begin{cases} \frac{C_D Re_t}{24} & Re_t < 1 & \text{Stokes} \\ 1 + 0.15 Re_t^{0.687} & Re_t \leq 80 & \text{Schiller and Naumann, 1993} \\ 1 + \frac{Re_t^{2/3}}{6} & Re_t < 1000 & \text{Putnam, 1961} \\ 0.0183 Re_t & 1000 \leq Re_t < 3 * 10^5 & \text{Putnam, 1961} \end{cases}$$

-Akışkanın hareketinden dolayı oluşan kaldırma kuvveti: Akışkanın hız gradyenlerinden dolayı oluşur. Kaynaklarda iki şekilde görülür (Haverkort ve diğ., 2009b).

- *Faxen kuvveti*: Üzerinde çalışılan kanal yarı yüksekliği h olmak üzere $Re_t < 1$ ve $\bar{D} < 1$ için Denklem (3.13)'deki gibi ifade edilir.

$$\mathbf{F}_K = 1.05235 \bar{D} \mathbf{F}_D \quad (3.13)$$

$\bar{D} = D_t/h$: Tanecik çapının kanal yarı yüksekliğine bölümü

- *Saffman kuvveti*: Kanal merkezinden s kadar uzaklıkta bir noktada oluşan kaldırma kuvveti $Re_t < 1$, kanal Re sayısı $Re \gg 1/\bar{s}$ ve $K=1.61$ için Denklem (3.14)'de verilmiştir.

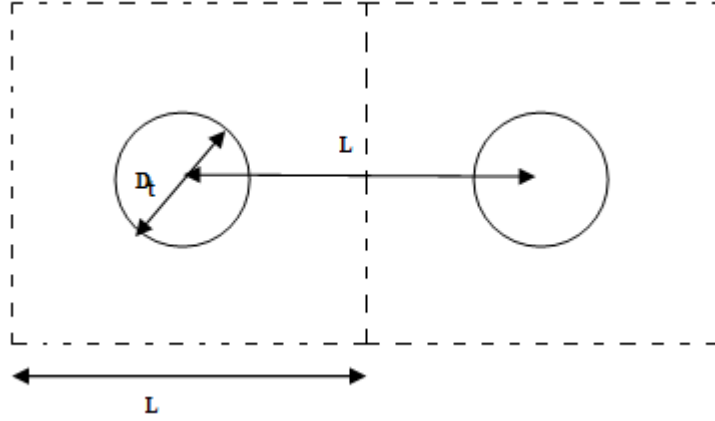
$$\mathbf{F}_K = \left(K / (3\sqrt{2\pi}) \right) \sqrt{Re_t \bar{D} \bar{s}} \mathbf{F}_D \quad (3.14)$$

$K=1.61$

$\bar{s}$: Taneciğin kanal merkezine olan uzaklığının kanal yarı yüksekliğine oranı

$Re_t < 1$ ve $\bar{D} < 1$ için kaldırma kuvvetleri ihmal edilebilir (Haverkort, 2009b).

-*Tanecik tanecik etkileşimi:* Ayrık faz akışlarda ayrık faz elemanları arasındaki ortalama mesafe tanecikler arası kuvvetlerde belirleyici bir rol oynar. Şekil 3.1’de taneciğin L kenarlı bir küp içinde yer aldığı kabul edilir. L uzunluğu aynı zamanda sıvı veya katı taneciğin tek bir eleman veya etrafındaki elemanlardan izole edildiği kabulü için gerekli uzunluk olup Denklem (3.15) yardımıyla belirlenir. Bu denklemin sağlanması taneciğin etrafındaki taneciklerden etkilenmediği ve tanecikler arası çarpışmaların ihmal edilebileceği anlamını taşır.



Şekil 3.1 : Tanecikler arası konumlanma (Crowe ve diğ., 1998).

$$\frac{L}{D_t} = \left(\frac{\pi}{6\alpha_t} \right)^{1/3} \quad (3.15)$$

-*Manyetik kuvvet: Kelvin kuvveti:* Asıltı içerisindeki bir tanecik üzerine uygulanan manyetik kuvvet ifadesi Denklem (3.16)’da verilmiştir.

$$\mathbf{F}_m = \mu_0 * V_t * \frac{3(\chi_t - \chi_s)}{(\chi_t - \chi_s) + 3} (\mathbf{H}_a \cdot \nabla) \mathbf{H}_a \quad (3.16)$$

χ_t : Taneciğin hacimsel manyetik duyarlılığı

χ_s : Akışkanın hacimsel manyetik duyarlılığı. Su için $\chi_s = -9.035 \cdot 10^{-6}$

μ_0 : Boşluğun manyetik geçirgenliği = $4\pi * 10^{-7} \text{ W/(A.m)}$

V_t : Tanecik hacmi (m^3)

$\mathbf{H}_a$: Mıknatıs tarafından taneciğin merkezine uygulanan manyetik alan şiddeti vektörü (A/m)

Manyetik kuvvet belirlenirken $\mathbf{H}_a$ ve taneciğe özgü bir sabit olan χ_t değerlerinin saptanması gerekmektedir. $\mathbf{H}_a$ vektörü için Denklem (3.17)’de verildiği gibi ilk olarak x, y ve z konumlarındaki manyetik alan şiddetleri belirlenmelidir.

$$\mathbf{H}_a = H_{ax}\mathbf{i} + H_{ay}\mathbf{j} + H_{az}\mathbf{k} \quad (3.17)$$

Bu çalışmada üçüncü boyut olan yükseklik boyunca oluşan manyetik alan şiddeti değişimi (H_{az}) ayırmanın x,y düzleminde yapıldığı göz önüne alınarak ihmal edilmiş ve modelleme boyunca iki boyutlu kabulü yapılarak işlem yapılmıştır.

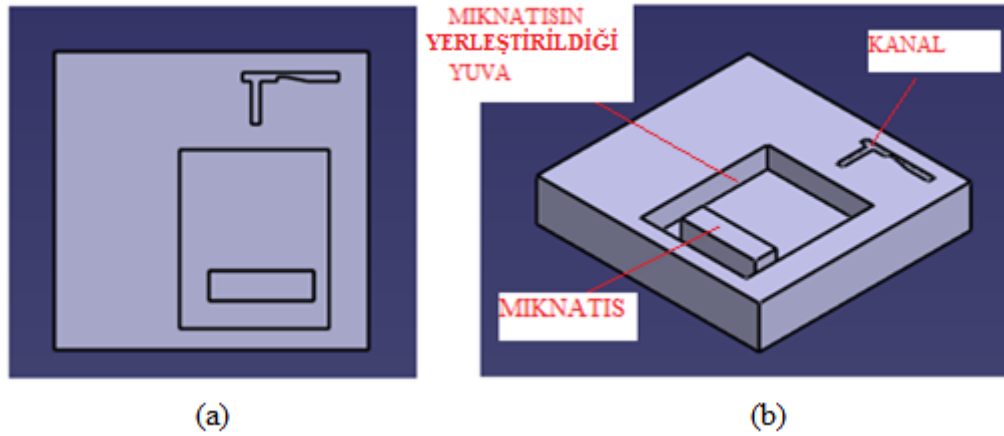
Buraya kadar verilmiş olan kanal, tanecik ve akış özelliklerinden hareketle, bu çalışma kapsamında ele alınmış olan koşullar, boyutlu-boyutsuz sayılar cinsinden Çizelge 3.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.2 : Çalışmada kullanılan parametreler ve değerleri.

D_t (μm)	ρ_t (kg/m^3)	α_t	ρ_t/ρ	L/D_t	Kanal giriş kesiti (mm^2)	D_h (mm)	D_t/D_h	Giriş hızı (mm)	Re
20	6586	$3.34991 \cdot 10^{-4}$	6.586	11.6	1.8	1	20	1-10	1-10

3.1.3 Tanecikli akışta manyetik alanın modellenmesi

Manyetik kuvvetin belirtilmesi ile tanecik üzerine etkiyen kuvvetler saptanmış olur. Bu bölümde manyetik kuvvetin modellemede nasıl kullanılacağına değinilmiş; deneysel ve sayısal modellemede tasarlanan mıknatıs ile kanal yerleşimi Şekil 3.2’de verilmiştir.

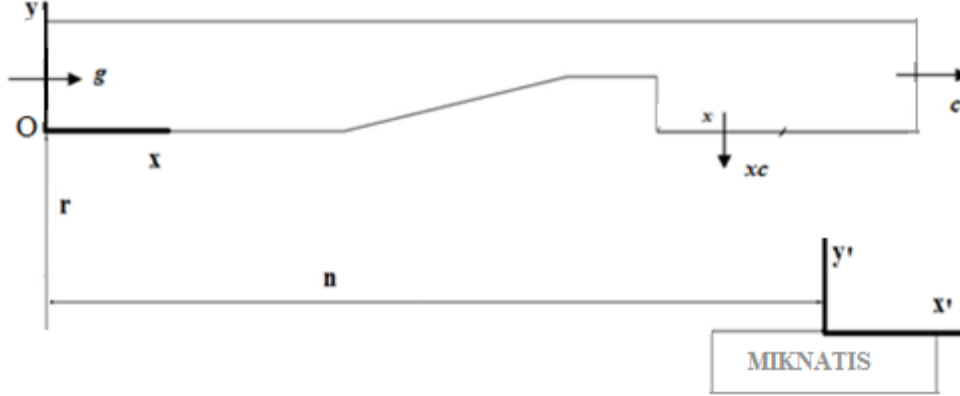


Şekil 3.2 : Kanal ve mıknatısın yerleşimi: (a) Üstten görünüş. (b) İzometrik görünüş.

Mıknatıs konumu Şekil 3.3’ de verildiği gibi r ve n parametrelerine bağlı olarak belirtilmiştir. r ve n ile ilgili daha geniş bilgi sonuçlar bölümünde verilmekle beraber Çizelge 3.3’ de r ve n’nin aldığı değerler verilmiştir. Burada r ve n mıknatıs ile kanal merkez noktalarının birbirine uzaklıklarının mm cinsinden değerini göstermektedir.

Çizelge 3.3 : r-n parametrelerine bağlı mıknatıs konumu.

Mıknatıs no	1	2	3	4	5	6	7
r (mm)	15	15	30	30	30	30	40
n (mm)	25	40	40	45	50	55	50



Şekil 3.3 : Modellemede kullanılan kanalın üstten görünüşü.

Mıknatısın N kutbu kanal yüksekliğiyle paralel olacak şekilde yerleştirilmiştir. Sayısal çözümlemede kullanılan manyetik kuvvet Denklem (3.16)'da verilmiş olup Fluent programına C programında yazılmış EK.C'de örneği verilen UDF ile girilmiştir.

UDF yazımında verilen kuvvet ifadesinde bazı değerlere ihtiyaç olduğu görülür. İkinci bölümde manyetik alan yoğunluğu ifadesi verilmişken bu bölümde manyetik alan şiddeti kullanılmaktadır. Mıknatıs dışındaki manyetik alan yoğunluğu manyetik alan şiddeti ile boşluk geçirgenliğinin çarpımından bulunur.

Manyetik alan yoğunluğu Denklem (2.7a) – (2.9b)'den elde edilir. Buradan da manyetik alan şiddetine geçilir.

Denklem (3.16)'da gerekli düzenlemeler yapıp bilinen değerler yerine konulduğunda denklemin çözülebilmesi için geriye belirtilmesi veya belirlenmesi gereken X_t sabiti kaldığı görülür.

X_t taneciğe özgü bir sabit olup bilinen bazı maddeler için kaynaklardan ulaşılabilir (Serway ve Beichner, 2002). Bunun yanında bazı kompozit vb. maddelerin X_t değerleri bilinmemektedir. Bu durumda X_t değerinin belirlenmesi için kaynaklarda yapılan bazı çalışmalara rastlanır (Purwar ve diğ., 2010; Häfeli ve diğ., 2002).

Bu çalışmada kullanılan tanecik için X_t değeri kaynaklarda yer almamaktadır. Bu noktada deneysel ve sayısal modellemelerde kullanılan çelik taneciklerin X_t değeri, maddenin geçirdiği işlemler sonucunda değiştiği de göz önüne alınarak İTÜ Fizik Mühendisliği bünyesinde ölçülmüştür. Taneciğe ait M – H eğrisi sonuçlar bölümünde verilmiştir.

X_t ifadesinin eldesi ile tamamlanan kuvvet teriminin konum ile değişimini veren eğrilere EK.A'dan ulaşılabilir. Bir sonraki kısımda manyetik kuvvetin modellenmesiyle tamamlanan matematik modelin sayısal çözümlemesine geçilir.

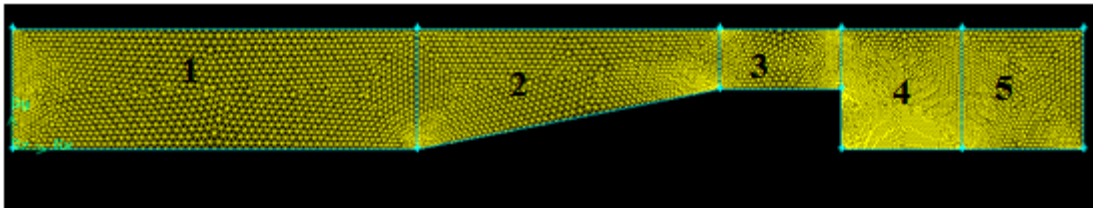
3.2 Sayısal Çözümleme

3.2.1 Ağ yapısı ve kanalda sıvı akışının incelenmesi

Çözümleme yapılırken sonuç bölümünde verilen farklı kanal geometrileri kullanılmakta olup, burada kanallardan Şekil 3.3'de üstten görünüşü verilen kanal geometrisi üzerinde çalışılmıştır.

Ağ yapısı Şekil 3.4'de verilen kanal şekli, Gambit 2.4.6 programıyla çizilip, ardından kanalda önce kenarlara, ardından da yüzeye ağ örülmüştür. Ağ örülürken kanalın düz olmaması, bazı bölgelerde genişleme bazı bölgelerde de daralma göstermesi ve hassas çözüm yapılmak istendiğinden, şekilde verildiği gibi kanal, birbiriyle ve kendi içinde tutarlı beş bölge olarak düşünülmüştür. Duvar olarak belirtilen kenarlarda hız gradyeninin yüksek olması nedeniyle bu noktalarda ağ sıklaştırılmıştır.

Yüzey ağ yapısı için dikdörtgensel yapı kullanılabileceği gibi ağın daha iyi olması ve bölgeden bölgeye (3. ve 4. bölge arasında ağın sıkı olması vb.) farklı sıklıkta olması açısından üçgen ağ yapısı uygun görülmüştür. Belirlenen ağ yapısının akışı en iyi şekilde temsil etmesi ve işlemlerin çabuk çözülmesi için de en az sayıda ağ örgüsü istenir. Bu çalışmada uygulanan ağ yapısının uygunluğu, nokta sayısının artırıldığı halde, akış karakterinde değişim olmadığının gözlemlenmesi sonucunda kabul edilmiştir.



Şekil 3.4 : Modellemede kullanılan kanalın ağ yapısı.

Ağ yapısı tamamlanan sistemde sınır tipleri (duvar, giriş, çıkış vb.) , sınır şartları olarak da girişte hız parametresi (*velocity inlet*), her iki çıkış da atmosfere açıldığından çıkış şartı olarak çıkış basıncı (*pressure outlet*) verilmiştir.

Gambit 2.4.6'da ağın örülmesi, sınır tip ve şartlarının belirtilmesi ile Fluent programındaki modelleme kısmına geçilebilir.

Biçim: 2d, dp, pbns, lam (2d, double precision, pressure-based, laminar)

Modelde kullanılan ve yukarıda ağ örgüsü verilen kanalın ağ yapısında 9414 hücre, 14349 yüzey, 4936 nokta kullanılmıştır.

Grid → *Scale* bölümünden Gambit programında metre olarak yapılan boyutlandırma mm'ye dönüştürülür.

Akış laminar olduğundan Fluent'de *Define* → *Models*'da herhangi bir değişiklik yapmaya gerek yoktur (viskoz seçeneği Fluent tarafından başta atanmıştır). *Define* → *Materials*'da akışkan olarak su seçilir. *Define* → *Boundary Conditions* seçeneğinde giriş için giriş hızı, her iki çıkış için de atmosfere açıldıklarından Gauge basıncı sıfır girilir.

Solve → *Controls* → *Solution*'da basınç hız ilişkisi SIMPLE (*Semi-implicit method*), basınç için *Standart*, Momentum *Second order upwind* yapılır ve diğer ifadelerde değişiklik yapılmaz.

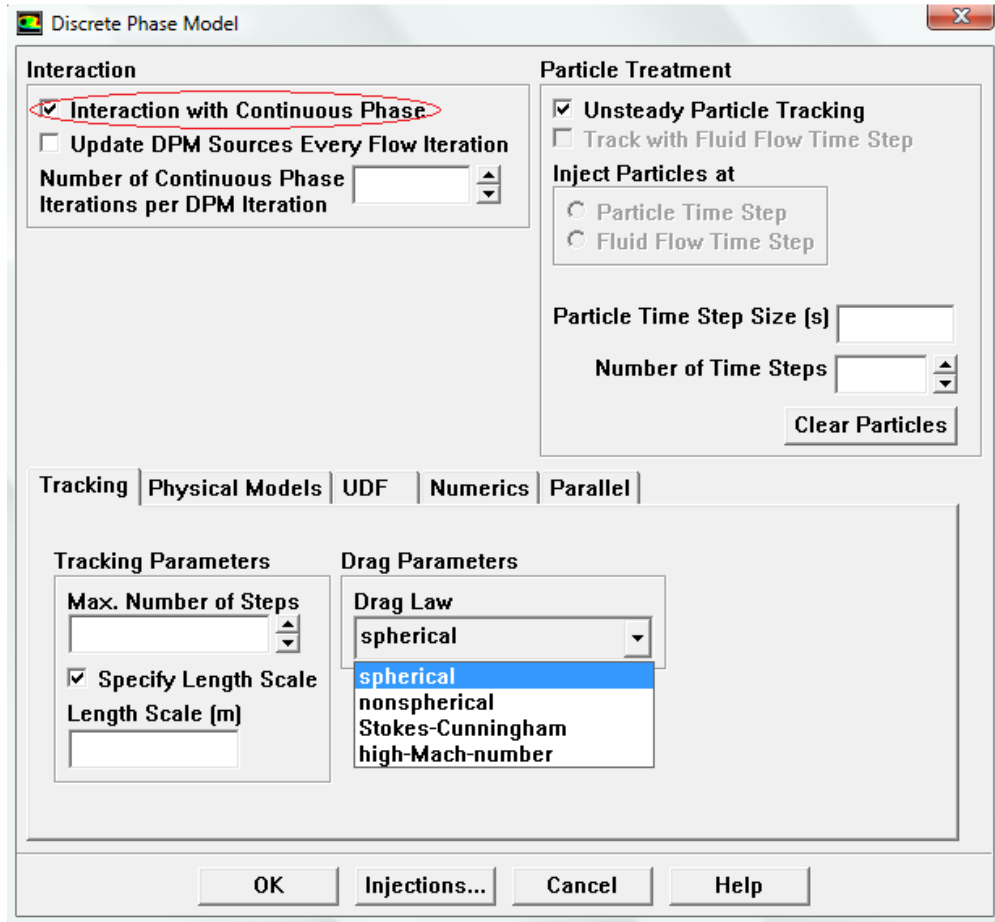
Solve → *Initialize* seçeneğinden giriş seçilerek iterasyonun başlangıç noktası verilmiş olur.

Üst kısımda belirtilen seçimlerle beraber yakınsama şartı sağlanana kadar iterasyon yaptırılır. Sonuçlar bölümünden de görüleceği gibi tanecik beslemeden önce kanalda sadece sıvı olduğu durum için sıvının çıkışları tercih etme yüzdelerine Fluent'de *Report* → *Surface Integrals* → *Mass flow rate*'den ulaşılır. Bu şekilde tanecik ile sıvının benzer davranış sergileyecekleri kabulünden tanecik davranışı hakkında ilk bilgi elde edilir.

3.2.2 Kanal içerisine tanecik beslenmesi

Fluent'de tanecik hareketini belirlemek için seçilen DPM'ye *Define* → *Models* → *DPM* seçeneğiyle geçilir. Şekil 3.5'de verilen pencerenin sol üst köşesinde elips içine alınan ve sıvı ile taneciğin etkileşimde olup olmadığının belirlendiği *interaction*

with continuous phase seçeneği bulunmaktadır. Butonun seçilmesi ile çözümün bağımlı model ile yapılacağı, dolayısıyla tanecik ile sıvının etkileşimli olduğu kabulü yapılmış olur. Seçimle beraber gelen pencerede sıvı ile tanecik arasındaki etkileşimi belirleyen *Number of Continuous Phase Iterations per DPM Iteration* ifadesi belirir. Buraya girilen değer, sıvı için yapılan kaç iterasyon sonunda bir tanecik iterasyonu yapılacağına karşılık gelir. Parametre belirlenirken tanecik ile sıvının birbirleriyle etkileşimi göz önüne alınmalıdır. Sürekli faz zamandan bağımsızsa bu değer yüksek seçilmesi önerilmektedir (Fluent).



Şekil 3.5 : DPM penceresi.

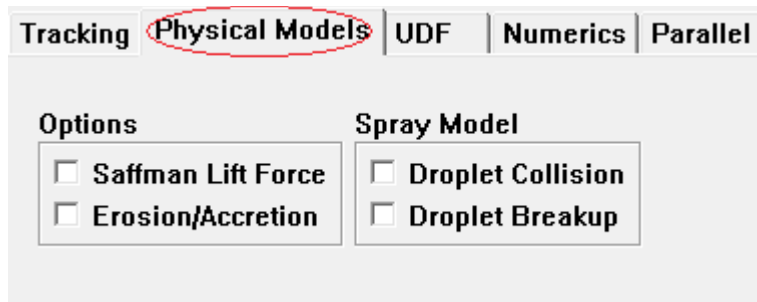
DPM’de sıvının ve taneciğin hareketleri zamana bağlı veya zamandan bağımsız olabileceği gibi sıvı zamandan bağımsız tanecik zamana bağlı olabilir. Şekil 3.5’ de sıvının zamandan bağımsız, taneciğin zamana bağlı seçilmesiyle *particle time step size*’da tanecik denklemlerinin çözülmesi için kullanılan zaman adımı girilmelidir.

Yapılan bu çalışmada *particle time step size* 1 mm/s giriş hızı için 0.1, diğer hız değerleri için 0.01 olarak belirlenmiştir.

Bazı çalışmalarda tanecikler girdap noktalarına takılır veya kanalda otururlar. Tanecik, girdaptan dışarı çıkamayacağı veya konumunun değişmeyeceği halde Lagrange modelde yeni konumun belirlenmesi için her iterasyonda hesaba katılır. Çözümlerde zaman kaybına neden olmaması için *maximum number of steps* değeri değiştirilir. *Tracking* bölümünün ikinci kısmı zaman parametresiyle ilgilidir. Özellikle uzun kanallarda taneciklerin kanala girişi ile çıkışı arasında uzun zaman olup; kısa zaman sonundaki sonuçlar merak ediliyor olabilir. Bu da *length scale* seçeneğinin değiştirilmesi ile sağlanır.

Yapılan bu çalışmada DPM penceresinde *tracking* seçeneğinden *maximum number of steps* ve *length scale* değerleri taneciklerin hepsi uzun süre izlenmek istendiğinden büyük seçilmiştir.

Şekil 3.6'daki pencerede *drag* parameteresi olarak belirtilen seçenekte tanecik üzerine etkiyen sürüklenme kuvveti belirlenir.



Şekil 3.6 : DPM penceresinde Physical Models seçeneği.

Burada sürüklenme kuvvetinin belirlenmesinde taneciklerin küresel olmalarından dolayı *spherical* seçeneği seçilmiştir. Önceki kısımda tanecik üzerine uygulanan kuvvetler irdelenirken Stoke's ve Oseen'in türettiği sürüklenme kuvvetlerine değinilmişti. Dikkat edilirse bu kuvvetlerde Re_t ifadesi kullanılmaktadır. Re_t ifadesinde sıvı ile tanecik hız farkı çarpanı bulunmaktadır. Kanala girişte ve kanal boyunca tanecik ile sıvının benzer davranış sergileyecekleri dolayısıyla hız değerlerinin çok yakın olacağı tahmin edilebilir fakat bu tahminler yapılırken mıknatıs kuvveti dahil edilmemiştir. Dolayısıyla *drag* seçeneklerinde de yer alan Stoke's kuvvetinin uygun olduğu düşünülse de mıknatıs etkisi göz ardı edilemeyeceğinden *spherical* seçeneği uygun görülmüştür.

Şekil 3.6'da görülen *Physical Models* seçeneğinde Saffman kaldırma kuvvetinin seçilebileceği ve aşınmanın tanecik üzerindeki etkisinin girilebileceği seçenekler yer

alır. *Spray Model*'de sıvı tanecikler için çarpışma seçeneği bulunur. Yukarıda matematik modelde yapılan inceleme sonucunda Saffman kaldırma kuvveti, manyetik ve sürükleme kuvveti yanında merteye olarak düşük kaldığından ihmal edilmiştir. Yapılan bu çalışmada Denklem (3.15)'den L/D_t değeri 11.6 çıkar. Bu değer tanecikler arasındaki etkileşimlerde çarpışma, aşınma vb. etmenlerin ihmal edilebileceği anlamını taşır. Tanecik-tanecik etkileşimlerinin ihmalı için seyreltik asıltı kabulü de yeterlidir (Sinha ve diğ., 2007).

UDF kısmında, tanecik üzerine etkiyen ve *Physical Models*'da yer almayan, sürükleme ve yerçekimi kuvvetleri dışındaki yüzey veya hacim kuvvetleri, C programında yazılarak Fluent'e girilir. Bu çalışmada manyetik kuvvet de hacim kuvveti olarak programa girilmiştir.

Numerics kısmında tanecik hareket denklemlerinin çözümlenmesi için sayısal modeller belirlenir. Model olarak *Trapezoidal*, *Runge Kutta*, *Implicit* seçenekleri bulunmaktadır. Tanecik izleme problemlerinde Fluent programında verilen öneri doğrultusunda *Trapezoidal* seçilmiştir.

Tanecik için ilk şartların ve tanecik özelliklerinin girilmesi için DPM penceresinin alt kısmındaki *injection* ve ardından açılan pencerede *create* butonuna basılır.

Pencerde tanecik için ilk şartlar (asıltının yollanacağı konum, hız vb.), tanecik özellikleri (malzeme, çap vb.) ve enjeksiyon tipi belirtilmelidir.

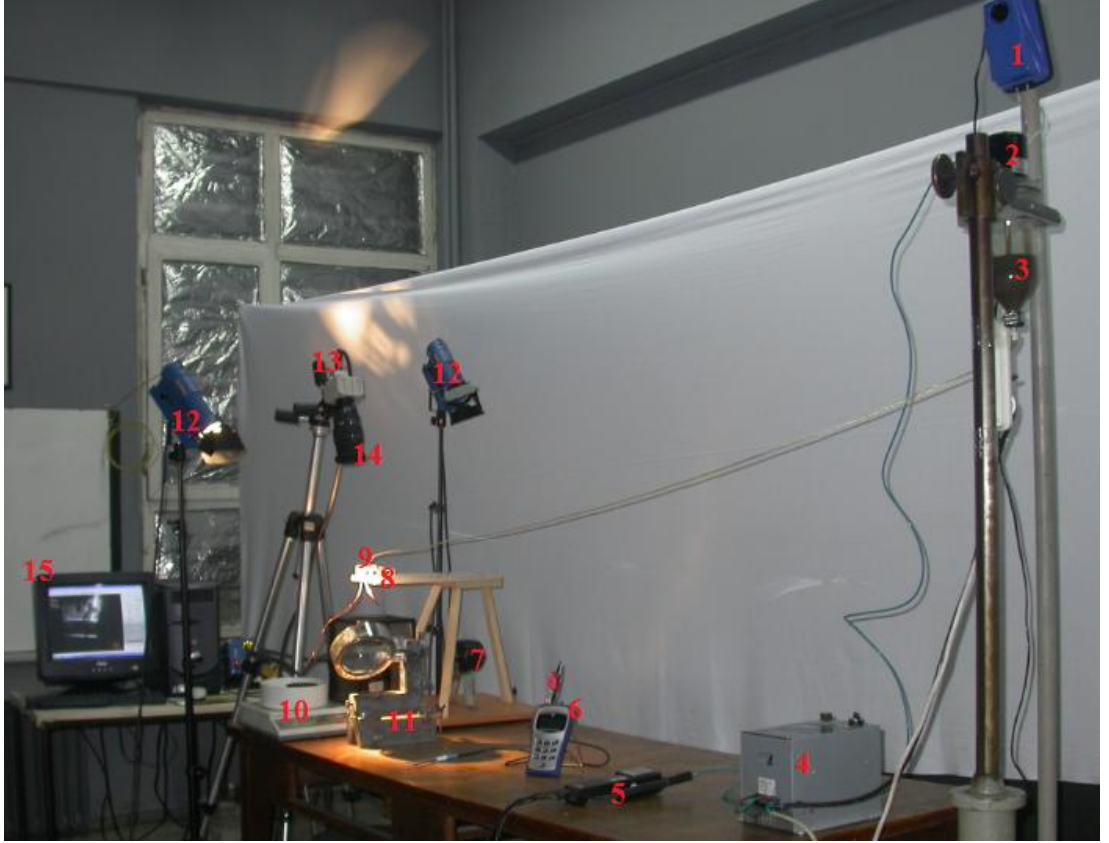
Injection bölümünde *injection type surface* ve giriş seçilmiştir. *Surface* seçeneği seçildiğinde Fluent, girilen kenardaki ağ örgüsünde, ardışık her iki nokta arasını yüzey kabul ederek, her bir yüzeyden bir tanecik yollar. Girişten ne kadar fazla tanecik yollanırsa çözüm doğru fakat bir o kadar da zaman alır. Dolayısıyla giriş ağ sayısı bu iki etmen sonucunda belirlenir.

Bu çalışmada tanecikler Şekil 3.3'de g olarak belirtilen kısımdan giriş yapmaktadırlar. Giriş kısmında 3 mm uzunluk boyunca ağ örülürken 30 nokta belirlenmiştir. Tanecikli akış çözümlemesinde, asıltı giriş bölümüne ulaştığında bu 30 noktanın oluşturduğu her bir yüzeyin orta noktasından bir tanecik yollandığı kabul edilerek işlem yapılır.

Sayısal çözümleme sonucunda sıvının ve taneciklerin çıkışları terk etme miktarlarına bakılmıştır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Sayısal olarak irdelenen sistemin deneysel modeli Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1 : Deneysel modelleme sonucunda hazırlanan düzenek.

Şekilde verilen düzenek, sayısal çözümlemede verilen derişiklikteki tanecik-su asıltısı kanal giriş hızı sağlanılacak şekilde kanaldan geçirildikten sonra, her bir çıkıştaki asıltı miktarından çıkışlardaki debi ve ayrılma yüzdeleri belirlenecek şekilde hazırlanır. Tanecik-su asıltısının kanaldan akışı hızlı kamera aracılığıyla görüntülenerek manyetik alan etkisine geçilir. Mıknatıs, sayısal çözümlemede kullanılan konumlara yerleştirilerek, manyetik etkinin tanecik davranışına etkisi deneysel olarak da görüntülenmeye çalışılır.

Bu bölümde, sayısal çözümlemede verilen giriş şartları sağlanılmaya çalışılarak hazırlanan deneysel düzende kullanılan ve Şekil 4.1’de numaralandırılan aletlerin listesi Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Deney düzeneği bileşenleri.

No	Bileşenler
1	Vakum pompası
2	Homojen karışım elde etme amaçlı kullanılan motor
3	Tanecik-su asıltısı
4	Hazneye bağlı motorun devrini ayarlayıcı
5	Basınç transmitteri
6	Gaussmetre
7	Taneciklerin kanala oturmaması için titreşim yaratmak için kullanılan motor
8	Kanal
9	Mıknatıs
10	Her bir çıkışdaki asıltı miktarlarını tartmak amaçlı kullanılan hassas teraziler
11	Görüntülemeye yansıtma amaçlı kullanılan ayna
12	Işıldak (Projektör) - Dedecoll
13	Hızlı kamera-Photron Fastcam 512 PCI
14	Lens-Sigma 105 mm f/2.8 EX DG Macro Lens
15	Görüntülerin aktarımı için kullanılan bilgisayar

Çalışmada kullanılan donanımlar hakkında ek bilgiler EK.B’de verilmiş olup burada her bir cihazın kullanım amacı ve kullanım yeri belirtilmiştir.

- Dikdörtgen kesitli farklı geometrideki kanallar, işlenebilirliğinin kolay olması, gözlem aşamasında yardımcı olması dolayısıyla plexiglass malzemeden ve İTÜ Makina Fakültesi bünyesinde yapılmışlardır.
- Çalışmada yoğunluğu 6586 kg/m^3 , çapı $20 \text{ }\mu\text{m}$ olan, Şekil B.1’de verilen manyetik tanecikler kullanılmıştır.
- Modellemede tanecik-su asıltısının homojen karışım sergilediği kabul edilmiştir. Bir asıltının homojen kabul edilip edilemeyeceği hakkında bir kesinlik yoktur fakat asıltının homojen sayılabilmesi için, haznenin üst ve alt kısımlarındaki tanecik derişiklikleri arasındaki farkın %20’i geçmemesi şartı aranır (Crowe ve diğ., 1998). Yapılan çalışmada taneciklerin kanala sudan önce koyulmasıyla yoğunluklarından dolayı haznenin alt kısmına oturmaları veya su üstüne eklenmeleriyle yüzey geriliminden dolayı üst kısımda yer almalarından dolayı homojen karışım dışarıdan bir etki olmadan sağlanamaz. Su tanecik asıltısının homojen karışım oluşturması kullanılan haznenin üzerine bağlanan motora bağlanan kanadın karıştırıcı görevi görmesiyle sağlanmıştır.
- Karıştırıcı amacıyla kullanılan motor, yüksek devirlerde emiş yapmaması ve devrinin hassas ayarlanabilmesi için devir ayarlayıcı ile kontrol edilmiştir.

- Hazne girişinde matematik modelde verilen giriş hızlarının elde edilebilmesi için düşük debi istenir. Hazne içinde bulunan sıvının istenen düşük debiyi sağlaması için içteki basıncın düşük tutulması gerekmektedir. Debi ayarı için haznenin üst kısmına vakum yapması amaçlı emme tarafı hazneye bağlanan vakum pompası takılmıştır.
- Hazne içindeki basınç ile kanalın çıkışlarının açıldığı atmosfer basıncı arasındaki fark hazneyle arasında bir hortum aracılığıyla bağlantı kurulan basınç transmitteri ile ölçülür. Cihaz iki çıkışlı olup bir çıkışı atmosfere açık diğer çıkışı ise hazneye bağlanmıştır. Basınç transmitteri ile ölçüm sonucunda çıkan değer doğrultusunda vakum pompasının emme miktarı arttırılır veya azaltılır.
- Kanal çıkışlarının altına her bir çıkıştan akan asıltı miktarlarının ölçümü için hassas teraziler yerleştirilmiştir. Teraziler aracılığıyla çıkış miktarları belirlendikten sonra çıkışlardaki ayırım yüzdeleri ve giriş kesiti bilinen kanal için giriş hızı bulunur.
- Ayırma işleminde tanecikler, Magnet Firması tarafından sağlanan 10mm*10mm*35mm ölçülerinde NdFeB sürekli mıknatısı tarafından yönlendirilmişlerdir.
- Mıknatısın manyetik alan şiddeti F.W.BELL 5180 Gauss/Tesla Meter aracılığıyla saptanmıştır. Sonuçlar bölümünde de değinileceği üzere Gaussmetre teoriiyi sınamak amacıyla kullanılmıştır.
- Deneysel gözlemlerde Photron Fastcam 512 PCI hızlı kamera aracılığıyla 250 fps ile elde edilen görüntüler .avi ve .jpg formatında kaydedilmiştir. Kanala iyi odaklanması için Sigma 105mm f/2.8 EX DG Macro Lens kullanılırken taneciklerin iyi görüntülenmesi için üstten ışıklandırma alttan ise yansıtma yapılmıştır.
- Düzenekte iki motor kullanılmıştır. Bunlardan birine yukarıda değinilmiş olup diğeri ise kanalın oturduğu tablaya sabitlenen ve titreşim yapması amacıyla kullanılmıştır. Sayısal çözümleme yapılırken iki boyutlu kabulü yapılarak yerçekimi kuvveti ihmal edilmiştir. Taneciklerin 6586 kg/m³ yoğunlukta oldukları göz önüne alınınca yerçekimi kuvvetinin ihmal edilemeyeceği görülür fakat deneysel çalışmada bu kuvvete denk ters

kuvvetle matematik modellemedeki kabulün yapılabileceği saptanmıştır. Bu amaçla ikinci motor taneciklerin kanala oturumunu dolayısıyla bu yüzden oluşabilecek tıkanmaları engellemiştir.

Yapılan bu iyileştirme ile manyetik alan uygulanmadığı takdirde, rampayı geçen asıltının büyük bir kısmının, Şekil 5.1a'da gösterildiği gibi, kesit daraltılarak yönlendirildiği taraftaki çıkışı (1 nolu çıkış) tercih edeceği; manyetik alan uygulandığında da, akışa dik yönde oluşan manyetik kuvvet etkisi altında, taneciklerin büyük kısmının, Şekil 5.1b'deki gibi 2 nolu çıkışa yönlenecekleri düşünülmüştür. Rampanın girişten uzaklığı (d), rampa uzunluğu (e) ve rampa ile çıkışlar arasındaki uzaklık (f) parametre olarak alınıp, kaynaklardaki bağıntılar kullanılarak ve sayısal çözümleme ile en verimli ayırma işlemi yapan düzenleme elde edilmeye çalışılmıştır. İlk olarak d mesafesi için tam gelişmiş akışın olduğu asgari uzunluk saptanmıştır.

Kanal içinde laminer akışta, hidrodinamik giriş uzunluğu $\frac{L_e}{D_h} \approx 0.06 Re$ bağıntısı ile elde edilir. Burada L_e : tam gelişmiş akış için gerekli en az uzunluk (hidrodinamik giriş uzunluğu - m), D_h : hidrolik çap (m) anlamına gelmektedir (Langhaar, 1942).

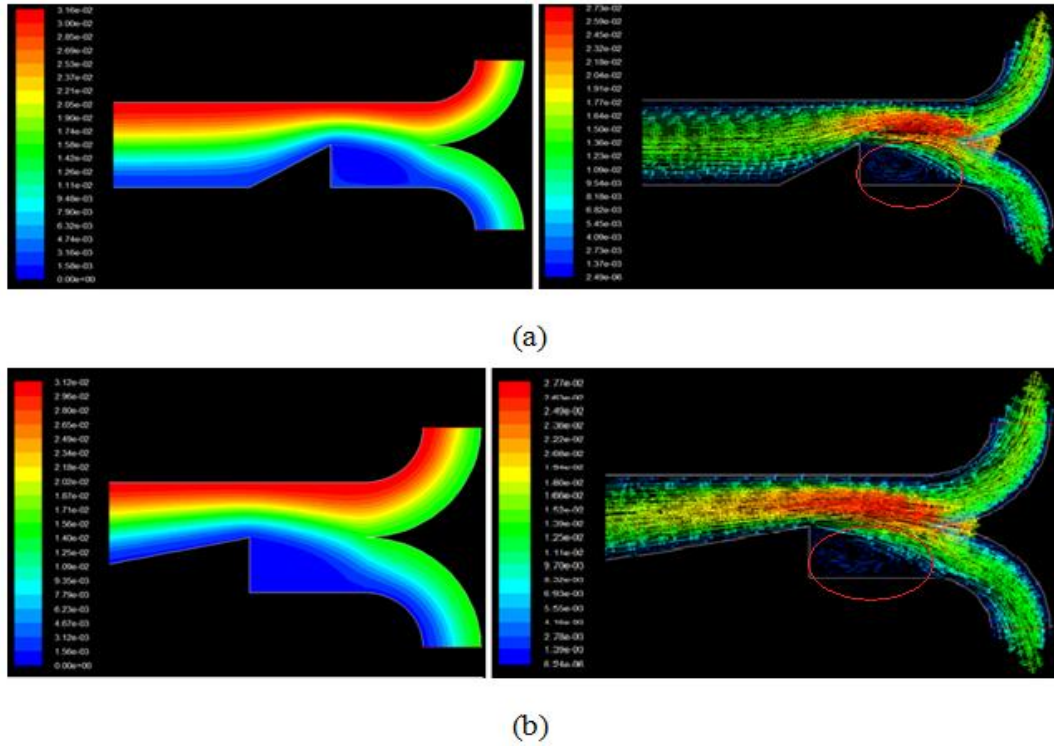
Giriş kesiti 3mm*0.6mm, hidrolik çapı 1 mm ve giriş hızı 10 mm/s şartlarında Re sayısı 10 olan kanalda tam gelişmiş akış için en az 0.6 mm giriş uzunluğuna ihtiyaç vardır. Bunun yanında giriş uzunluğunun saptanması için kanalda tanecikli akış ve mıknatıs etkisi de göz önüne alınmalıdır. Giriş uzunluğunun yeterli olmaması durumunda tanecikler, mıknatıs kuvvetinin etkisiyle girişte yığılmalara neden olabilir. Bu sonucun gözlenmemesi ve manyetik etkiyle kanala oturan taneciklerin diğer taneciklerin davranışlarında olumsuz etki yapmaması için giriş uzunluğunun 10 mm olması uygun görülmüştür.

Kanal geometrisinin tam olarak belirlenebilmesi için Şekil 5.1'de e ve f olarak verilen parametrelerin değişiminin ayırmaya etkisi irdelenmiştir. Aşağıda kanal geometrisinin son şeklini alana kadar yapılan incelemeler anlatılmıştır. İncelemeler, asıltının laminer ve seyreltik olmasından dolayı taneciklerin sıvı ile benzer davranış sergileyecekleri kabul edilerek kanalda sadece sıvı olması ve kanala giriş hızının 10 mm/s olduğu durum için yapılmıştır.

İnceleme1:

d parametresinin 10 mm olarak belirlendiği, rampa ile çıkışlar arasındaki uzaklığın (f) 3 mm olduğu kanal için farklı rampa uzunluklarının (e) ayırmaya etkisi saptanmaya çalışılmıştır. Bu doğrultuda f=3 mm olduğunda, e'nin 1.5 mm ve 7.5 mm olduğu durumlar incelenmiş ve sonuçlar Şekil 5.2'de verilmiştir. Şekillerde, rampa

ardındaki kısmın daha iyi gözlenmesi için kanalın tamamı yerine, ayırmanın asıl etkilendiği bölüm verilmiştir.

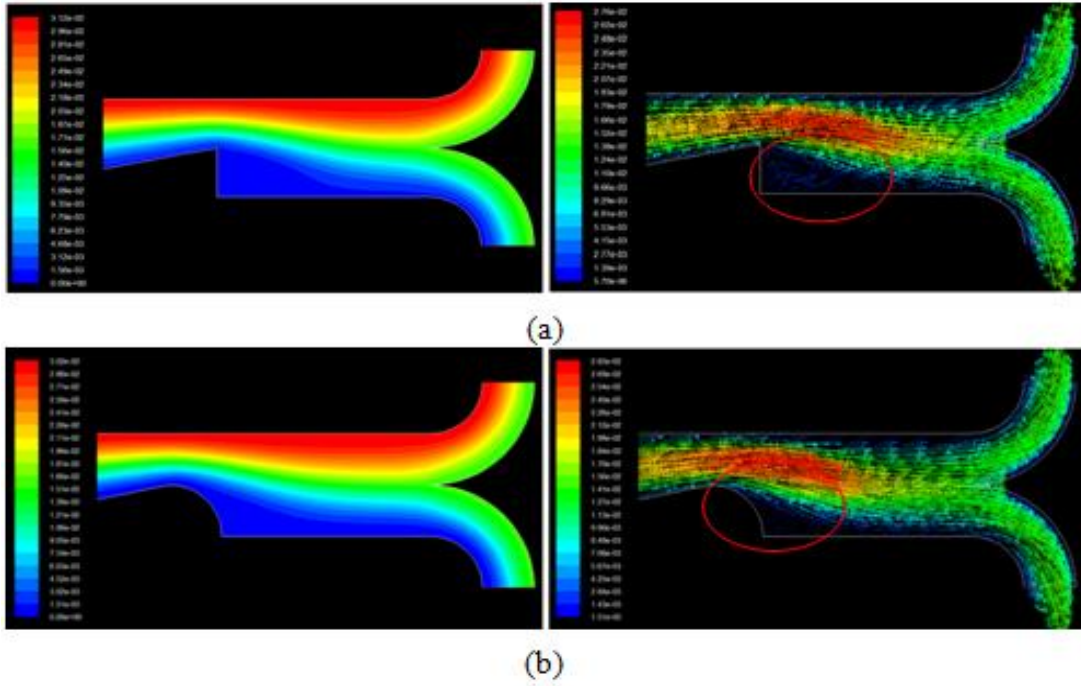


Şekil 5.2 : $f=3\text{mm}$ için farklı e değerlerine karşılık gelen akım fonksiyonu konturleri-hız vektörleri (a) $e=1.5\text{ mm}$. (b) $e=7.5\text{ mm}$.

Kanal geometrisi belirlenirken, taneciklerin mıknatıs tarafından çekilmesi ile maksimum miktarda taneciğin sıvıdan ayrılarak 2 çıkışı tercih etmesi amaçlanır. Dolayısıyla manyetik etki olamaması durumunda iki çıkıştan çıkan miktarların birbirlerinden olabildiğince farklı (% 70'e % 30 vb.) ve oran olarak büyük olanın 1 çıkışına yönelmesi istenir. Şekilde verilen her iki kanal için de sıvının yaklaşık % 45'i 2 çıkışı tercih etmektedir. Bu değer istenen ayırma için uygun olmamasının yanında, verilen hız vektörlerinden rampanın hemen ardındaki keskin köşelerde girdap oluştuğu görülür. Girdap bölgesi, ölü bölge olarak düşünülüp, bu bölgeye giren taneciklerin ayrılamayacağı göz önüne alınarak; bir sonraki incelemede, kanallarda girdap etkisi giderilmeye ve her iki çıkıştaki ayırma yüzdeleri farkı artırılmaya çalışılmıştır.

İnceleme2:

Önceki incelemede karşılaşılan girdap etkisinin iki şekilde giderilebileceği düşünülmüştür. Şekil 5.3'de girdap etkisinin azaltılması amacıyla yeni kanal geometrisi üzerinde yapılan sayısal çözümleme sonuçları verilmiştir.



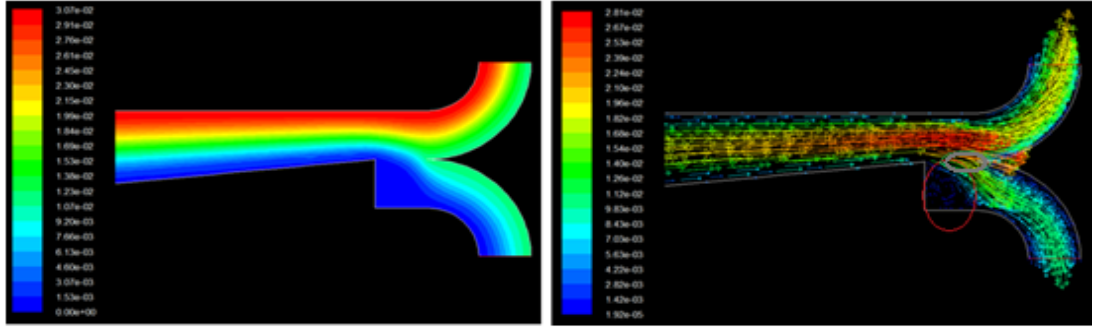
Şekil 5.3 : Girdap etkisinin azaltılması ve 1 çıkışını tercih eden asıltı miktarını arttırmak için düşünülen kanallarda sayısal çözümler sonucunda elde edilen suya ait akım fonksiyonu konturleri-hız vektörleri (a)e=7.5 mm, f=6 mm (b) e=7.5 mm, f=6 mm ve rampa keskin köşesine yuvarlatma biçimi verilmesi.

e=7.5 mm’de sabit tutularak, Şekil 5.3a’da f uzunluğu arttırılmış, Şekil 5.3b’de ise yeni f değerinde rampa üst keskin köşesine yuvarlatma biçimi verilmiştir.

Şekil 5.3a ile Şekil 5.2b karşılaştırıldığında f uzunluğunun değişiminin girdap üzerinde görünür bir etki yaratmadığı söylenebilir. Aynı kanal şekilleri için çıkış yüzdelere bakıldığında ise rampanın üst köşesinde kesitin daraltılmasından dolayı hızı yüksek olan sıvının, f uzunluğunun artması ile çıkışlara ulaşıncaya dek yavaşladığı ve bu etki ile sıvının *İnceleme1*’e göre 2 nolu çıkışı tercih etme yüzdesinde artış olduğu görülür. Şekil 5.3b’de ise rampa üst keskin köşesine verilen yuvarlatma biçiminin girdap etkisini azalttığı fakat çıkış yüzdelere bakıldığında sıvı, Şekil 5.3a’da olduğu gibi, 2 nolu çıkışa yönelmiştir. Şekil 5.3’deki her iki kanalda sıvı, çıkışları % 50’e yakın oranda terk etmiştir.

İnceleme3:

Önceki incelemelerden f uzunluğunun girdap üzerinde etkisinin pek olmadığı fakat ayırma üzerinde etkisi olduğu saptanmıştır. Bu noktada f’nin azaltılmasının ayırma üzerinde ne tür sonuçlar doğuracağı incelenmiştir. Şekil 5.4’de e=15 mm ve f=1.5 mm için çözümleme yapılmıştır.



Şekil 5.4 : $e=15$ mm, $f=1.5$ mm uzunluklarına sahip kanalda yapılan sayısal çözümleme sonucunda suya ait akım fonksiyonu konturleri-hız vektörleri.

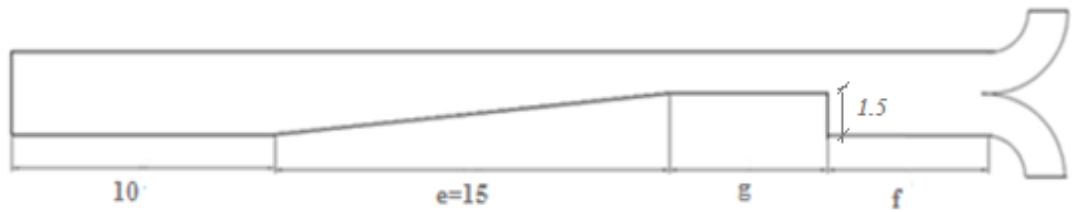
Şekil 5.4'den girdap etkisinin sürdüğü, bunun yanında 2 çıkışını tercih eden sıvı için, f 'deki azalma ve girdap etkisiyle ayrılma noktasında (gri renkli yuvarlak içine alınan kısım) çıkış uzunluğunun az olmasından dolayı, çıkışlara yönelen sıvı yüzde olarak 1 çıkışını daha fazla tercih etmiştir. Burada debisel olarak suyun % 35'i 2 çıkışına yönelmiştir.

Şekil 5.4'den 2 çıkışına yönelimde, girdap dışında kalan bölgenin kısa olmasının tanecik oturmaları sonucunda çıkışı tamamen kapatacağı veya elips içine alınan bölgede yüksek basınç oluşturarak; taneciklerin, 1 nolu çıkışa yönelimine neden olabileceği hesaba katılmalıdır (Modak ve diğ., 2009).

*İnceleme3'*de ayırma oranında iyi sonuç alınsa da manyetik alan uygulanmasında sorun yaşanmaması için f 'nin 1.5 mm alınmaması gerekli görülmüştür.

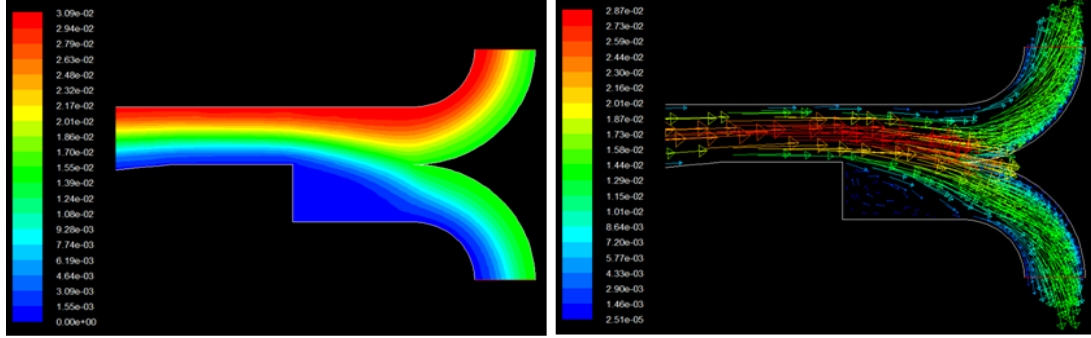
İnceleme4:

Önceki sonuçlar ve Şekil 5.3b'den rampa üst keskin köşesine yuvarlak biçim verilmesinin sıvının 2 çıkışına yönelimini arttırdığı tespit edilmiştir. Bunun sonucunda dar kesitin uzatılmasının (g), köşedeki hızı düzenleyeceği ve sıvıyı 1 çıkışına yönlendireceği düşünülerek ayırma için Şekil 5.5'de verilen kanal geometrisi tasarlanmıştır.

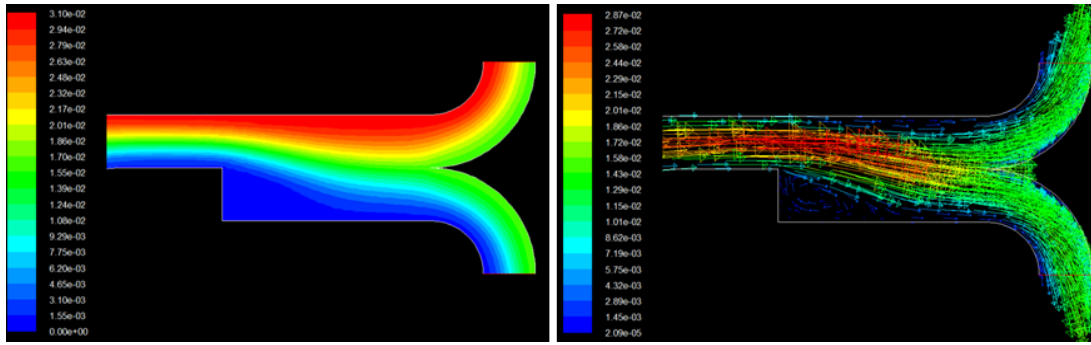


Şekil 5.5 : Çıkışlar arasındaki ayırma yüzde farkını arttırmak amaçlı rampa üst köşesindeki dar kesitin g kadar uzatılması.

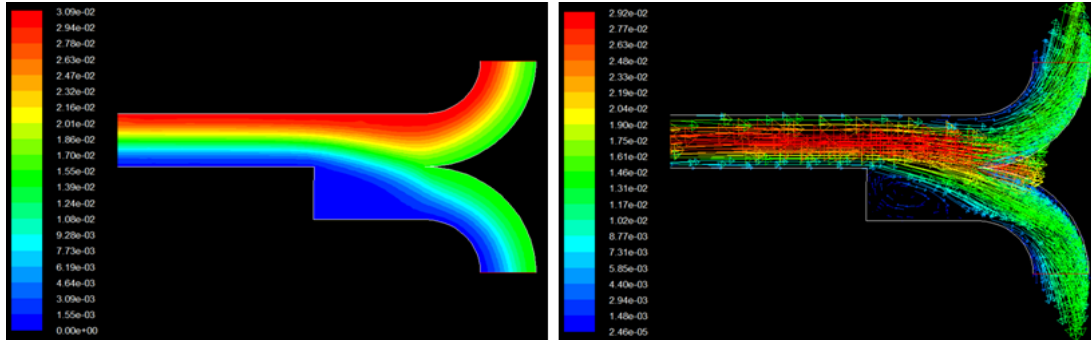
Şekil 5.6’da sayısal çözümler sonucunda elde edilen akım fonksiyonu konturleri ve suya ait hız vektörleri verilmiştir.



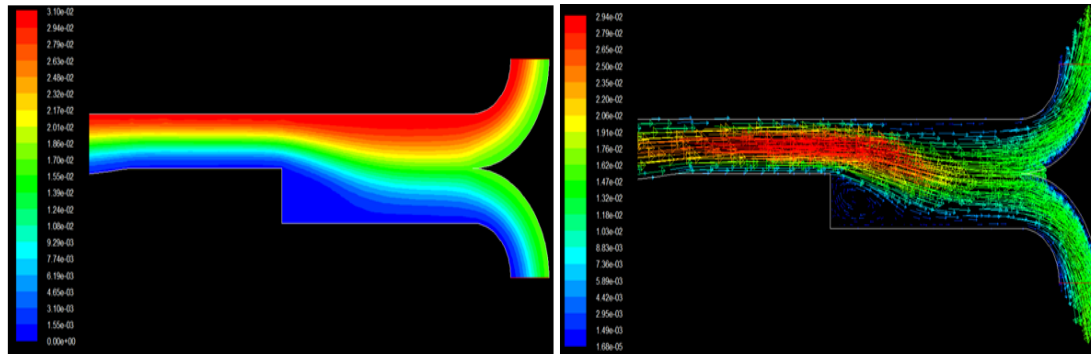
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.6 : $e=15$ mm için farklı g ve f değerlerinde elde edilen akım fonksiyonu konturleri-hız vektörleri (a) $g=3$ mm, $f=3$ mm (b) $g=3$ mm, $f=6$ mm (c) $g=6$ mm, $f=3$ mm (d) $g=6$ mm, $f=6$ mm.

Şekillerden girdap etkisinin devam ettiği görülür. Bir önceki kanalda $f=1.5$ mm durumunda suyun 2 çıkışını tercih etme yüzdesi % 35'lere gerilemiş burada ise yapılan çözümlerden, önceki kanallarla uyumluluk sağlayarak f 'nin artması ile sıvının 2 çıkışına yöneliminin arttığı görülür. g ve f 'nin farklı değerleri için Şekil 5.6'da verilen kanallarda yapılan sayısal çözümleme sonuçlarından 2 çıkışını tercih eden sıvı yüzdesinin en az % 47, en fazla % 50 olduğu saptanmıştır. Yapılan iyileştirmede çıkış yüzdelerinde pek bir fark gözlenmese de $f=3$ mm olan kanallarda, 2 çıkışına yönelimin, $f=6$ mm'ye göre daha az olduğu görülür.

İnceleme5:

Bir önceki incelemede f 'deki değişimin ayırma yüzdelerinde değişikliğe neden olduğu belirlenmişti. Bu doğrultuda, f 'nin ayırmaya etkisinin e 'den daha fazla olduğu saptanmış ve $e=7.5$ mm, $g=3$ mm kabul edilerek Şekil 5.7'de f ve çıkış kanallarının biçimleri değiştirilerek ayırmaya etkileri incelenmiştir.

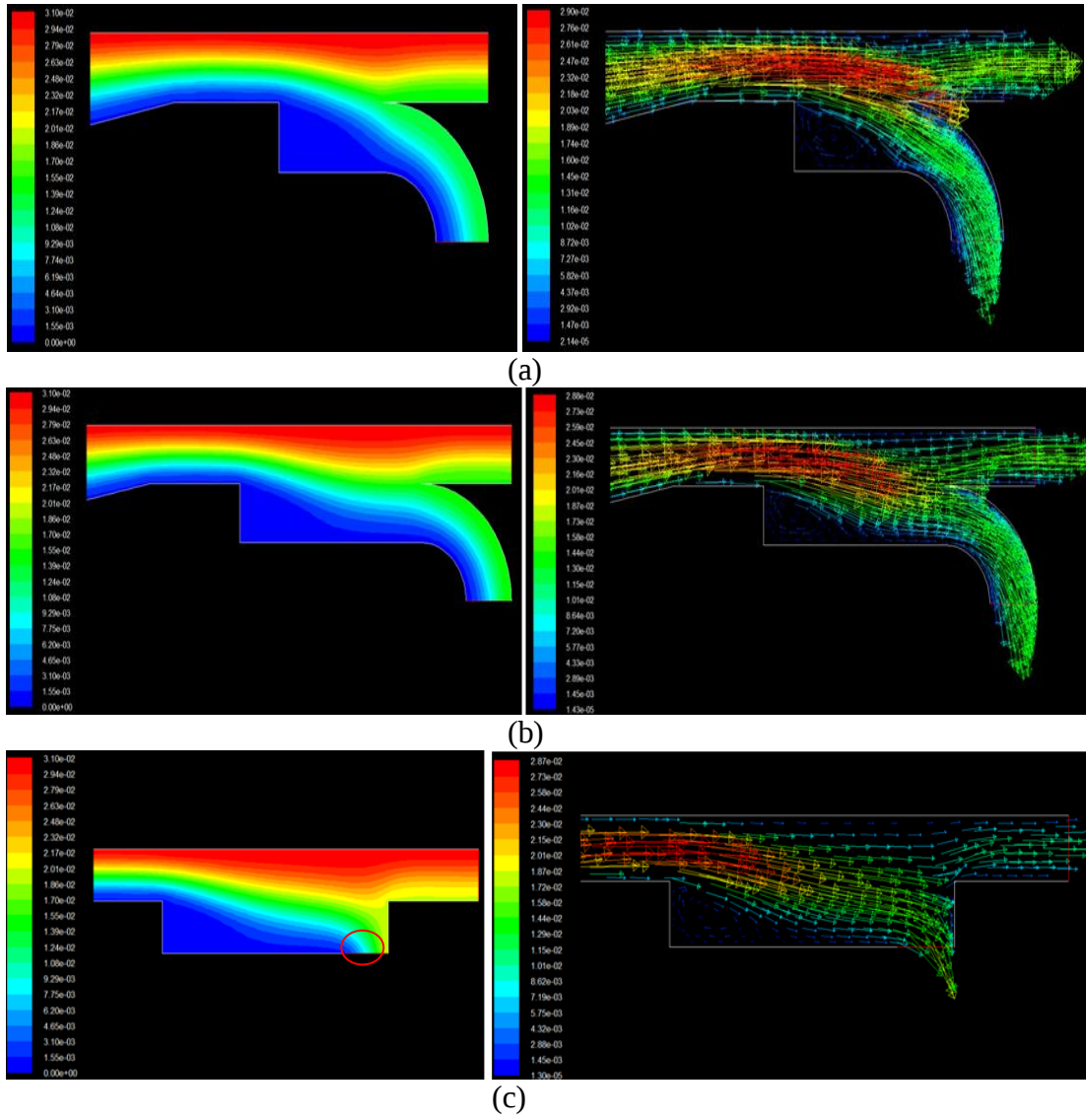
Şekil 5.7a'da önceki incelemelerde kullanılan çıkış kanal geometrilerindeki yuvarlak biçimin, dönme etkisinden dolayı suya karşı direnç oluşturduğu düşünülerek, 1 çıkışı düz tutulmuş, 2 çıkışı üzerinde ise herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Bu iyileştirmeye beraber suyun yaklaşık % 60'ı 1 çıkışını tercih etmiştir.

Şekil 5.7b'de 1 çıkışının belirlenen biçimi için f 'nin ayırmaya etkisi incelenmiştir. Şekilde verilen grafikler ve debi oranından f değerinin arttırılmasının, önceki sonuçlarla tutarlı olarak 1 çıkışında yüzde oranında azalma gözlenmesine (% 60'dan % 53'e düşmüştür), 2 çıkışına yönelimin artmasına neden olduğu sonucu çıkar.

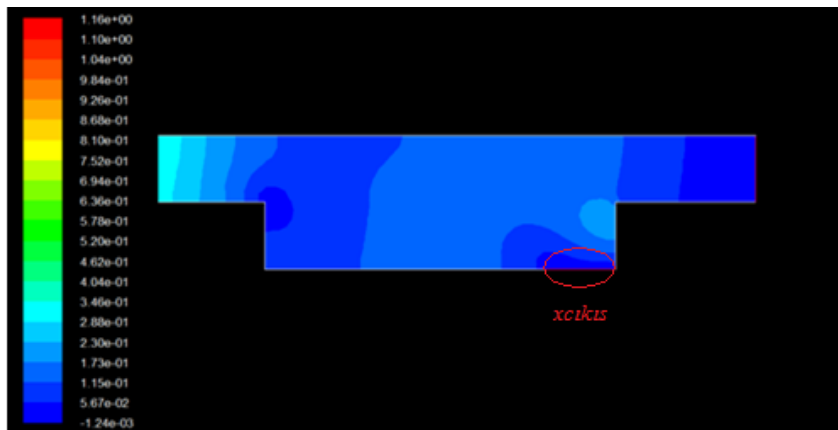
Bu sonuçlardan yola çıkarak Şekil 5.7c'de verildiği gibi çıkışlara yönelen sıvının, 1 çıkışını tercih etmesi için 2 çıkışının f ile aynı y konumuna yerleştirilmesine karar verilmiştir.

Şekil 5.8'de verilen basınç konturlerinden 2 çıkışının ağzında düşük basınç olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla düşük basınç etkisiyle, 2 çıkışında emme etkisi oluşmuş ve sıvının büyük bir kısmı (% 60) buraya yönelmiştir.

Yapılan bu iyileştirmeler istenen ayırma yüzdelerini sağlayamamış bunun yanında 2 çıkışının f ile aynı konuma konmasıyla istenenin tersinde bir ayırma yüzdesi elde edilmiştir. Ayrıca şekillerden çıkış şeklinde yapılan değişikliğin girdabı gidermediği görülebilir.



Şekil 5.7 : Kanal çıkış biçimleri ve f 'nin değişiminin ayırmaya etkisi; akım fonksiyonu konturleri - hız vektörleri $e=7.5$ mm, $g=3$ mm (a)1 çıkışının düzleştirilmesi ve $f=3$ mm (b) 1 çıkışının düzleştirilmesi ve $f=6$ mm (c)her iki çıkış kanal biçiminin değiştirilmesi ve $f=6$ mm.

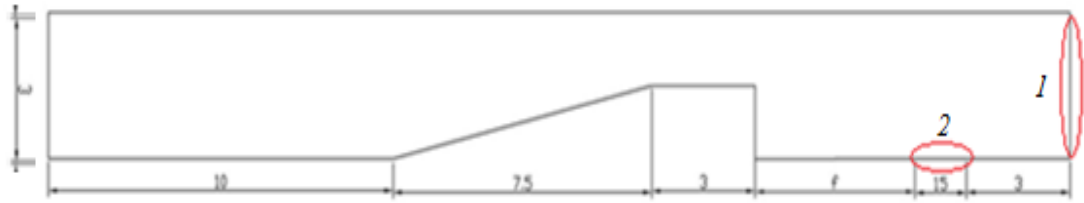


Şekil 5.8 : 2 çıkışının y 'de f ile aynı konuma yerleştirilmesi sonucu kanalda oluşan basınç değişimi.

Inceleme6:

Şekil 5.4'den f 'nin belli bir değerden kısa tutulmasının ayırmada etkin olduğu ve Şekil 5.7c'de sıvının, etrafında direnç etkisi oluşturan çıkış biçimli kanalları daha az tercih edeceği tespit edilmişti. Bu çıkarımlardan 2 çıkışında direnç oluşturacak bir etkinin olması sonucu sıvının 1 çıkışını tercih edeceği düşünülmüştür. Bu doğrultuda 1 çıkışında direnç etkisinin azaltılması veya 2'de direncin arttırılması amacıyla 1'in çıkış uzunluğu 3 mm'ye çıkartılırken 2'ninki 1.5 mm'de sabit tutulmuştur.

Yeni kanal geometrisi Şekil 5.9’da verilmiş olup burada e ve g ayırmada f kadar etkin olmadıkları göz önüne alınarak sabit alınmışlardır.



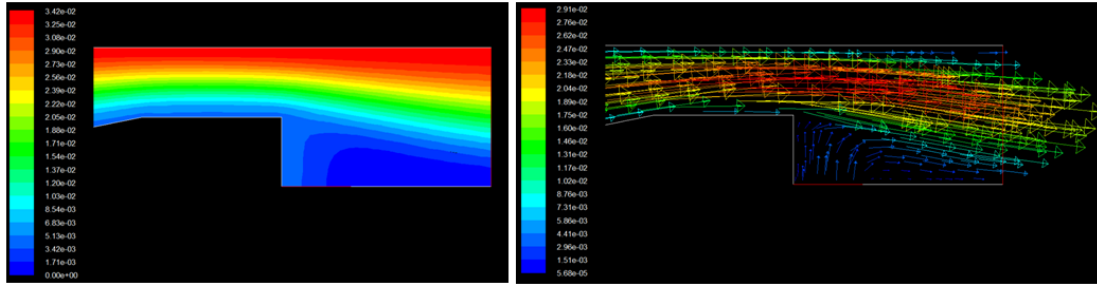
Şekil 5.9 : Sıvının 1 çıkışını tercih etmesi için 2 çıkışında direnç oluşturmak amacıyla tasarlanan kanal geometrisi.

Şekil 5.10'da yeni kanal geometrisi için yapılan sayısal çözümleme sonuçları verilmiştir.

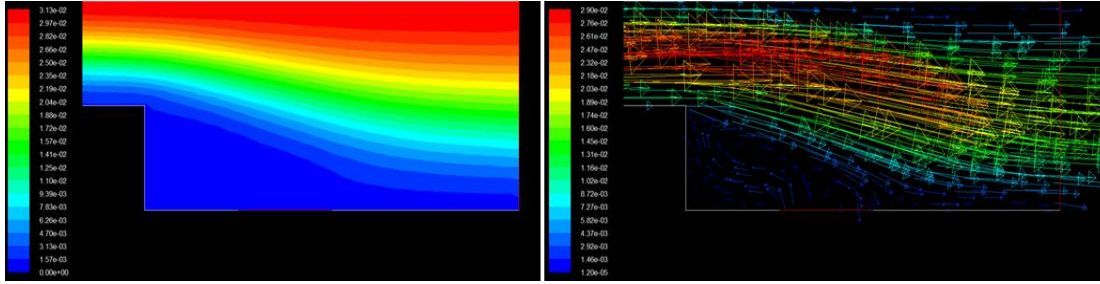
Şekil 5.10a'da 2 çıkışı, dar kesit sonunda oluşan girdap etkisinin sıvı geçişinin 2'ye yönelimini engelleyeceği düşünülerek $f=0$ 'a yerleştirilmiştir. Şekil 5.10b, c, d, e şekillerinde sırasıyla 2 çıkışının f 'den 1.5, 3, 4.5 ve 6 mm uzaklıklara yerleşiminin ayırmaya etkisinin çözümlemeleri verilmiştir.

Önceki incelemelerden, keskin köşe ardında girdap etkisi olduğu bilinmektedir. Bu doğrultuda Şekil 5.10a ve Şekil 5.10b’de düşünülen iyileştirmede, 2 çıkışının girdabın olduğu bölgeye konmasıyla girdabı engelleyeceği aynı zamanda sıvının buradan çıkışını azaltacağı düşünülmüştür. Yapılan bu değişiklik, girdap etkisi ve dar kesitte oluşan yüksek hız nedeniyle, 2 çıkışı ağzından önce düşük basınç yaratmış ve ters akışı da beraberinde getirmiştir.

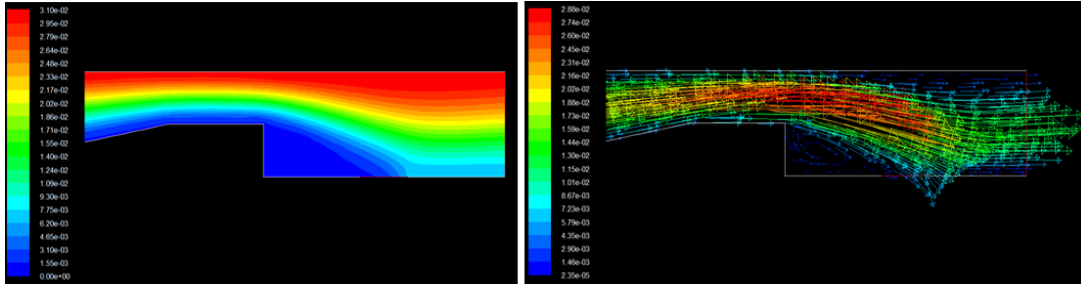
Ters akışı engellemek için f 'ye 3, 4.5 ve 6 mm değerleri verilmiş ve bu değerler için 2 çıkışı tercih eden sıvı oranı % 20 dolaylarında seyretmiştir. *İnceleme6*'da elde edilen sonuçlar, f 'nin 1.5 mm'den küçük olmama şartıyla yapılan incelemeler içinde en yüksek ayırma oran farkı sağlamaktadır.



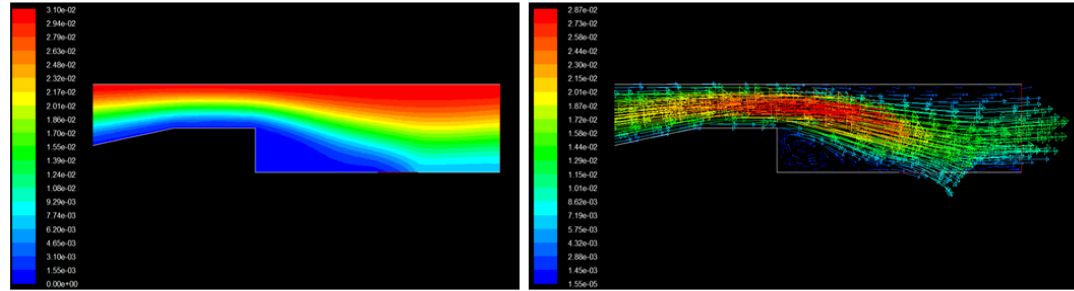
(a)



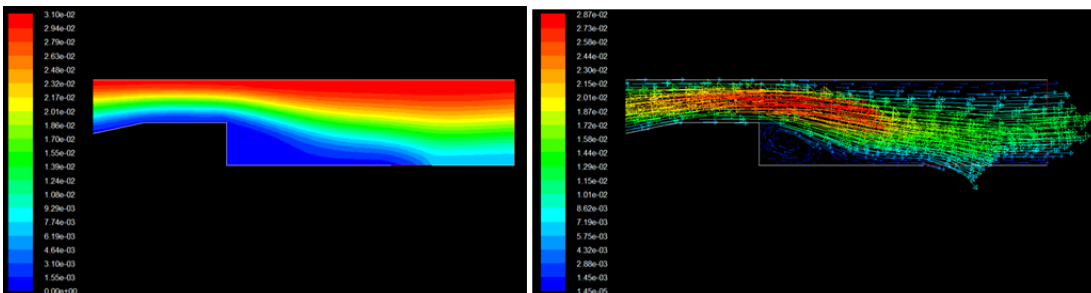
(b)



(c)



(d)

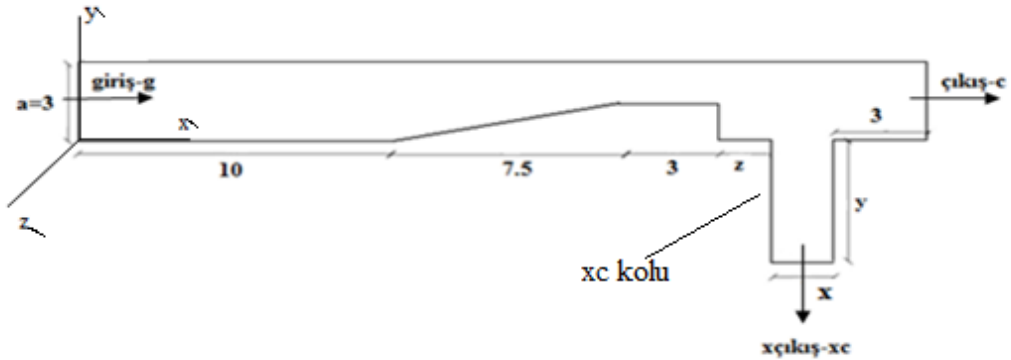


(e)

Şekil 5.10 : Sıvının 1 çıkışı tercih etmesi için 2 çıkışında direnç oluşturmak amacıyla tasarlanan kanallarda farklı f değerlerinde oluşan akım fonksiyonu konturleri-hız vektörleri (a) $f=0$. (b) $f=1.5$ mm.(c) $f=3$ mm. (d) $f=4.5$ mm. (e) $f=6$ mm.

Sunulan bu çalışmada, tanecikler, manyetik alan sonucunda 2 çıkışına yönlendirilmek istenmektedir. Önceki incelemeler doğrultusunda, direnç oluşturmak amaçlı 2 çıkışı uzunluğunun kısa tutulması, 2 çıkışına yönelen taneciklerin çıkış ağzında yığın oluşturmaya neden olur. Dolayısıyla manyetik alan etkisi ile 2 çıkışına yönelen tanecikler, çıkış ağzındaki yığılma kaynaklı oluşan yüksek basınç etkisiyle 1 çıkışını tercih edeceklerdir. Bu doğrultuda *İnceleme6*'da verilen kanalların sıvı ayrımı için iyi sonuçlar verdiği fakat manyetik alan altındaki taneciğin kanalda oturması sonucunda sorun yaratabileceği göz önünde tutularak 2 çıkışının uzunluğu da 3 mm seçilerek kanal geometrisi belirlenmiş olur.

Şimdiye kadar yapılan incelemelerde kanalın genel geometrisinin çıkarılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda öncelikle çıkışlardaki ayırma yüzdelere bakılmış ardından istenen yüzde farkını sağlayan kanallar için de manyetik etki göz önüne alınmıştır. Yapılan altı inceleme sonucunda kararlaştırılan kanal geometrisi Şekil 5.11'de verilmiştir.



Şekil 5.11 : Belirlenen kanal geometrisi.

5.1.2 Belirlenen kanallar içinde sıvı akışı

Bir önceki bölümde laminar ve seyreltik asıltılar için tanecik ile akışkanın benzer davranışlar sergiledikleri belirtilmiş ve bu doğrultuda kanal tasarımına geçilerek bazı incelemeler yapılmıştır.

Geometrisi Şekil 5.11'de verilen, giriş kesiti 3mm*0.6mm olan kanalda, $a=3$ mm ve $x=a$ olmak üzere, y ve z uzunluklarına, kanalın geometrisi ile toplama verimi arasındaki ilişkiyi saptamak amacıyla; 0, a , $2a$, $4a$ değerleri atanmıştır. $x=a$ sabit olmak üzere y ve z 'nin 2'li seçenekleri için kanal numaraları ve x , y , z değerleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. Üzerinde sayısal çözümleme yapılan kanal sayılarının

fazlalığı ve çözümlemede sistematik bir düzen elde etmek amacıyla kanallar isimlendirilmiştir. İsimlendirme işleminde x, y ve z uzunluklarının a cinsinden değerlerinde a'nın katsayıları kullanılmıştır. Şekil 5.11'de verilen kanalda $x=a$, $y=2a$ ve $z=0$ olduğunda elde edilen kanal 120 kanalı olarak isimlendirilir. Bunun yanında giriş: g, çıkış: c, x olarak belirtilen bölümden olan çıkış da xcıkış veya xc olarak simgeleştirilmiştir. İlerleyen zamanlarda ihtiyaç duyulacağından kanalın y uzunluğu ve xc genişliği boyunca olan kısmı Şekil 5.11'de belirtildiği gibi xc kolu olarak ifade edilmiştir.

Çizelge 5.1 : Şekil 5.11'de verilen x, y, z değişkenlerine karşılık gelen kanal numaraları

Kanal no	x (mm)	y (mm)	z (mm)
100	a	0	0
101	a	0	a
102	a	0	2a
104	a	0	4a
110	a	a	0
111	a	a	a
112	a	a	2a
114	a	a	4a
120	a	2a	0
121	a	2a	a
122	a	2a	2a
124	a	2a	4a
140	a	4a	0
141	a	4a	a
142	a	4a	2a
144	a	4a	4a

Çizelge 5.1'den görülebileceği gibi toplamda on altı kanal olmakla beraber tanecikli akışın uzun sürmesi de göz önünde bulundurularak, tüm kanallardan sadece sıvı geçme durumu incelenmiştir. Akış özelliğinden dolayı taneciklerin sıvı ile benzer davranış sergilediği kabul edildiğinden tanecikli akışta da aynı sonucun çıkacağı ön görülür.

Ayırma işleminde kanal şekli ve kullanılan taneciğin yanında hız parametresi de önemli bir yer teşkil eder. Hızın düşük olması manyetik etki atındaki taneciklerin çıkışa varmadan kanalda yığın oluşturmaları (yığınlaştırma), dolayısıyla sistem veriminin düşük olmasına yol açar. Bunun yanında hızın yüksek olması manyetik etkinin hızdan kaynaklanan sürüklenme etkisini yenmeye fırsat bulamayacağı ve ayırmanın verimli olamayacağı anlamına gelir. Bu noktada, verimli ayırma için

manyetik alanın uygulanacağı uygun hız ve kanalların belirlenebilmesi; kanalda sadece sıvı akışı olması durumunda ve 1, 2.5, 5, 7.5, 10 mm/s giriş hızları için yapılan sayısal çözümleme sonucunda, sıvının xc'yi tercih etme yüzdelerinden belirlenmiştir. Ayırmaya uygun kanallar belirlendikten sonra manyetik etki belirlenen kanallara uygulanmıştır.

Çizelge 5.1'de verilen her bir kanal ve hız için sıvının xc'yi tercih etme yüzdesi (Fluent programında *mass flow rate*'den xc debisi/g debisi*100) Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2 : Her bir kanal için elde edilen xc'ye yönelim yüzdeleri.

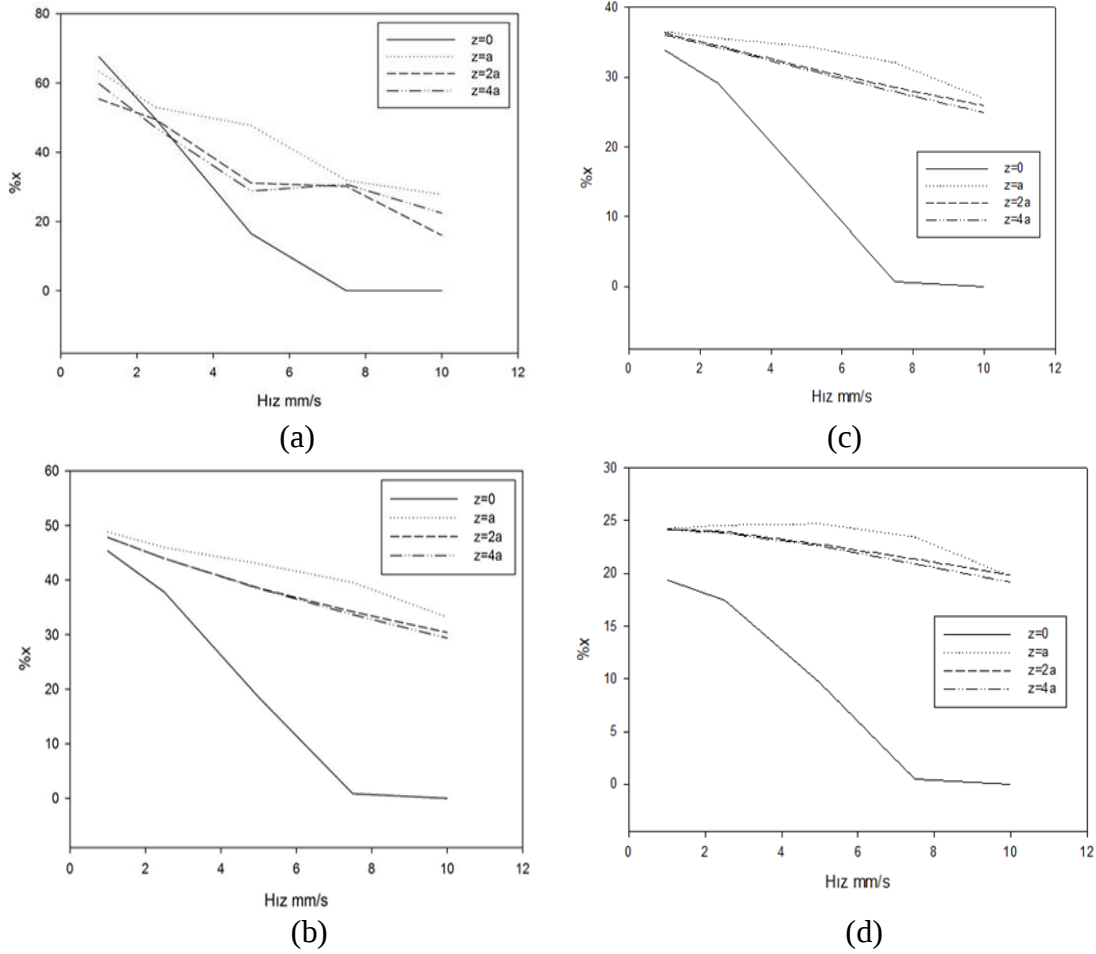
Hız (mm/s)	% xc							
Kanal no	100	101	102	104	110	111	112	114
1	67.57	63.35	55.41	59.81	45.33	48.84	47.84	47.82
2.50	49.48	52.97	49.44	47.05	37.79	45.98	43.96	43.96
5	16.49	47.72	31.15	28.84	18.53	43.01	38.54	38.47
7.50	0	31.9	30.17	30.76	0.84	39.59	34.21	33.68
10	0	27.85	16.02	22.41	0	33.22	30.4	29.39
Kanal no	120	121	122	124	140	141	142	144
1	33.85	36.48	36.25	35.99	19.4	24.26	24.23	24.14
2.50	29.13	35.58	34.48	34.25	17.46	24.58	23.95	23.85
5	14.97	34.39	31.34	31.07	9.64	24.72	22.76	22.6
7.50	0.73	32.06	28.5	27.88	0.52	23.44	21.36	20.94
10	0	26.93	25.87	24.89	0	19.74	19.85	19.18

Çizelgenin daha kolay anlaşılması için bir örnek üzerinde durulması gerek görülmüştür. $x=a$, $y=2a$ ve $z=4a$ olduğu durumda 2.5 mm/s giriş hızı için sıvının xc'yi tercih etme yüzdesi bulunurken; öncelikle x, y ve z için a katsayıları ve Çizelge 5.1 yardımıyla 124 kanalı olduğu belirlenir; ikinci aşamada Çizelge 5.2'den kanal no satırından 124 kolonu ve hız kolonundan da 2.5 satırı denkleştirildiğinde; aranan değer % 34.25 olduğu görülür. Bu demek oluyor ki kanal içinde akan sıvının % 34.25'i xc'yi tercih ederken, geriye kalan % 65.75'i c'yi tercih etmektedir.

Çizelge 5.2'de sayısal değerleri verilen xc'ye yönelim yüzdelerinin grafiksel olarak ifadesi Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'de verilmiştir.

Şekillerde $x=a$ olmak üzere y'nin sabit değerlerinde z'nin değişiminin ve z'nin sabit değerlerinde y'nin değişiminin ayırma yüzdesine etkisi verilmiştir. Burada yatay

eksen hız olup düşey eksen verilen y ve z değerlerinde kanaldaki akışkanın x_c çıkışını tercih etme yüzdesidir.

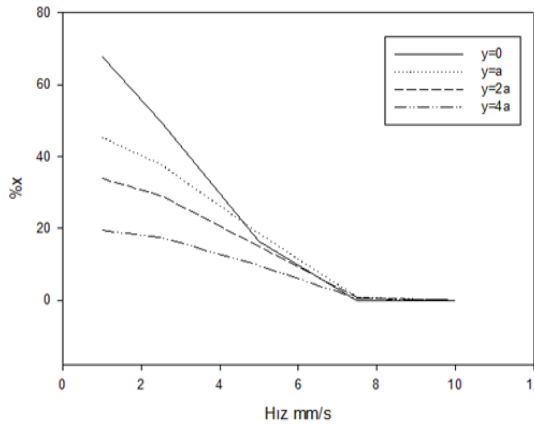


Şekil 5.12 : $x=a$ için farklı z değerlerinde elde edilen x_c 'ye yönelim yüzdesi (a) $y=0$ (b) $y=a$ (c) $y=2a$ (d) $y=4a$.

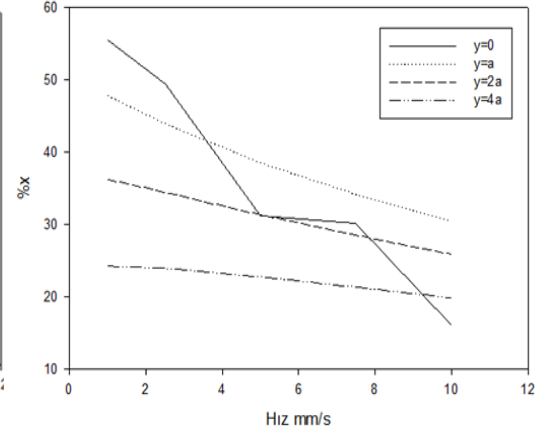
Şekil 5.12'de x ve y 'nin sabit değerleri için elde edilen x_c 'ye yönelim yüzdeleri görülmektedir. Şekillerden $z=0$ değerinde kararsızlık sergilendiği ve z 'nin sıfırdan farklı değerlerinde ($y=0$ dışındaki) elde edilen sonuçlarda sistematik bir değişim olduğu gözlemlenebilir. Burada dikkat edilmesi gereken grafikteki eğrilerin verilen noktalardan geçtiğidir. Dolayısıyla eğri uydurma yapıldığında y 'nin sabit değerleri için z 'deki değişimin lineer olduğu görülür.

Şekil 5.13'de x ve z 'nin sabit değerlerine karşılık y 'nin farklı değerleri için elde edilen x_c 'ye yönelim yüzde eğrileri verilmiştir.

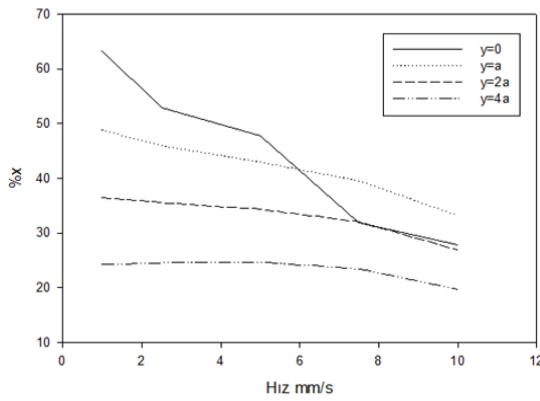
Şekil 5.13 incelendiğinde, Şekil 5.12'den farklı olarak z 'nin sabit değerleri için y 'deki değişimler ayırma yüzdelinde hissedilir düzeyde etkimıştır. Ayrıca y 'nin farklı değerleri için x_c 'ye yönelim yüzdelinde lineer ve sistematik eğriler elde edilmiştir ($y=0$ dışında).



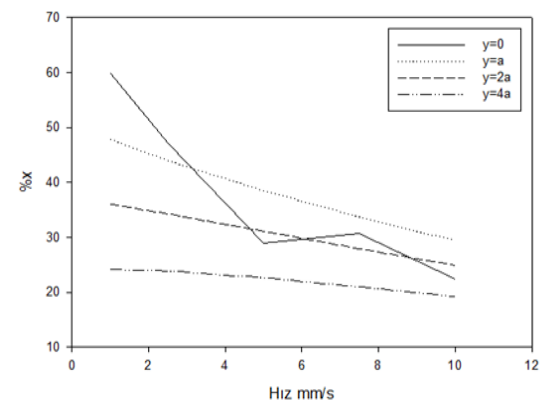
(a)



(c)



(b)



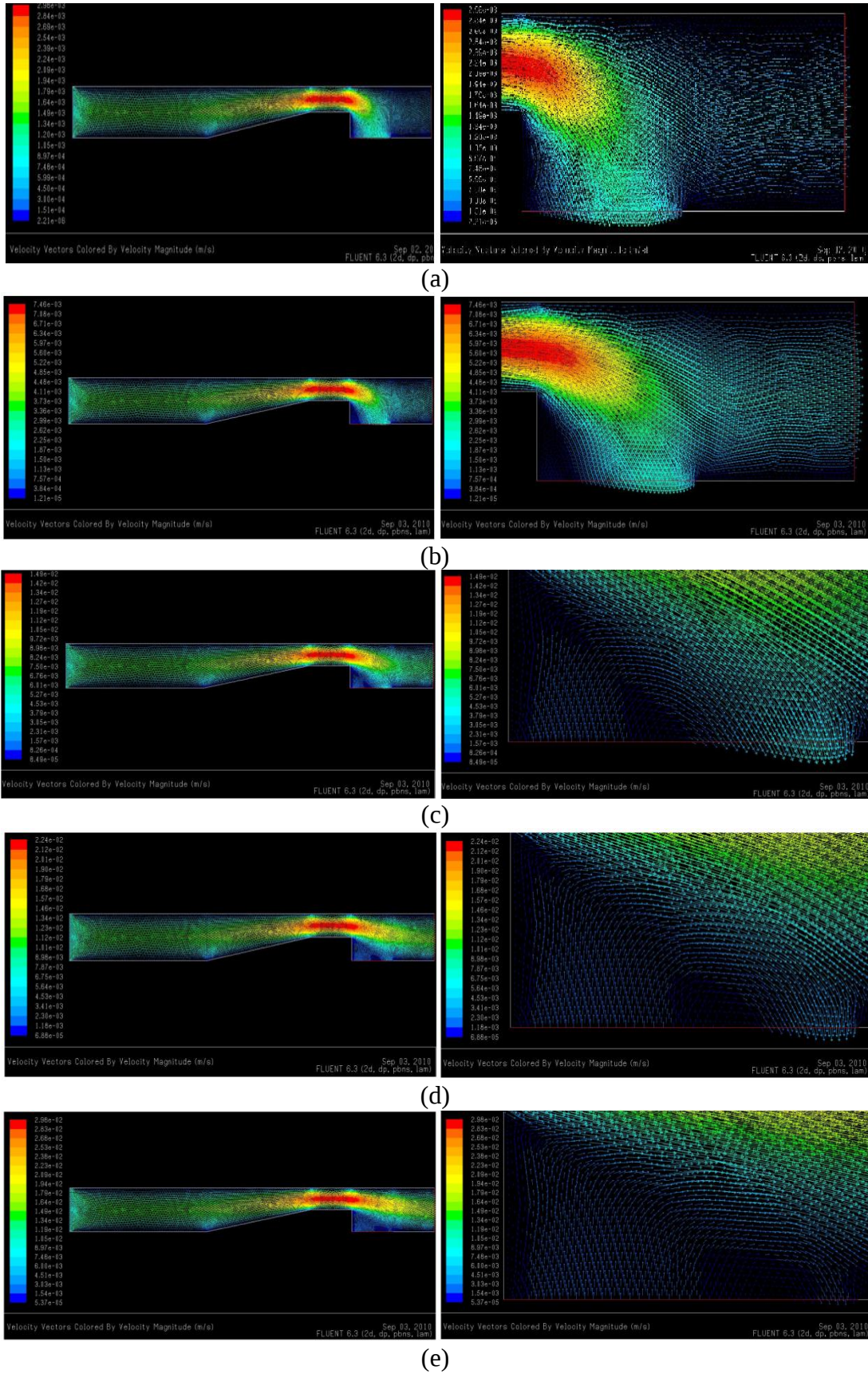
(d)

Şekil 5.13 : $x=a$ için farklı y değerleri için elde edilen x_c 'ye yönelim yüzdesi. (a) $z=0$ (b) $z=a$ (c) $z=2a$ (d) $z=4a$.

Çizelge 5.2, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'de elde edilen sonuçların değerlendirilmesi için bazı kanallar üzerinde durulmasına ihtiyaç duyulmuştur.

•**100 kanalı:** Çizelge 5.2 ve Şekil 5.12a incelendiğinde 100 kanalında x_c 'yi tercih eden sıvı yüzdesi, 1 mm/s giriş hızı için % 70 dolaylarında iken değer 5 mm/s'ye kadar lineer azalmaktadır. Aynı kanal için 7.5 ve 10 mm/s giriş hızlarında x_c 'de ters akışa rastlanmaktadır. Kanaldaki sıvının bu davranışının sayısal çözümünden elde edilen hız vektörleri Şekil 5.14'de verilmiştir.

Şekil 5.14'de sol tarafta kanalın tamamındaki, sağ tarafta ise x_c ağzındaki hız vektörleri verilmiştir. Sağ tarafta verilen gösterimden 1 mm/s giriş hızında pek gözlenmese de hız değeri arttıkça x_c 'den içeriye sıvı girişi olmakta ve sıvının ters akış etkisiyle x_c ağzından giriş yaptığı uzunluk hız değeriyle orantılı olarak artmaktadır. Öyle ki 7.5 mm/s ve 10 mm/s değerlerinde x_c 'den çıkıştan öte yüksek oranda giriş olduğu gözlemlenir.



Şekil 5.14 : Farklı giriş hızlarında 100 kanalına ait hız vektörleri-xc ağız dolaylarında görülen hız vektörleri (a)1 mm/s (b)2.5 mm/s (c)5 mm/s (d)7.5 mm/s (e)10 mm/s.

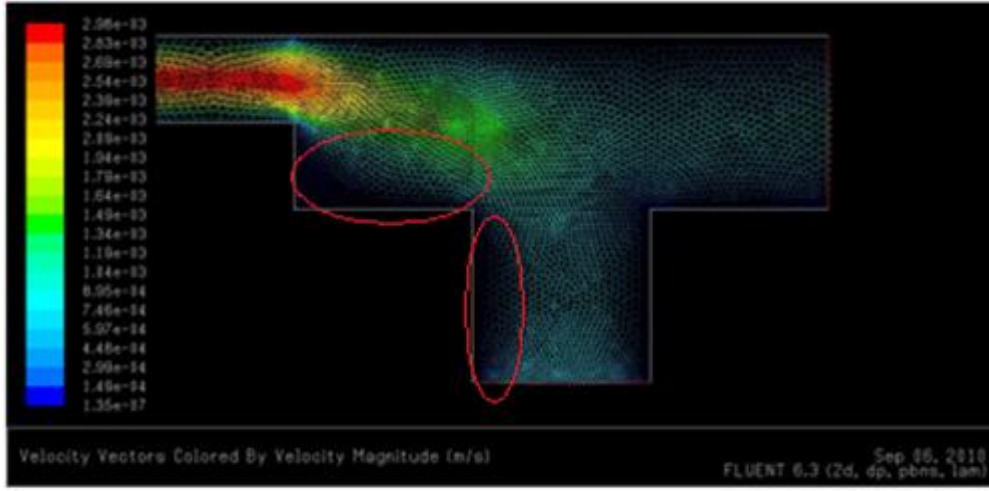
Daha önce kanal geometrisi belirlenirken rampa dar kesiti ardında girdap bölgesi oluştuğu görülmüş ve buna ek olarak *İnceleme6*'da f 'nin belli değerin altında tutulması ile xc'de ters akışın etkin olduğu gözlenmişti. Bunun yanında önceki incelemelerde bu etkinin f 'den (burada $f=z$) mi yoksa xc ağız uzunluğunun c ağız uzunluğunun yarısı tutulmasından mı kaynaklandığı tam olarak saptanamamıştı. Şekil 5.14'de xc ile c'nin ağız uzunlukları aynı boyutta tutulduğu halde 10 mm/s giriş hızı için xc ağızında ters akış tekrarlanmıştır. Bunun yanında girdap etkisinin ve ters akışın hızdan etkilendiği ve düşük hızlarda etkin olmadığı sonucu çıkarılır. Çizelge 5.2, 100 kanalı ve *İnceleme6*'daki sonuçlardan yola çıkarak $z=0$ değeri 10 mm/s vb. yüksek hız değerlerinde ayırma işleminde istenmeyen bir etki olan ters akışa neden olduğundan tanecikli akışta xy0 kanalları incelemeye alınmamıştır.

•10z kanalları: Şekil 5.13 incelendiğinde $y=0$ kanalları kendi içinde tutarlıyken sistematik düzen oturtulmak istendiğinde diğer kanallarla arasında kararsızlık gözlemlenir. Ayrıca bu kanallarda düşük hızlarda xc'ye yönelim % 60 dolaylarında olduğundan tanecikli çözümlerde verimli olmayacağı düşünülüp 10z kanalları tanecikli akış için incelemeye tabi tutulmamışlardır.

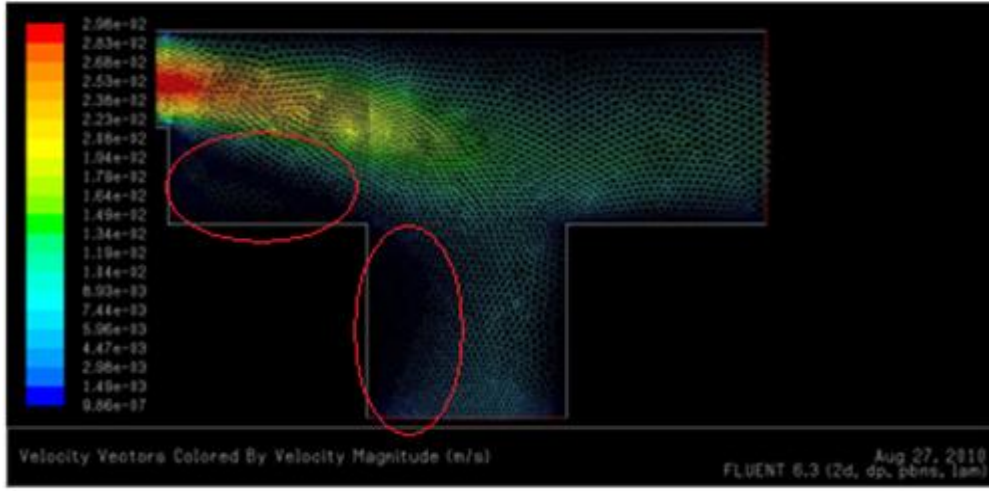
•1y1 kanalları: Çizelge 5.2'de $x=a$ ve $z=a$ kanallarında, yüksek hız değerlerinde, çıkışlardaki ayırma yüzde farklarının yüksek olduğu görülür. Sunulan bu çalışmanın amaçlarından biri olan kollardaki farkı sağlamalarından dolayı bu kanalların tanecikli akışta incelenmesine karar verilmiştir fakat tanecikli akışa geçmeden önce bu kanallarda xc'ye yönelimin az olmasının nedeni irdelenmiştir.

-111kanalı: Önceki incelemelerde rampa üst dar kesit ardında girdap oluşumuna rastlanmıştır fakat burada köşe ardındaki girdap etkisi dışında Şekil 5.15'de görüldüğü gibi xc koluna girişte (y boyunca) de girdap oluşmaktadır. Oluşan ikinci girdapta hızın etkili olduğu; Şekil 5.15a'da 1 mm/s giriş hızında oluşan girdap etkisinin Şekil 5.15b'de verilen 10 mm/s giriş hızındaki etkiden daha az alana yayılır olmasından çıkarılabilir.

111 kanalında xc'yi tercih etme yüzdelerine bakıldığında 1 mm/s'de sıvı iki kola da eşit oranda dağılırken 10 mm/s giriş hızı için xc'ye yönelim yüzdesinde azalma vardır. Şekil 5.15'den 1 mm/s'de pek hissedilmeyen ikinci girdap etkisinin 10 mm/s'de hissedilir düzeye geldiği ve xc kolu girişinde direnç oluşturarak bu sayede sıvının c'ye yönelimini sağladığı sonucu çıkarılabilir.



(a)

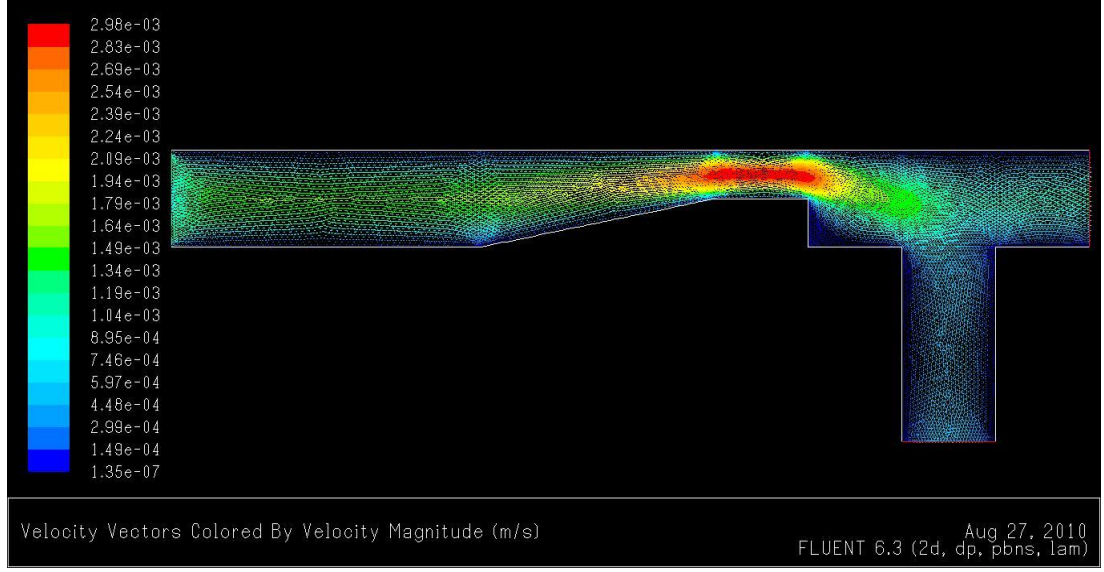


(b)

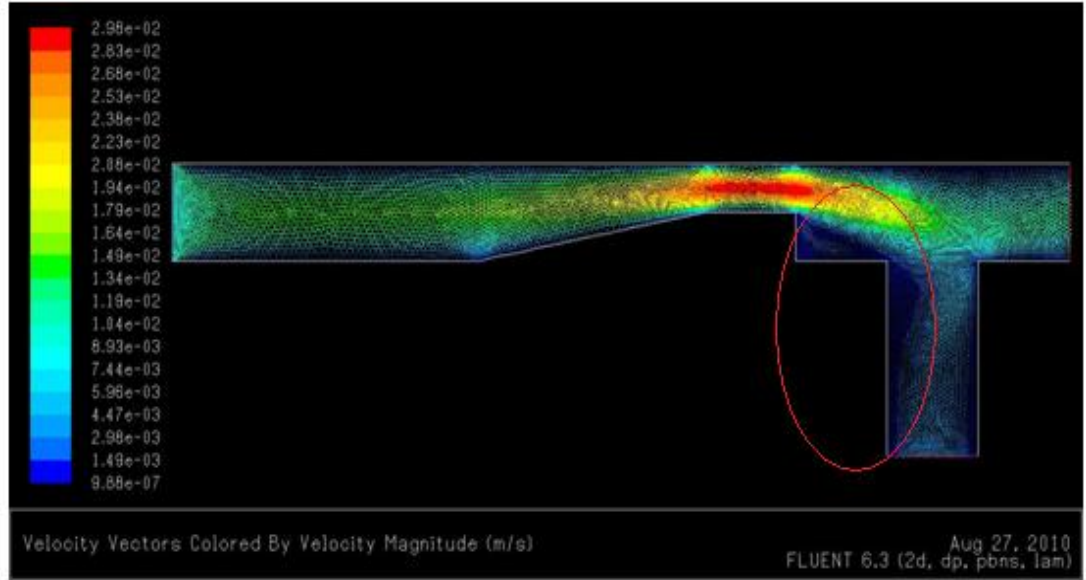
Şekil 5.15 : 111 kanalında farklı giriş hızlarında rampa üst köşesi ardındaki keskin köşe ve xc kolunda girdap oluşumu (a)1 mm/s (b)10 mm/s.

111 kanalında gözlemlenen bu sonucun diğer kanallarda da geçerli olup olmadığının tespit edilmesi amacıyla 121 ve 141 kanalları da incelenmiştir. Burada 111 kanalında olduğu gibi xc kolunda girdap oluşumunun gözlenmesi dışında hızın girdap üzerindeki etkisinin de gözlenmesi için her iki kanal için de 1 ve 10 mm/s giriş hızlarındaki durum incelenmiştir.

-121 kanalı: Şekil 5.16’da 121 kanalına ait hız vektörleri verilmiştir. Bir önceki kanalda olduğu gibi burada da xc kolu girişinde girdap oluşmaktadır. Kanalda y’nin iki katına çıkarılması ile Çizelge 5.2 ve Şekil 5.12’de çıkan sonuçlar, rampa üst dar kesitinde yüksek hız değerine sahip olan sıvının, xc kolunda yaratılan direnç ile yoluna devam ederek, büyük oranda c’yi tercih etmesine bağlanır. Dolayısıyla hız değeri arttıkça atalet etkisi baskın olup c’ye yönelim artmaktadır.



(a)

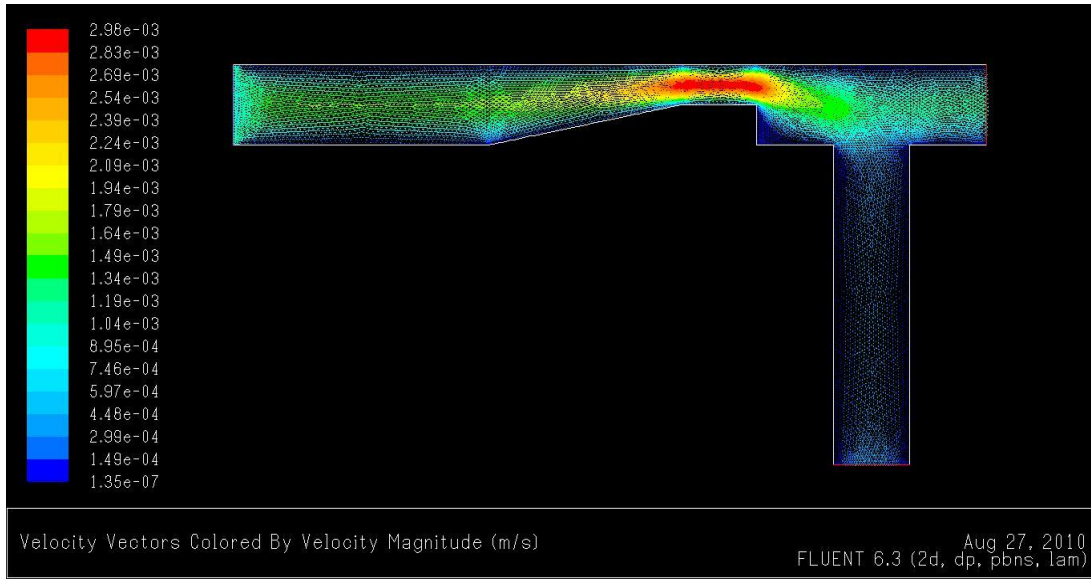


(b)

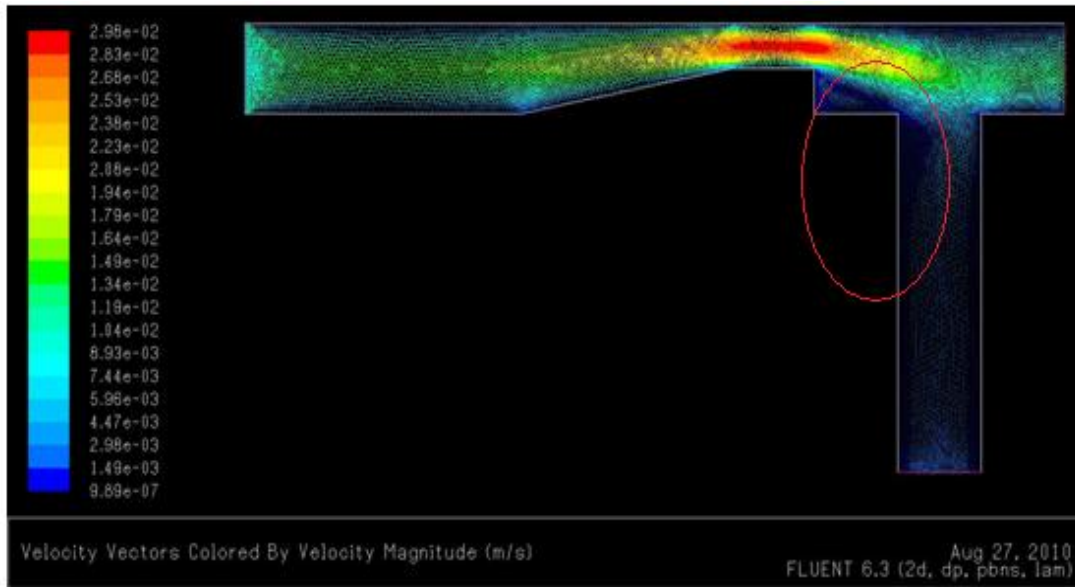
Şekil 5.16 : 121 kanalına ait hız vektörleri (a)1 mm/s (b)10 mm/s.

-141 kanalı: Şekil 5.17’de 141 kanalına ait hız vektörleri verilmiştir. y uzunluğu arttıkça bir önceki kanal geometrisinde yapılan incelemelerle tutarlık göstererek xc’ye yönelim daha da azalıp % 20 değerlerine kadar gerilemiştir. Buradan xc kolu girişindeki girdap etkisinin yanında y mesafesinin de etkili olduğu görülür. y uzunluğunun artması, xc kolunda direnç etkisi yaratır. Bu etki sayesinde sıvının yüzde bakımından büyük kısmı c’ye yönelir.

111, 121 kanallarında olduğu gibi 141 kanalında da girdap etkisinin 10 mm/s giriş hızında daha etkin olduğu Şekil 5.17b’den görülebilir. Buradan girdap etkisinin hızla arttığı sonucu tekrar doğrulanır.



(a)



(b)

Şekil 5.17 : 141 kanalına ait hız vektörleri (a)1 mm/s (b)10 mm/s.

Tanecikli akışa tabi tutulacak kanallar belirlenirken c’de ayırma verimi yüksek olan kanallar (111, 121, 141) göz önüne alınmıştır.

Seçilen kanallarda $z=a$ ’da sabit tutularak y değerleri farklı olan kanallar (1yl kanalları) seçilmiştir. Bu noktada bu kanallardan farklı olarak manyetik alanın z boyunca etkileneceği düşünülerek alanın etkitim süresinin fazla tutulmasının ayırmaya etkisi olduğu söylenebilir. Burada $z=a$ ’dan farklı olarak z ’nin hangi değeri için inceleme yapılacağı ayırma işleminde zaman parametresinin de göz önüne alınmasıyla belirlenir. y ’nin kısa tutulması ile zamandan kazılacak olup $y=a$, $z=4a$ olan 114 kanalı da tanecikli ayırmaya tabi tutulmuştur.

5.1.3 Belirlenen kanallar içinde tanecikli akış

Önceki bölümlerde sıklıkla bahsedildiği gibi laminar akış ve seyreltik asıltı şartlarında tanecik ile sıvının benzer davranış sergilediği kabulü yapılır. Bu bölümde, yapılan kabulün, 1y1 ve 114 kanalları üzerinde test edilip doğruluğunun sınanması amaçlanmıştır.

Fluent’de girişten belli bir debiyle yollanan asıltıdaki taneciklerin, çıkışları tercih etme yüzdeleri iki şekilde belirlenir. Bunlardan ilki uzun olmakla beraber 111 ve 121 kanallarına uygulanırken, ikincisi kısa sürdüğü ve tam sonuç verdiğinden sayısal çözümün bir sonraki aşamasında (manyetik alan etkilmesi) ve deneysel çalışmada da kullanılacak olan 141 ve 114 kanallarında uygulanmıştır.

Aşağıda her bir kanal üzerinde tanecik-su asıltısı için yapılan sayısal çözümlemeler verilmiştir.

5.1.3.1 Kanal 111’de yapılan tanecikli akış çalışması

111 kanalında yapılan tanecikli akış sonucundaki çözümler aşağıda verilmiştir. Öncelikle kanalda tanecikli akış sonucunda sıvı dengesinde farklılık olup olmadığının saptanması için Çizelge 5.3’de verilen çıkışlardaki sıvıya ait kütleli debilere bakılır.

Çizelge 5.3 : 111 kanalında 1 mm/s giriş hızı için tanecikli akış sonundaki suya ait debiler.

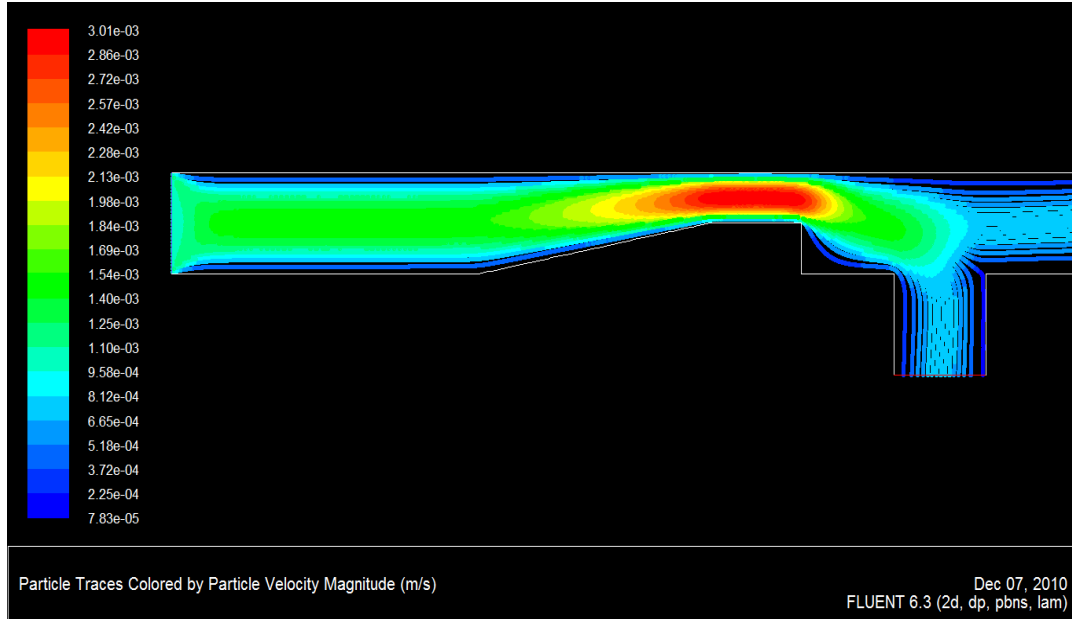
Sınır tipleri	Kütleli debi (kg/s)
çıkış	-0.0015321507
xcıkış	-0.0014624494
giriş	0.0029946002

Çizelgede verilen değerlerden 111 kanalında 1 mm/s giriş hızı için sıvının % 48.84’ünün xc’yi tercih ettiği sonucu çıkar. Bu değer kanalda sadece sıvı olması durumuna eşittir. Buradan taneciğin sıvıyı (su) etkilemediği sonucu çıkarılabilir.

Şekil 5.18’de 111 kanalında 1 mm/s giriş hızı için taneciklere ait yörünge ve hız değerleri verilmiştir.

Sayısal çözümlemelerde tanecik çıkış yüzdelerinin iki şekilde belirlendiği ve 111 kanalı için ilk yolun verileceği belirtilmişti. Fluent programında tanecik çözümü için *Report → Discrete Phase → Sample* seçeneği yardımıyla her bir çıkıştaki

taneciklere ait bilgiler .dpm uzantılı dosyaya kaydedilir. 111 kanalı için elde edilen tanecikli çözüm sonuçları Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5’de verilmiştir.



Şekil 5.18 : 111 kanalında 1 mm/s giriş hızında taneciklerin yörünge ve hız değerleri.

Çizelge 5.4’de xc’ye ait sonuçlar yer almaktadır. Birinci ve ikinci kolanlar sırasıyla taneciğin xc’yi terk ettiğiindeki x ve y (her bir tanecik için bu değer sabit) konumlarını, üçüncü ve dördüncü kolonlar çıkıştaki hızlarını belirtmektedir. Beşinci kolondaki *time*, taneciğin xc’den ayrıldığı zamanı belirtmektedir. Son kolon *name* olarak belirtilmiş olup *injection-number:particle id* olarak ifade edilir.

Çizelge 5.4 : 111 kanalında 1 mm/s giriş hızı için tanecikli akışta xc’yi tercih eden taneciklere ait özellikler.

X	Y	U	V	time	name
2.38E-02	-3.00E-03	-7.29E-06	-3.01E-04	6.38E+01	injection-0:29
2.64E-02	-3.00E-03	8.58E-06	-7.77E-05	5.05E+01	injection-0:15
2.41E-02	-3.00E-03	-2.62E-05	-4.77E-04	3.67E+01	injection-0:28
2.43E-02	-3.00E-03	-3.54E-05	-5.71E-04	2.96E+01	injection-0:27
2.44E-02	-3.00E-03	-3.99E-05	-6.33E-04	2.59E+01	injection-0:26
2.60E-02	-3.00E-03	-1.40E-05	-4.03E-04	2.40E+01	injection-0:16
2.46E-02	-3.00E-03	-4.15E-05	-6.74E-04	2.38E+01	injection-0:25
2.48E-02	-3.00E-03	-4.08E-05	-7.00E-04	2.25E+01	injection-0:24
2.58E-02	-3.00E-03	-1.73E-05	-5.29E-04	2.19E+01	injection-0:17
2.49E-02	-3.00E-03	-3.85E-05	-7.14E-04	2.16E+01	injection-0:23
2.56E-02	-3.00E-03	-2.05E-05	-6.07E-04	2.10E+01	injection-0:18
2.50E-02	-3.00E-03	-3.50E-05	-7.18E-04	2.10E+01	injection-0:22
2.52E-02	-3.00E-03	-3.12E-05	-7.11E-04	2.06E+01	injection-0:21
2.55E-02	-3.00E-03	-2.39E-05	-6.59E-04	2.06E+01	injection-0:19
2.53E-02	-3.00E-03	-2.75E-05	-6.92E-04	2.05E+01	injection-0:20

Bu çalışmada bir çeşit tanecik kullanılmıştır fakat DPM, aynı anda birden fazla tanecik kullanma imkanı verir. Örneğin çelik ve silisyum taneciklerinden oluşan asıltıyı DPM ile çözmek istediğinizde Fluent taneciklerden birine 0 değerini atarken diğerine 1 değerini atar. Bu, iki taneciğin birbirinden ayrılmasını sağlar. Burada tek tanecik kullanıldığından *name* kısmı *injection-0* olarak yer almıştır.

Bilindiği gibi Lagrange yönteminde Euler yönteminden farklı olarak tanecikler tek tek ele alınır. Fluent bu yöntemi uygularken girişten giren her bir taneciğe *Particle id* olarak ifade ettiği bir sayı atar. Bu sayı 0'dan başlar ve toplamda girişteki yüzey sayısı kadardır. Taneciğe sayı atama kanal üst kısmından alt kısmına doğru birer artarak ilerler. Bu şekilde *injection-0:29* ifadesi girişteki kanalın en alt yüzeyinden yollanan taneciği temsil etmektedir.

Her iki faz için de yakınsama sağlandıktan sonra çıkışlardaki ve kanal içerisindeki tanecik ve akışkan davranışları incelenebilir. Çizelge 5.5'de c'den çıkan her bir taneciğin çıkış hız ve konumları verilmiştir.

Çizelge 5.5 : 111 kanalında 1 mm/s giriş hızı için tanecikli akışta c'yi tercih eden taneciklere ait özellikler.

X	Y	U	V	time	name
2.95E-02	2.72E-03	2.85E-04	1.94E-05	6.98E+01	injection-0:0
2.95E-02	2.46E-03	4.84E-04	2.87E-05	4.01E+01	injection-0:1
2.95E-02	2.28E-03	5.85E-04	3.38E-05	3.21E+01	injection-0:2
2.95E-02	2.12E-03	6.53E-04	3.56E-05	2.81E+01	injection-0:3
2.95E-02	1.97E-03	7.00E-04	3.57E-05	2.56E+01	injection-0:4
2.95E-02	4.77E-04	3.86E-04	1.54E-05	2.48E+01	injection-0:14
2.95E-02	1.83E-03	7.32E-04	3.47E-05	2.40E+01	injection-0:5
2.95E-02	1.69E-03	7.50E-04	3.30E-05	2.29E+01	injection-0:6
2.95E-02	6.90E-04	5.28E-04	1.91E-05	2.25E+01	injection-0:13
2.95E-02	1.56E-03	7.56E-04	3.10E-05	2.21E+01	injection-0:7
2.95E-02	8.67E-04	6.15E-04	1.94E-05	2.16E+01	injection-0:12
2.95E-02	1.43E-03	7.53E-04	2.86E-05	2.16E+01	injection-0:8
2.95E-02	1.30E-03	7.39E-04	2.60E-05	2.13E+01	injection-0:9
2.95E-02	1.02E-03	6.73E-04	2.10E-05	2.12E+01	injection-0:11
2.95E-02	1.16E-03	7.13E-04	2.34E-05	2.11E+01	injection-0:10

Çizelge 5.4 incelendiğinde yollanan taneciklerin yarısının xc'yi tercih ettiği görülür. Çıkışlardaki ayırma yüzdesi o çıkıştan çıkan miktarın toplam giren miktara bölümü şeklinde ifade edilir (Modak ve diğ., 2009). Kaynaklarda taneciklerin sayı olarak yüzde kaçını hangi çıkışı tercih etmişse bunun o çıkıştaki çıkış yüzdesini verdiği kabulü yapılır. Çizelge 5.4 ve 5.5'den yollanan 30 tanecikten 15'inin xc'yi

dolayısıyla geriye kalan 15'inin de c'yi tercih ettiği görülür. Kaynaklara göre bu durumda ayırma yüzdesi % 50 olarak bulunur. Bunun yanında Çizelge 5.4 incelendiğinde, 29. taneciğin kanalı terk etmesi 64 saniye gibi bir zaman alırken 20. tanecik için bu değer 20 saniyeyi göstermektedir. Dolayısıyla zaman parametresinin göz ardı edilmesi sonuçların yanlış yorumlanmasına neden olabilir.

Her bir çıkıştan 10 sn sonunda çıkan tanecik miktarları hesaplanıp toplam çıkan miktara bölüldüğünde xc'yi tercih eden tanecik yüzdesi % 50.1 olarak bulunur. Bu değer xc'yi tercih eden % 48.84'lük su miktarına yakın olduğundan teorideki su ile taneciğin benzer davranış sergileyecekleri tezi kabul edilebilir.

5.1.3.2 Kanal 121'de yapılan tanecikli akış çalışması

Bir önceki uygulama ile aynı yol izlenmiş olup tek fark olarak ayırmada etkin olan hız parametresinin değişiminin teori ile tutarlılığının incelenmesi amacıyla girişteki hız değeri 1 mm/s yerine 10 mm/s alınmıştır.

Çizelge 5.6'da 121 kanalına 10 mm/s hız ile giren sıvı için yapılan sayısal çözümleme sonucundaki suya ait kütleli debi miktarları verilmiştir.

Çizelge 5.6 : 121 kanalında 10 mm/s giriş hızı için tanecikli akış sonunda elde edilen suya ait kütleli debi miktarları.

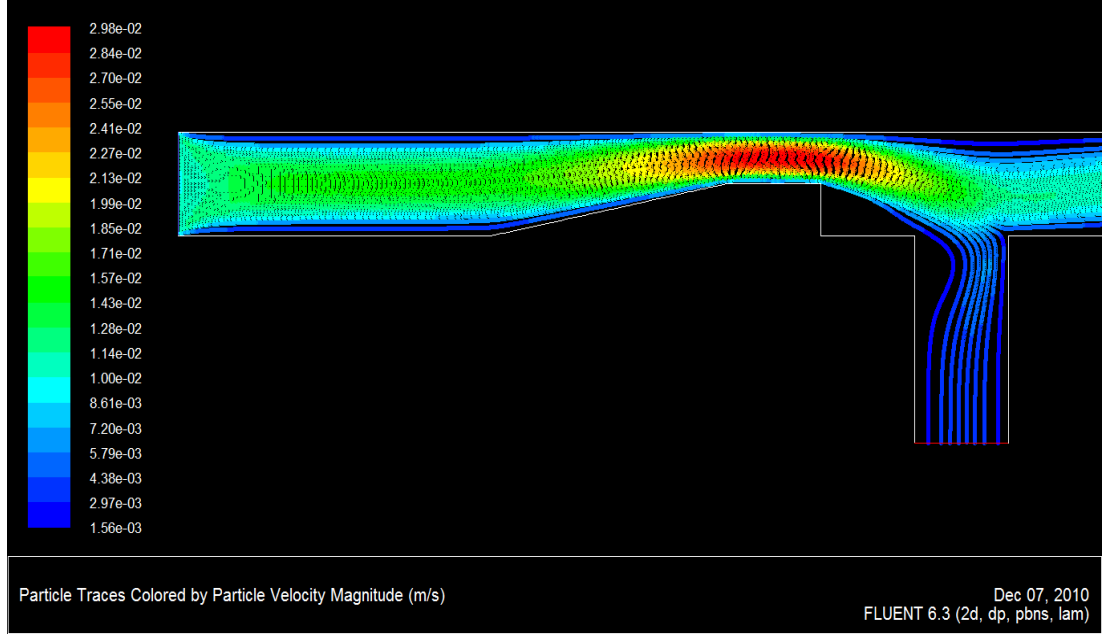
Sınır tipleri	Kütleli debi (kg/s)
çıkış	-0.02190179
xcıkış	-0.0080442112
giriş	0.029946001

Çizelge 5.6'da verilen değerlerden tanecikli akışta suyun % 26.86'sının xc'yi tercih ettiği sonucu çıkar. Bu değer de kanalda sadece sıvı olma durumuna (% 26.93) yakındır.

Şekil 5.19'da 121 kanalında 10 mm/s giriş hızı için taneciklere ait yörünge ve hız değerleri verilmiştir.

Dikkat edilirse bir önceki kanalda verilen tanecik hız değerleri Şekil 5.15'de verilen kanalda sadece su olma durumuyla uyurken bu kanal için de Şekil 5.19 ile Şekil 5.16 uyumaktadır. Buradan taneciğin sıvı üzerinde hissedilir etki yapmadığı sonucu çıkar ki bu da seyreltik asıltı kabulünü doğrular niteliktedir.

Çizelge 5.7 ve Çizelge 5.8'de 121 kanalında 10 mm/s giriş hızı için tanecikli çözüm sonunda elde edilen her bir çıkıştaki tanecik bilgileri verilmiştir.



Şekil 5.19 : 121 kanalına ait 10 mm/s giriş hızı için taneciğin yörünge ve hız değerleri.

Çizelge 5.7 : 121 kanalında 10 mm/s giriş hızı için tanecikli akışta xc'yi tercih eden taneciklere ait özellikler.

X	Y	U	V	time	name
2.39E-02	-6.00E-03	-3.85E-05	-2.05E-03	8.30E+00	injection-0:29
2.62E-02	-6.00E-03	3.88E-05	-1.56E-03	4.94E+00	injection-0:22
2.44E-02	-6.00E-03	-1.96E-05	-3.34E-03	4.76E+00	injection-0:28
2.46E-02	-6.00E-03	-1.05E-05	-3.82E-03	3.92E+00	injection-0:27
2.49E-02	-6.00E-03	3.45E-06	-3.99E-03	3.51E+00	injection-0:26
2.57E-02	-6.00E-03	2.97E-05	-2.98E-03	3.50E+00	injection-0:23
2.52E-02	-6.00E-03	1.76E-05	-3.93E-03	3.33E+00	injection-0:25
2.54E-02	-6.00E-03	2.58E-05	-3.62E-03	3.30E+00	injection-0:24

Çizelge 5.7 ve 5.8'den xc'yi 8, c'yi ise 22 taneciğin tercih ettiği görülür. Ayrılan tanecik miktarı baz alınarak, önceki yapılan çalışmalar doğrultusunda, taneciklerin % 26.66'sının xc'yi tercih ettiği söylenir. Bu değer Çizelge 5.2'de verilen değere yakın bir değerdir fakat zaman baz alınarak yapılan hesaplamalarda az da olsa fark görülür.

Her bir çıkıştan 10 sn sonunda çıkan tanecik miktarları hesaplanıp toplam çıkan miktara bölündüğünde xc'yi tercih eden tanecik yüzdesi % 16.1 olarak bulunur. Zaman parametresi göz önüne alınmadığında elde edilen ayırma yüzdesinin yapılan kabule daha yakın sonuç verdiği görülür. Fakat zamanın daha hassas sonuç vereceği ve elde edilen sonucun hesaplanan değerle yakın olması kabul edilebilir olduğunu gösterir.

Çizelge 5.8 : 121 kanalında 10 mm/s giriş hızı için tanecikli akışta c'yi tercih eden taneciklere ait özellikler.

X	Y	U	V	time	name
2.95E-02	2.77E-03	3.03E-03	2.69E-04	7.22E+00	injection-0:0
2.95E-02	2.52E-03	5.55E-03	3.76E-04	3.83E+00	injection-0:1
2.95E-02	2.36E-03	6.91E-03	4.64E-04	3.02E+00	injection-0:2
2.95E-02	2.22E-03	7.88E-03	5.32E-04	2.63E+00	injection-0:3
2.95E-02	2.11E-03	8.65E-03	5.94E-04	2.39E+00	injection-0:4
2.95E-02	3.20E-04	4.49E-03	1.70E-04	2.39E+00	injection-0:21
2.95E-02	1.99E-03	9.29E-03	6.49E-04	2.22E+00	injection-0:5
2.95E-02	4.97E-04	6.50E-03	2.08E-04	2.11E+00	injection-0:20
2.95E-02	1.89E-03	9.79E-03	6.90E-04	2.10E+00	injection-0:6
2.95E-02	1.79E-03	1.02E-02	7.25E-04	2.02E+00	injection-0:7
2.95E-02	6.34E-04	7.83E-03	2.96E-04	1.99E+00	injection-0:19
2.95E-02	1.69E-03	1.05E-02	7.48E-04	1.95E+00	injection-0:8
2.95E-02	7.52E-04	8.81E-03	3.84E-04	1.92E+00	injection-0:18
2.95E-02	1.60E-03	1.08E-02	7.60E-04	1.91E+00	injection-0:9
2.95E-02	8.60E-04	9.49E-03	4.64E-04	1.88E+00	injection-0:17
2.95E-02	1.51E-03	1.10E-02	7.65E-04	1.87E+00	injection-0:10
2.95E-02	1.42E-03	1.10E-02	7.53E-04	1.84E+00	injection-0:11
2.95E-02	9.60E-04	1.01E-02	5.41E-04	1.85E+00	injection-0:16
2.95E-02	1.06E-03	1.05E-02	6.09E-04	1.83E+00	injection-0:15
2.95E-02	1.33E-03	1.10E-02	7.36E-04	1.83E+00	injection-0:12
2.95E-02	1.24E-03	1.09E-02	7.04E-04	1.82E+00	injection-0:13
2.95E-02	1.15E-03	1.08E-02	6.59E-04	1.82E+00	injection-0:14

121 kanalı için 10 mm/s giriş hızında tanecik ile sıvı teoriyle tutarlı davranış seğılemiştirlerdir. Çıkan sonuçlardan tanecik ile sıvının benzer davranışlar sergileyecekleri söylenebilir.

Şimdiye kadar yapılan tanecikli akış çözümlemelerinde amaç teori ile matematik modeli karşılaştırmak olmuştur. Bundan sonra ele alınan 141 ve 114 kanalları için hem bu amaç devam ettirilmiş hem de kanallar manyetik alana tabi tutulacaklarından üzerlerinde daha çok durulmuştur. Ayrıca ele alınan iki kanal için çıkışlardaki ayırım yüzdeleri ikinci yolla belirlenmiştir.

5.1.3.3 Kanal 141'de yapılan tanecikli akış çalışması

Daha önce de belirtildiği gibi 141 ve 114 kanalları, manyetik alana tabi tutulacaklarından bu kanallar 111 ve 121 kanallarına nazaran daha ayrıntılı ele alınmıştır. Her bir kanal için 1, 5, 10 mm/s olmak üzere üç giriş hızı için inceleme yapılmıştır.

Her bir hız değeri için sıvı ve taneciklerin xc'yi tercih etme yüzdeleri incelenmiştir.

Kanal 141’de 1 mm/s giriş hızı için yapılan tanecikli akış çalışması

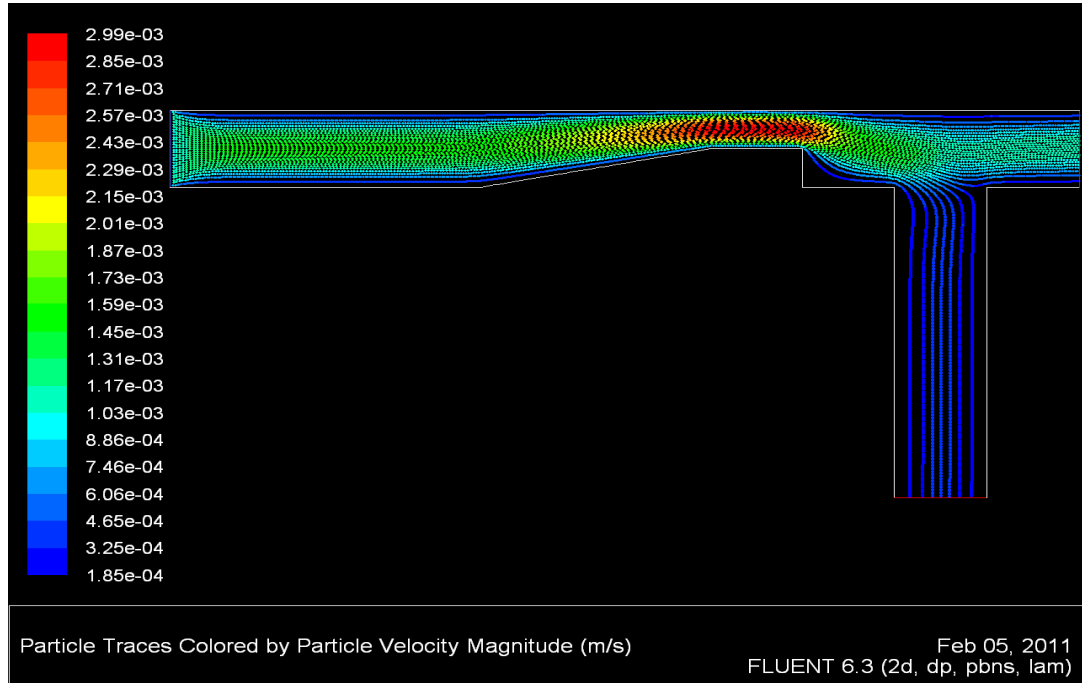
Önceki çalışmalarda izlenen yol 141 kanalı için de tekrarlanmıştır. İlk olarak düşük giriş debileri için inceleme yapılmıştır.

Çizelge 5.9’da kanala tanecik beslenmesinden 112 sn sonra Fluent programı yardımıyla elde edilen sıvıya ait kütleli debi miktarları verilmiştir. Çizelge incelendiğinde yollanan sıvının % 24.26’sının xc’yi tercih ettiği görülür. Bu değer Çizelge 5.2’de verilen kanalda sadece sıvı olması durumundaki değerle eşittir.

Çizelge 5.9 : 141 kanalında 1 mm/s giriş hızı için tanecikli akış sonunda elde edilen suya ait kütleli debi miktarları.

Sınır tipleri	Kütleli debi(kg/s)
çıkış	-0.0022679784
xcıkış	-0.00072662189
giriş	0.0029946002

Şekil 5.20’de taneciklerin dışarıdan herhangi bir etki olmadan asıltı içerisindeki yörüngeleri ve hız değerleri verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi tanecik hız değerleri, Şekil 5.17’de verilen sıvı hız vektörleriyle tutarlılık göstermektedir. Tanecikler, duvara yakın noktalarda ve xc kolunda düşük hız sergilemektedirler.



Şekil 5.20 :141 kanalı için 1 mm/s giriş hızında taneciklere ait hız değerleri.

Tanecikli akış çözümünde 112 sn sonunda her bir çıkıştan çıkan tanecik miktarları Fluent’de ikinci bir yol olarak *Display → Summary → Track* ‘den elde edilir.

Çizelge 5.10’da 141 kanalına 1 mm/s hız ile giren tanecik-su asıltısındaki taneciklerin her bir çıkışı terk etme miktarları verilmiştir.

Çizelge 5.10 : 141 kanalında 1 mm/s giriş hızı için tanecik beslendikten 112 sn sonra her bir çıkıştan çıkan tanecik miktarları.

Sınır tipleri	Tanecik miktarı (kg)
çıkış	2.584e-004
xcıkış	9.369e-005

Çizelgeden, xc’den çıkan tanecik miktarının toplam miktara oranı % 26.61 olarak bulunur. Bu değer % 24.26 su değerine yakın bir değer olup buradan 1 mm/s giriş hızı için tanecik ile akışkanın benzer davranışlar sergilediği sonucu çıkarılabilir.

Kanal 141’de 5 mm/s giriş hızı için yapılan tanecikli akış çalışması

141 kanalında 1 mm/s giriş hızı için yapılan kabul ile sayısal çözümlemenin tutarlığı gözlemdikten sonra aynı kanal geometrisinde farklı hızlarda da tutarlılık olup olmadığının gözlenmesi için aynı işlemler 5 mm/s giriş hızı için de yapılmıştır.

5 mm/s giriş hızında tanecik-su asıltısı için yapılan sayısal çözümleme sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 5.11 ve Çizelge 5.12’de verilmiştir.

Çizelge 5.11 : 141 kanalında 5 mm/s giriş hızı için tanecikli akış sonunda elde edilen suya ait kütleli debi miktarları.

Sınır tipleri	Kütleli debi (kg/s)
çıkış	-0.011272017
xcıkış	-0.0037009837
giriş	0.014973001

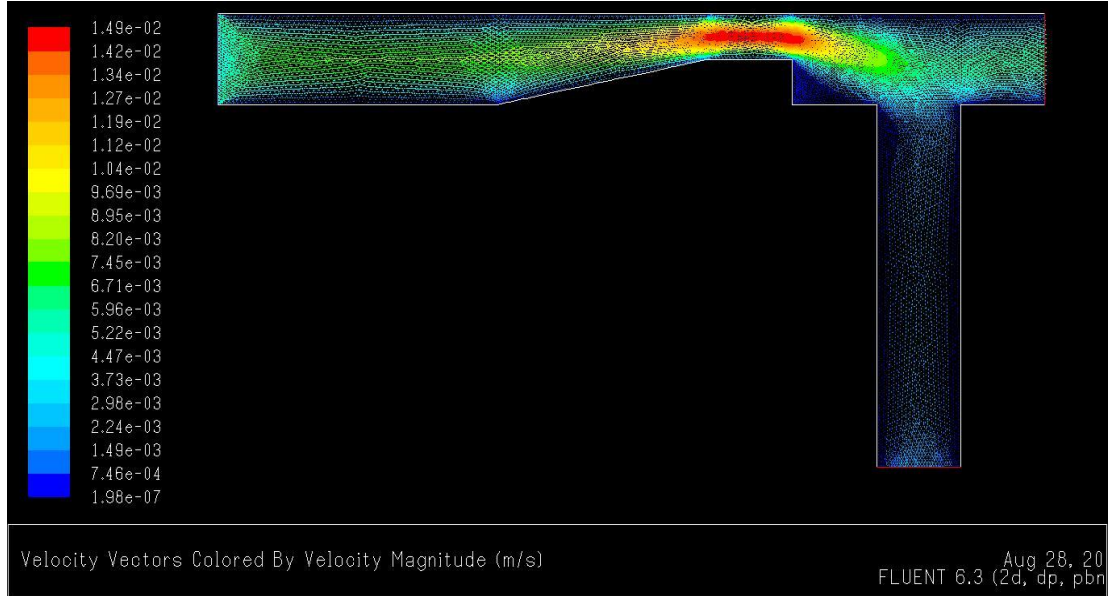
Çizelge 5.11’den akış sonunda sıvı debisinin xc’de yüzde olarak değişmediği (% 24.72) görülür.

Çizelge 5.12’de taneciklerin 23 sn sonunda hangi çıkışları ne miktarda tercih ettikleri verilmiştir. Çizelge 5.12’de verilen tanecik çıkış oranlarında xc değeri % 14 gibi bir değere karşılık gelmektedir.

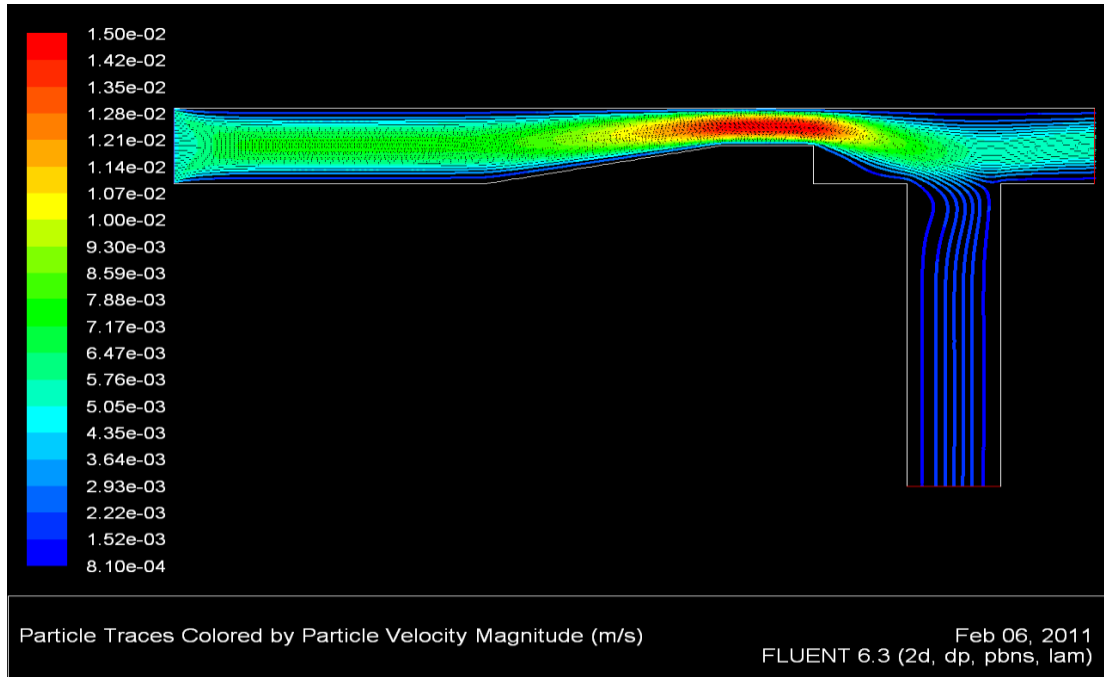
Çizelge 5.12 : 141 kanalında 5 mm/s giriş hızı için tanecik beslendikten 23 sn sonunda her bir çıkıştan çıkan tanecik miktarları.

sınır tipleri	Tanecik miktarı(kg)
çıkış	4.711e-004
xcıkış	7.656e-005

Şekil 5.21’de 141 kanalına 5 mm/s hızla giren suya ait hız vektörleri ve tanecik-su asılısında taneciklere ait yörünge ve hız değerleri verilmiştir. Şekil 5.21a ve b’nin birbirleriyle nitelik ve nicelik olarak tutarlı olduğu görülür.



(a)



(b)

Şekil 5.21 :141 kanalı için 5 mm/s giriş hızında a)sadece sıvı olma durumdaki sıvıya ait hız vektörleri b)tanecik-sıvı asılısı için taneciklere ait hız değerleri.

1 ve 5 mm/s giriş hızları için incelenen ve yapılan kabullerle tutarlılığı gözlenen 141 kanalı yüksek debilerde sistemin cevabının gözlenmesi için 10 mm/s giriş hızı için de sayısal çözümleme yapılmıştır.

Kanal 141'de 10 mm/s giriş hızı için yapılan tanecikli akış çalışması

Kaynaklarda mikrokanallar üzerine yapılan incelemelerde akışın kolay kontrol edilebilmesi için düşük hızda olması istenir. Bu hızlar kimi zaman mm düzeyindeyken kimi zaman da μm düzeyinde olmaktadır. Dolayısıyla sunulan çalışmada incelenen 10 mm/s yüksek hız olarak kabul edilebilir.

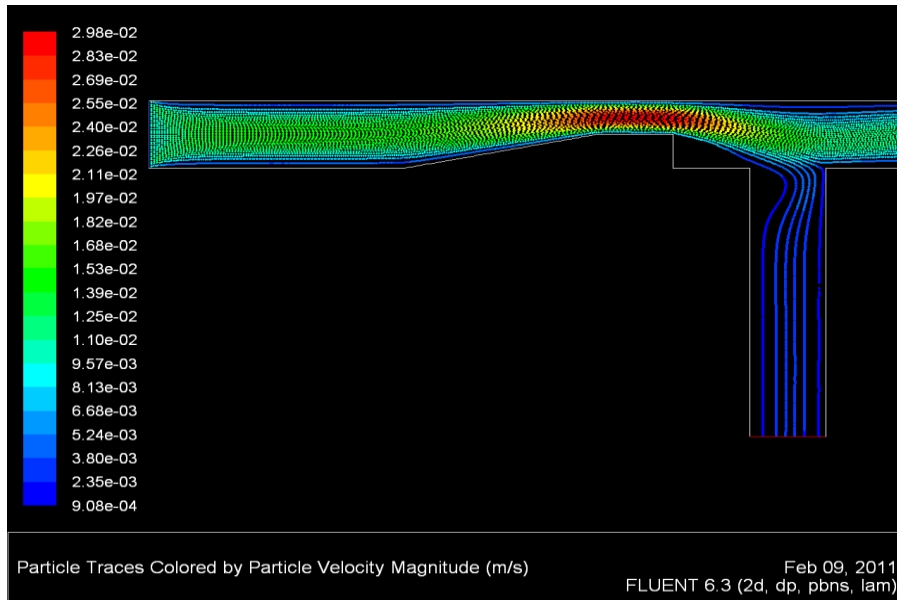
1 ve 5 mm/s hızlarının yanında 10 mm/s hızı için de tutarlılık sağlanması zaman kazancı sağlayacağından böyle bir sonuç mikron akışlarda yapılan işlemlerde önemli bir yer tutar.

Çizelge 5.13'de kanalda tanecikli akış olduğunda giriş ve çıkışlardaki suya ait kütleli debiler verilmiştir. Burada Çizelge 5.2'de sadece su durumundaki xc'yi tercih etme yüzdesi % 19.74 iken taneciğin akışa etkisi pek olmayıp taneciğin eklenmesi ile bu değer % 19.69 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.13 : 141 kanalında 10 mm/s giriş hızı için tanecikli akış sonunda elde edilen suya ait kütleli debi miktarları.

Sınır tipleri	Kütleli debi(kg/s)
çıkış	-0.024048889
xcıkış	-0.0058971127
giriş	0.029946001

Şekil 5.22'de taneciklere ait yörüngeler ve hız değerleri verilmiştir.



Şekil 5.22 :141 kanalında 10 mm/s giriş hızı için taneciklere ait hız değerleri.

Sıvı kütleli debisi belirlendikten sonra tanecik için çıkışları terk etme miktarları Çizelge 5.14'de verilmiştir.

Çizelge 5.14 : 141 kanalında 10 mm/s giriş hızı için tanecik beslendikten 13 sn sonra her bir çıkıştan çıkan tanecik miktarları.

sınır tipleri	Tanecik miktarı(kg)
çıkış	2.660e-004
xcıkış	5.906e-005

Çizelgeden xc'yi tercih eden miktar % 18.17 olarak belirlenmiş; su değeriyle pek fark gözlenmemiştir.

141 kanalında üç giriş hızı için tanecikli çözüm yapılmış ve sonuçların teorideki seyreltik asıltı kabulüyle tutarlı olduğu sayısal çözümleme ile gösterilmiştir. Dolayısıyla verilen şartlarda seyreltik asıltı kabulü yapılabileceği ve bu kabul altında sıvı davranışı incelenerek, taneciğin benzer davranış sergileyebileceği söylenebilir. Tanecikli akış çözümlemesi incelenen kanalda manyetik alan etkisine geçilir.

5.1.3.4 Kanal 114'de yapılan tanecikli akış çalışması

141 kanalı üzerinde yapılan tanecik-su asıltı incelemelerinde tutarlılık sağlandıktan sonra 114 kanalına geçilmiştir. 114 kanalı düşük hızlarda manyetik alan uygulanmadığında pek de parlak sayılabilecek (xc'ye yönelim yüzdeleri bakımından) bir kanal geometrisi değildir.

114 kanalını cazip hale getiren etmen manyetik alandır. Kaynaklarda manyetik etkinin uzun sürmesinin ayırma verimini artırdığı belirtilir. Dolayısıyla xc çıkışına yakın yerleştirileceği düşünülen mıknatısın z boyunca tanecikleri yönlendirebileceği düşünüülerek 114 kanalı da inceleme altına alınmıştır.

Kanal 114'de 1 mm/s giriş hızı için yapılan tanecikli akış çalışması

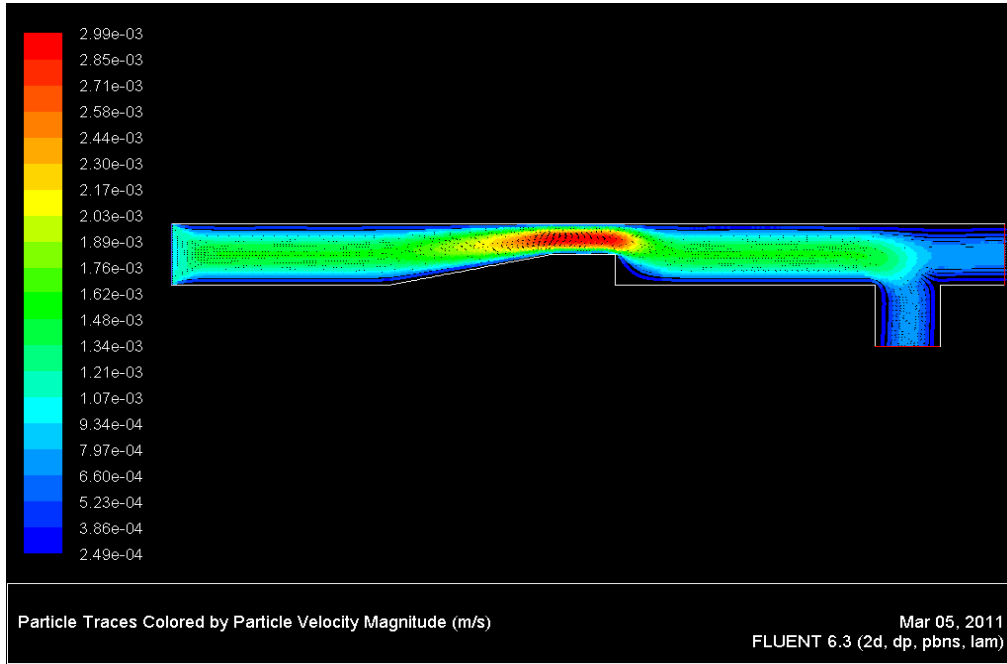
141 kanalında uygulanan basamaklar 114 kanalında da tekrarlanmıştır. Çizelge 5.15'de kanalda tanecikli akış olduğunda giriş ve çıkışlardaki suya ait kütleli debiler verilmiştir.

Çizelge 5.15 : 114 kanalında 1 mm/s giriş hızı için tanecikli akış sonunda elde edilen suya ait kütleli debi miktarları.

Sınır tipleri	Kütleli debi (kg/s)
çıkış	-0.0015627823
xcıkış	-0.0014318179
giriş	0.0029946002

Çizelgeden taneciğin akışa etkisinin pek olmadığı görülür. Burada tanecikli akış sonundaki su yüzdesi, sadece su durumundaki xc'yi tercih etme yüzdesi ile eşitir.

Şekil 5.23’de taneciklere ait yörüngeler ve hız değerleri verilmiştir.



Şekil 5.23 : 114 kanalı için 1 mm/s giriş hızında taneciklere ait hız değerleri.

Asıltıdaki tanecikler için akış sonunda çıkışları terk etme miktarları Çizelge 5.16’da verilmiştir.

Çizelge 5.16 : 114 kanalında 1 mm/s giriş hızı için tanecik beslendikten 93.2 sn sonunda her bir çıkıştan çıkan tanecik miktarları.

Sınır tipleri	Tanecik miktarı(kg)
çıkış	3.192e-004
xcıkış	2.815e-004

xc’yi tercih eden miktar % 46.86 olarak belirlenmiştir. Bu değer Çizelge 5.2’de verilen kanalda sadece sıvı olması durumundaki yüzde değeriyle tutarlıdır.

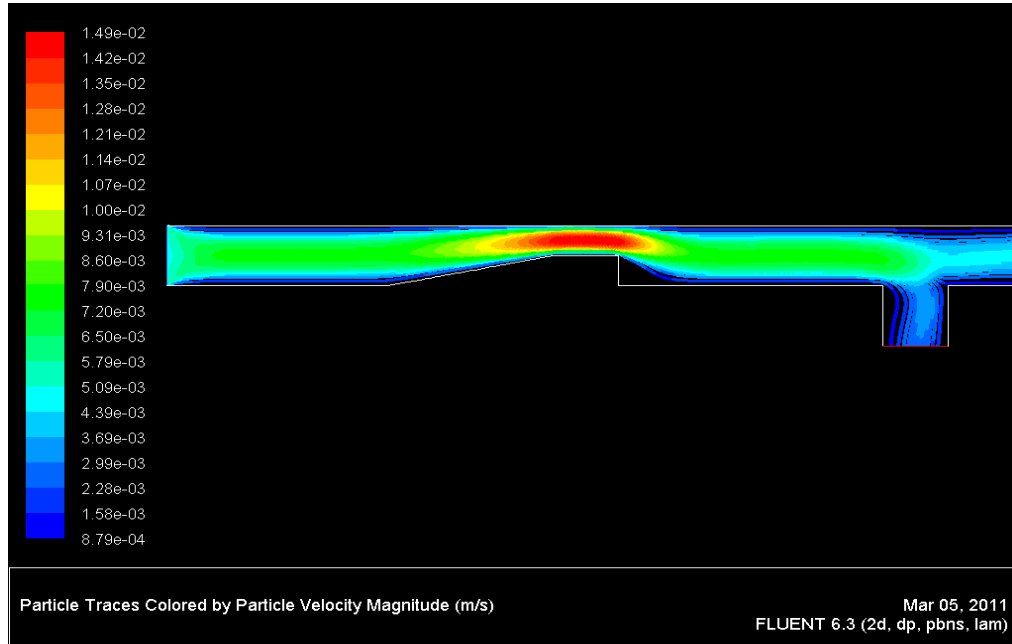
Kanal 114’de 5 mm/s giriş hızı için yapılan tanecikli akış çalışması

Çizelge 5.17’de kanalda tanecikli akış olduğunda giriş ve çıkışlardaki suya ait kütleli debiler verilmiştir. Bu değer Çizelge 5.2’de verilen taneciğin akışa etkisi olmayıp sadece su durumundaki xc’yi tercih etme yüzdesi ile hemen hemen aynıdır.

Çizelge 5.17 : 114 kanalında 5 mm/s giriş hızı için tanecikli akış sonunda elde edilen suya ait kütleli debi miktarları.

sınır tipleri	Kütleli debi(kg/s)
çıkış	-0.0092162844
xcıkış	-0.0057567167
giriş	0.014973001

Şekil 5.24’de taneciklere ait yörüngeler ve hız değerleri verilmiştir.



Şekil 5.24 : 114 kanalı için 5 mm/s giriş hızında asıltıdaki taneciklere ait yörüngeler ve hız değerleri.

Sıvının çıkışlardaki kütleli debisi belirlendikten sonra tanecikler için çıkışları terk etme miktarları Çizelge 5.18’de verilmiştir. xc’yi tercih eden miktar Çizelge 5.2’de verilen sıvı değeri ile tutarlı olup % 35.30 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.18 : 114 kanalında 5 mm/s giriş hızı için tanecik beslendikten 19.22 sn sonunda her bir çıkıştan çıkan tanecik miktarları.

Sınır tipleri	Tanecik miktarı (kg)
çıkış	3.112e-004
xcıkış	1.698e-004

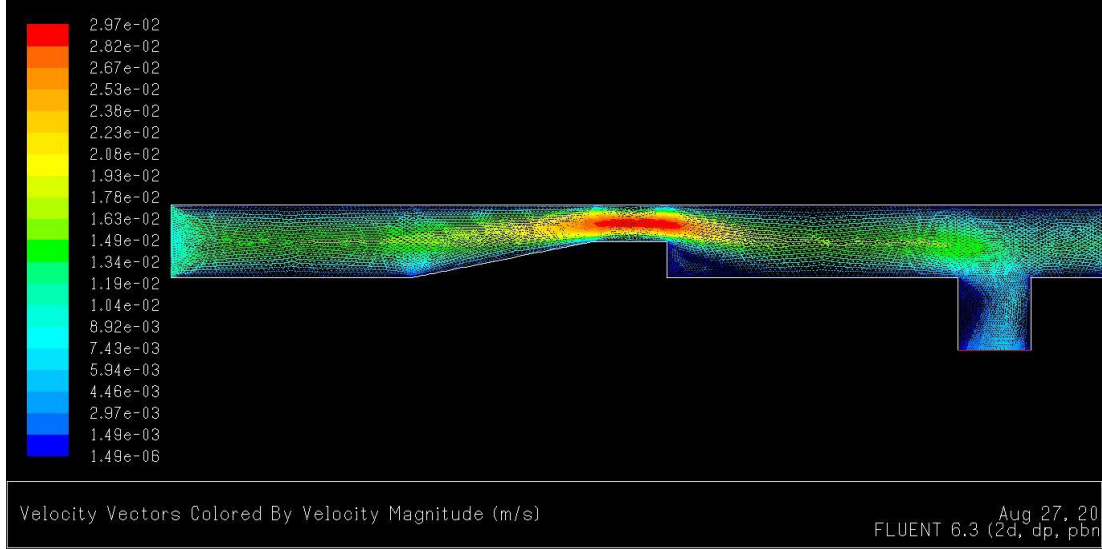
Kanal 114’de 10 mm/s giriş hızı için yapılan tanecikli akış çalışması

Çizelge 5.19’da kanalda 10 mm/s giriş hızında tanecikli akış olduğunda giriş ve çıkışlardaki suya ait kütleli debiler verilmiştir. Bu doğrultuda taneciğin akışa etkisi pek olmadığı ve sadece su durumundaki xc’yi tercih etme yüzdesi % 29.39 iken taneciğin eklenmesi ile bu değerin % 29.35 olduğu belirlenmiştir.

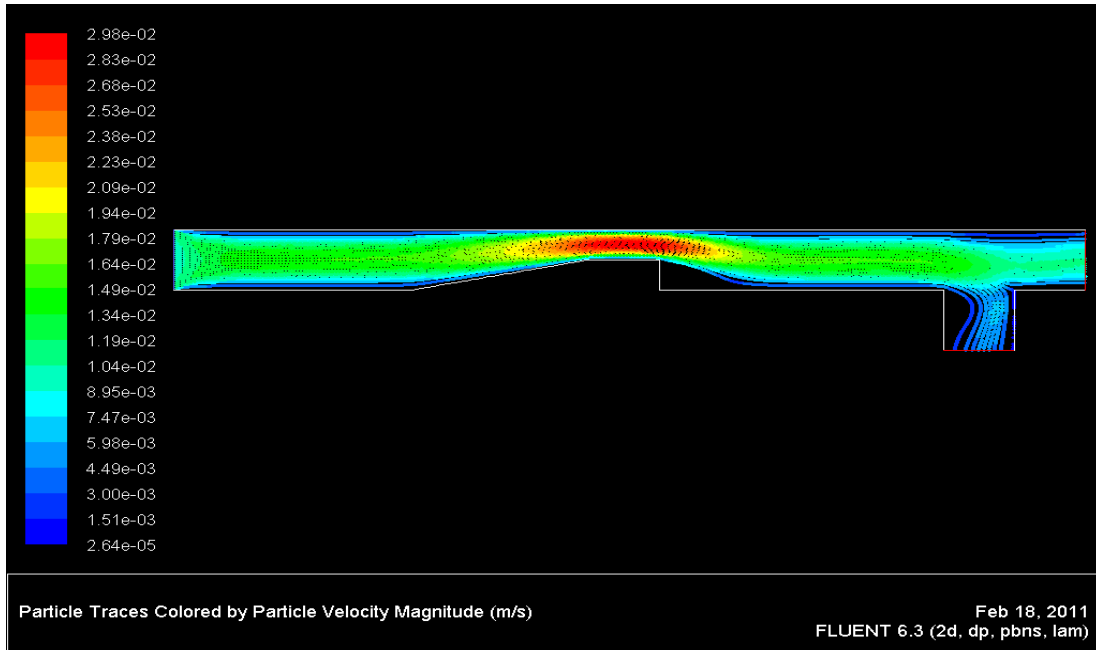
Çizelge 5.19 : 114 kanalında 10 mm/s giriş hızı için tanecikli akış sonunda elde edilen suya ait kütleli debi miktarları.

Sınır tipleri	Kütleli debi(kg/s)
çıkış	-0.021156978
xcıkış	-0.0087890234
giriş	0.029946001

Şekil 5.25’de 114 kanalında 10 mm/s giriş hızı için taneciklere ait hız değerleri ve yörüngeleri verilmiştir. Şekil 5.25a ile Şekil 5.25b’den taneciğin sıvı davranışı üzerinde hissedilir etki yaratmadığı söylenebilir. Dolayısıyla seyreltik asıltı kabulü yapılabilir.



(a)



(b)

Şekil 5.25 : 114 kanalında 10 mm/s giriş hızı için (a)kanalda sadece sıvı olduğu durumdaki hız vektörleri (b)tanecikli akışta taneciklere ait hız değerleri ve yörüngeleri.

Sıvı kütleli debisi belirlendikten sonra tanecik için çıkışları terk etme miktarları Çizelge 5.20’de verilmiştir. Çizelgeden taneciğin xc’yi tercih etme yüzdesi % 24.47 olarak belirlenir.

Çizelge 5.20 : 114 kanalında 10 mm/s giriş hızı için tanecik beslendikten 10 sn sonra her bir çıkıştan çıkan tanecik miktarları.

Sınır tipleri	Tanecik miktarı(kg)
çıkış	3.191e-004
xcıkış	1.034e-004

Bu bölümde, matematik modeli kurulan sistemde, tanecik derişikliği sonucu belirlenen, seyreltik asıltı kabulü irdelenmiştir. İncelemeye alınan dört kanal ve iki kanal için yapılan farklı üç hız değeriindeki sonuçlardan, tanecik ile sıvının benzer davranış sergiledikleri çıkarılabilir. Dolayısıyla yapılan kabulün doğruluğu sayısal çözümleme ile de gösterilmiş ve kanal içinde manyetik etkiye geçilmiştir.

5.1.4 Belirlenen kanallarda manyetik alan etkisiyle tanecik ayırma

141 ve 114 kanallarında manyetik alan etkisi sonucunda doğan kuvvet, C programında yazılan UDF ile Fluent programına dahil edilir. Kuvvet ifadesinin programa tanıtımında kullanılan Denklem (3.16)'da akışkan özellikleri dışında taneciğe ait bir özellik olan χ_t değerine ve Denklem (3.17)'de verilen manyetik alan şiddetine ihtiyaç olduğu görülür. Kuvvet ifadesinde önemli rol oynayan χ_t ve H parametrelerinin eldeleri bu bölümün alt başlıklarında verilmiştir.

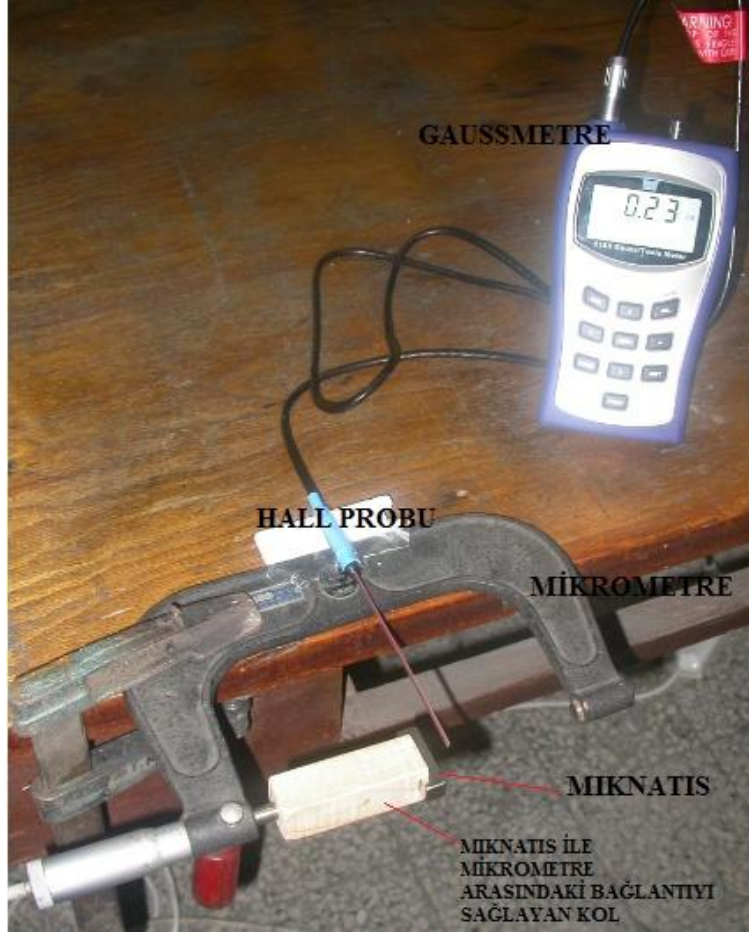
5.1.4.1 Sayısal çözümlemede kullanılan mıknatısa ait H ifadesinin eldesi

Denklem (2.7a)- (2.9b)'de dikdörtgen kesitli bir mıknatısın etrafında oluşturduğu manyetik alan ifadeleri verilmiştir. Mıknatıs dışında manyetik alan ile manyetik alan şiddeti arasındaki ilişki $B = \mu_o H$. Denklemlerde yer alan B'nin μ_o 'a bölümünden H'nin akışkan ve tanecik özelliklerine bağlı ifadesi elde edilir. Beliren yeni ifadede mıknatısa ait bir sabit olan M_s değerine ihtiyaç olduğu görülür.

Sunulan bu çalışmada manyetik alan kaynağı olarak NdFeB mıknatısı kullanılmıştır. NdFeB mıknatısı için M_s değeri kaynaklarda $8 \cdot 10^5$ A/m olarak geçmektedir (Furlani, 2005). Bu değer genel bir değer olup piyasada kullanılan bileşimlere göre farklılık gösterebilmektedir. Bu noktada M_s 'nin doğru saptanması gerekmektedir.

Kaynaklarda yer alan çalışmaların bir kısmında, incelenen kanal üzerindeki manyetik alan şiddeti, Gaussmetre veya Hall probu yardımıyla bulunmuştur fakat kullanılan prop özelliklerinde prop ucunun kalınlığının ölçüme etkisinin ihmal edildiği ve manyetik alanın lineer değiştiği kabul edilmiştir. Ek.B Şekil B.1'de verilen probun ölçme kısmı 0.045'' dolayısıyla 0.1 cm'dir. Sunulan bu çalışmada kanal üzerindeki

manyetik etki kanal genişliğince incelenmektedir. 3 mm'lik genişliği olan bir kanalda verilen probun ölçüm kısmının kanalın 1/3'üne denk geldiği dolayısıyla bu durumda ölçüm kısmının ihmal edilebilir olmadığı görülür. Bu noktada Gaussmetre 3 mm kanal genişliğindeki bir kanalda manyetik alan ölçmek yerine teoride verilen manyetik alan şiddetleri ile karşılaştırmada kullanılmış ve bunun için bir deney düzeneği kurulmuştur. Şekil 5.26'da Gaussmetre yardımıyla mıknatısın etrafında oluşturduğu manyetik alanının ölçümü için kurulan deney düzeneği gösterilmiştir.

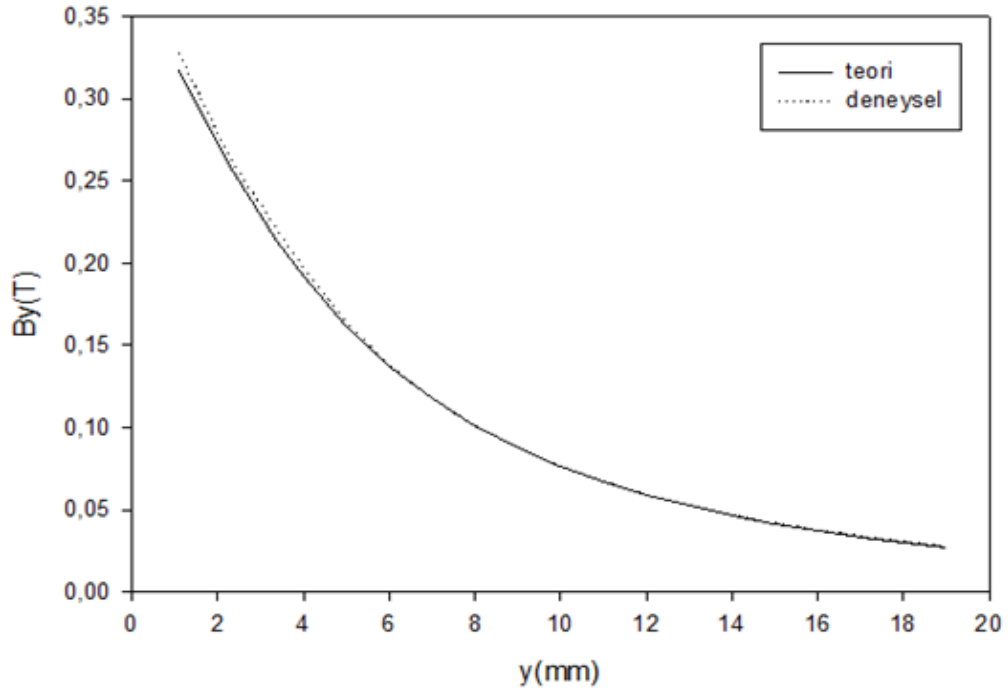


Şekil 5.26 : Mıknatısın etrafında oluşturduğu manyetik alanın teori ile karşılaştırılması için kurulan deney düzeneği.

Kurulan düzenekte mıknatısın manyetizasyon yönü y kabul edilerek, Gaussmetre aracılığıyla kutupları belirlenen mıknatısın N kutbu, propla paralel olacak şekilde tutma koluna yerleştirilmiştir. Tutma kolu, belirlenen kanalın küçük boyutta olduğu göz önüne alınarak kanaldaki mikron değişimlerde mıknatıs alanının değişimini belirlemek için bir mikrometreye bağlanmıştır. Denklem (2.7a)-(2.9b) denklemleri Matlab programı yardımıyla çözülmüş ve sonuçları deneysel düzenden elde edilen sonuçlarla birlikte Çizelge 5.21' de verilmiştir.

Çizelge 5.21 : 10mm*35mm*10mm ölçülerindeki NdFeB mıknatısının oluşturduğu manyetik alanın deneysel ve teorik sonuçları.

$y(x=0,z=0)$	B_y teori (T)	B_y deneysel (T)
1.1	0.3172	0.3277
2.2	0.2632	0.2676
3.4	0.2131	0.2193
4	0.1918	0.1975
5	0.1617	0.1639
6	0.1371	0.1379
7	0.1172	0.1174
8	0.1009	0.1009
9	0.0875	0.0875
10	0.0763	0.0764
11	0.0669	0.0672
12	0.059	0.0594
13	0.0523	0.0527
14	0.0465	0.047
15	0.0415	0.0421
16	0.0372	0.0378
17	0.0335	0.0341
18	0.0302	0.0309
19	0.0273	0.0280



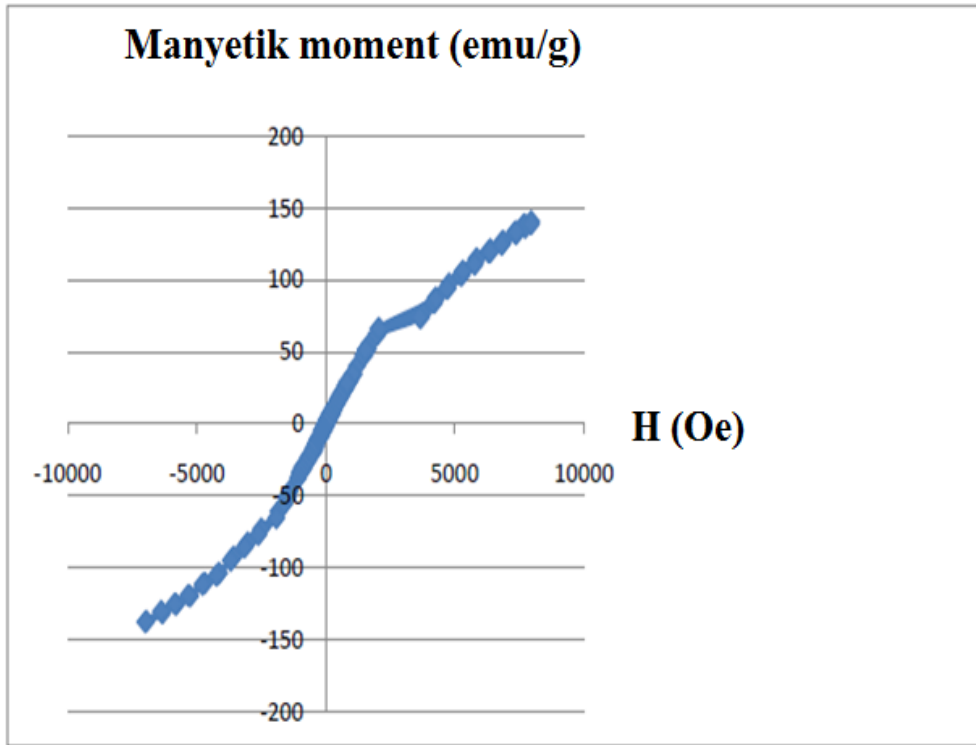
Şekil 5.27 : $x=0$, $z=0$ noktasında B_y 'nin y ile değişiminin deneysel ve teorik sonuçlarının karşılaştırılması.

Çizelge 5.21 ve Şekil 5.27 incelendiğinde deneysel sonuçlar ile teorik sonuçların birbirleriyle örtüşükleri ve B_y manyetik alanının $y=4$ mm'e kadar lineer denebilecek düzeyde olduğu fakat ardından bu lineerliğin korunmadığı görülür.

Ek.A'da Matlab programı yardımıyla elde edilen manyetik alan ve konum ilişkisini veren bazı grafikler yer almaktadır. Bu sonuçlardan yola çıkarak alan ile konumun lineerlikten öte parabolik değişim sergilediği söylenebilir. Burada mıknatısın N kutbunun olduğu yüzeyin merkezi, $(x, y, z)=(0, 0, 0)$ noktası dolayısıyla mıknatısın koordinat merkezi alınmıştır.

5.1.4.2 Sayısal çözümlemede kullanılan taneciğe ait X_t ifadesinin eldesi

X_t ifadesine bölüm üçte kısaca değinilmiş olup İTÜ Fizik Mühendisliği bünyesinde yapılan ölçümler sonucunda elde edilen M-H eğrisi Şekil 5.28'de verilmiştir. Şekilde eğri eksenlerindeki birimler, ölçüm sırasında kullanılan birimler (ölçüm aletlerine ait) olduğu göz önüne alınarak; kaynak korunup SI sistemine dönüştürülmemiştir.



Şekil 5.28 : Deneysel çalışma ve sayısal çözümlemede kullanılan taneciğe ait M-H eğrisi

Şekilde yatay eksen manyetik alan şiddetinin Oe cinsinden değerini gösterirken dikey eksen manyetik momentin emu/gr cinsinden değerini vermektedir. Eğrinin eğimi, taneciğin kütleli duyarlılığının cgs sistemindeki değerini verir. Bu değer

$4\pi\rho_t$ ile çarpılırsa taneciğin hacimsel manyetik duyarlılığı elde edilir. Eğrinin eğiminin verilen aralıklarda alınması yerine, mıknatısın uygulandığı 0- 0.4 T aralığında alınması daha hassas sonuç verir. Bu şekilde eğrinin eğimi ile $4\pi\rho_t$ ifadesinin çarpılması sonucunda $X_t=2.5656$ olarak belirlenir. Bu değer taneciğin ferromanyetik olduğunu gösterir fakat Şekil 5.28'den uygulanan manyetik alanın, taneciğin doyuma ulaşmadığı noktada uygulandığı görülür. Dolayısıyla Denklem (3.16)' da verilen manyetik kuvvet ifadesinde, M ile H'nin lineer olduğu kabulünün çalışmada kullanılan ferromanyetik doymamış tanecik için de geçerli olduğu kabul edilir.

Kuvvet ifadesindeki belirsizliği giderilen H ile X_t değerlerinin elde edilmesinden sonra 141 ve 114 kanallarındaki manyetik ayırma uygulamalarına geçilir.

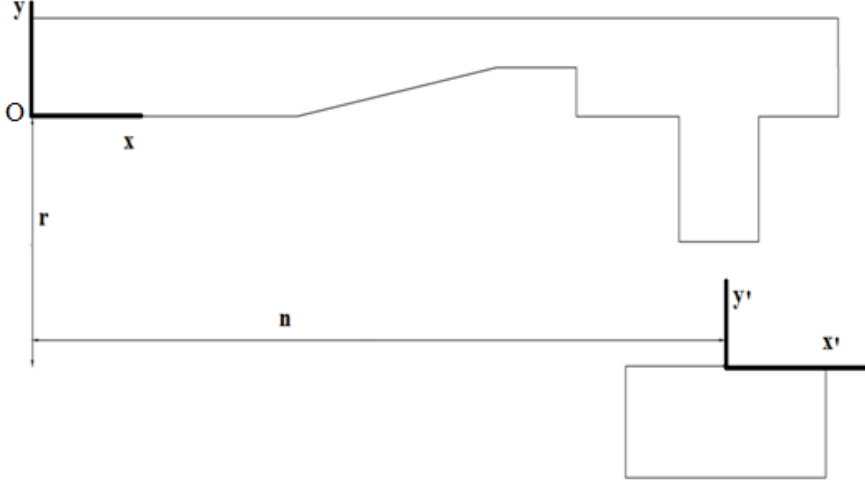
5.1.4.3 Manyetik alanın uygulanması

Bu bölümde manyetik alanın tanecik davranışı üzerindeki etkisinin gözlenmesi amacıyla farklı mıknatıs konumları için sayısal çözümleme yapılmıştır. Yapılan çözümlemelerden birkaçı aşağıda verilmiş olup amaç tanecik-su asıltısındaki tanecikleri sudan verimli şekilde ayırmak için gerekli olan kanal ve mıknatıs konumlarının tespit edilmesidir.

Deneyisel çalışma ve sayısal çözümlemelerde NdFeB sürekli mıknatısı kullanılmıştır. Denklem (2.7a)-(2.9b)'de verilen eşitlikler mıknatıs koordinatları için geçerlidir. Tanecik hareket denkleminde manyetik kuvvet ifadesi uygulanırken koordinat değişikliği yapılması gerekmektedir. Mıknatıs ile kanal koordinatları r ve n olarak ifade edilen iki parametre aracılığıyla birbirleriyle ilişkilendirilmişlerdir. Şekil 5.29'da verildiği gibi r ve n sırasıyla; mıknatısa ait $y'=0$ ile kanala ait $y=0$ ve mıknatısa ait $x'=0$ ile kanala ait $x=0$ noktaları arasındaki uzaklıklardır.

Manyetik alanın uygulandığı konum r ve n'ye göre isimlendirilir. Konum, kanal girişinde O köşe noktası (kanalın koordinat merkezi) ile mıknatıs yüzey merkezi (mıknatısın koordinat merkezi) arasındaki uzaklık cinsinden yazılır. x yönünde $x=0$ noktasına 10 mm, y yönünde $y=0$ noktasına 20 mm uzaklıktaki mıknatıs için manyetik alan konumu r20n10 şeklinde isimlendirilir.

Manyetik ayırma ilk olarak 141 kanalına uygulanmıştır. 141 kanalından çıkan sonuçlardan yararlanılarak 114 kanalı üzerinde inceleme yapılmıştır.



Şekil 5.29 : Mıknatıs ile kanalın yerleşimi ve r-n parametrelerinin konumu.

141 kanalı üzerinde yapılan manyetik alan çalışmaları

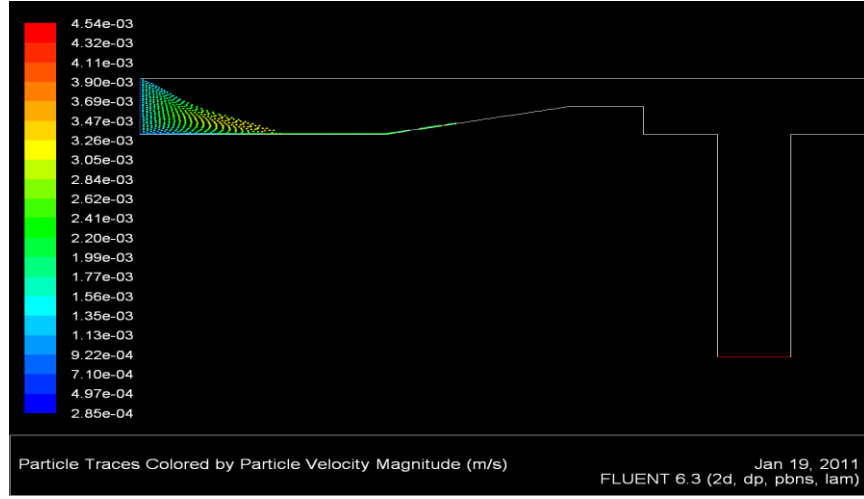
İlk olarak yatayda $x=0$ noktasından 25 mm, düşeyde $y=0$ noktasından 15 mm uzaklıktaki mıknatıs konumu için farklı giriş hızlarında sayısal çözümleme yapılmıştır.

r15n25

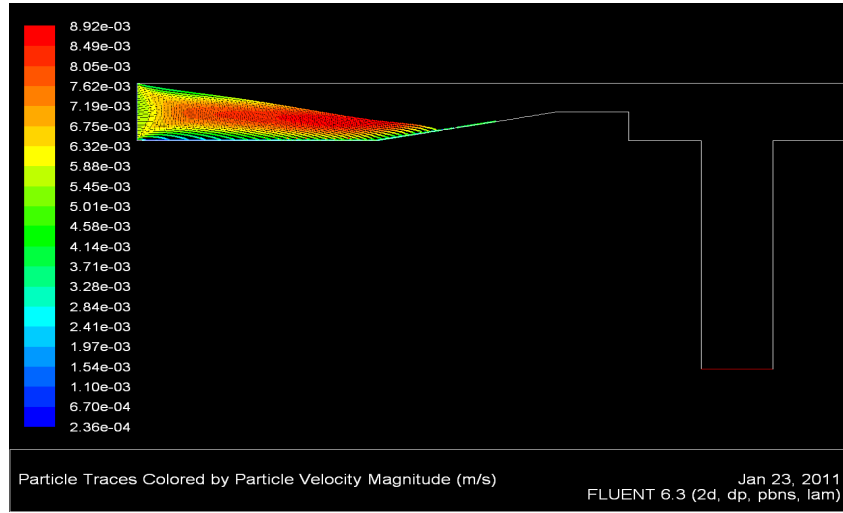
r15n25 mıknatıs konumu için yapılan sayısal çözümleme sonuçları Şekil 5.30'da verilmiştir.

r15 konumuna yerleştirilen mıknatıs, 3 mm giriş genişliğindeki kanalda akan asıltı içindeki taneciğe, xc kolu başlangıcına kadar $y' = 15$ mm ile $y' = 18$ mm boyunca etki eder. EK.A'da Şekil A.1 incelendiğinde verilen y' aralığında mıknatıs kuvvetinin 10^{-9} N düzeyinde olduğu görülür.

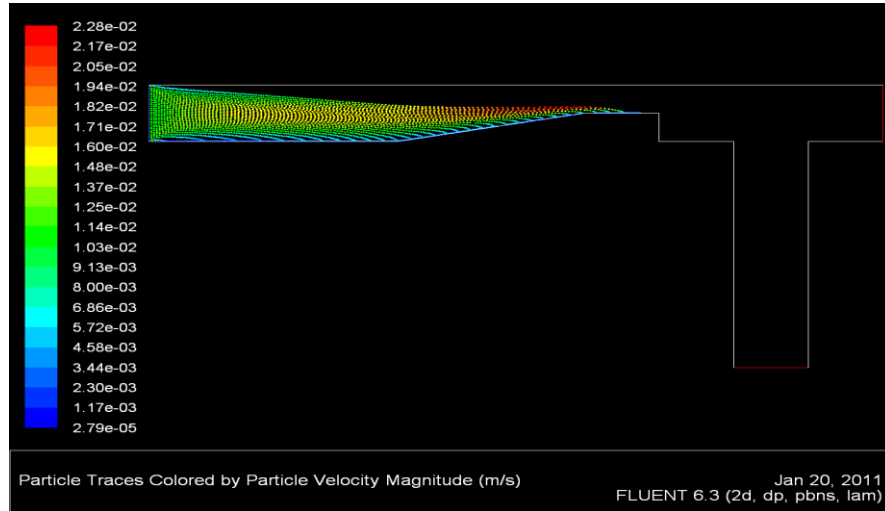
Daha önceki bölümde bahsedildiği gibi tanecik yörünge denkleminde özellikle sürüklenme ve manyetik kuvvetler (atalet kuvveti diğer kuvvetler yanında ihmal edilebilir düzeyde olup yörünge denkleminin hassas hesabı için ihmal edilmediği belirtilmişti) etkilidir. Sürüklenme kuvveti, sıvı ile tanecik hız farkı fonksiyonu olup (Re_t) asıltının kanala düşük hızla girmesinden dolayı çok küçüktür. Şekil 5.30a' da kanala 1 mm/s giriş hızı ile giren asıltıdaki tanecikler ile sıvı hızları hemen hemen aynı olup sürüklenme kuvveti manyetik kuvvet yanında çok küçük kalmaktadır. Dolayısıyla Şekil 5.30a'da verildiği gibi tanecikler, manyetik etkinin büyüklüğünden dolayı rampaya ulaşmadan kanal girişinde oturmuşlardır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.30 : 141 kanalına farklı giriş hızlarında giren tanecik-su asıltısındaki taneciklerin, r15n25 konumundaki mıknatısın oluşturduğu manyetik alan etkisi altındaki davranışları (a)1 mm/s (b)5 mm/s (c)10 mm/s

Şekil 5.30'da sonuçları verilen r15n25 mıknatıs konumu için çıkan sayısal çözümlere göre; kanala girişteki hız değeri arttıkça taneciğin kanalda kat ettiği yol artmış fakat bu bütün taneciklerin 10 mm/s giriş hızında dahi rampayı geçemeyip kanalda oturmalarını engelleyememiştir.

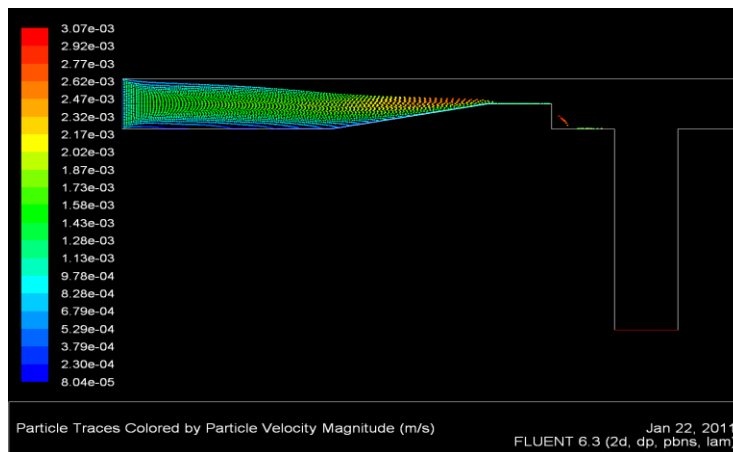
Bu tür bir ayırma yığılaştırma yöntemine örnek teşkil edebilir fakat bu çalışmada sürekli ayırma amaçlandığından, mıknatıs konumunda değişiklik yapılması gerekli görülmüştür.

Mıknatısın bir sonraki konumunun belirlenmesinde kuvvet dengesi göz önüne alınmıştır. Taneciğin hızı d uzunluğu boyunca çok düşük olduğundan r15n25 mıknatıs konumunda tanecik, rampaya dahi ulaşmadan kanalda oturmuştur. Bu noktada rampa üst köşesinde kesit daralması sonucu taneciğin hızının artacağı düşünülmüş ve mıknatıs x konumunda ötelenmiştir. Bu şekilde rampa üst köşesi ardında sürüklenme ve atalet kuvvetlerinin de etkin olması amacıyla r sabit tutularak n konumu 25 mm'den 40 mm'ye çekilmiştir.

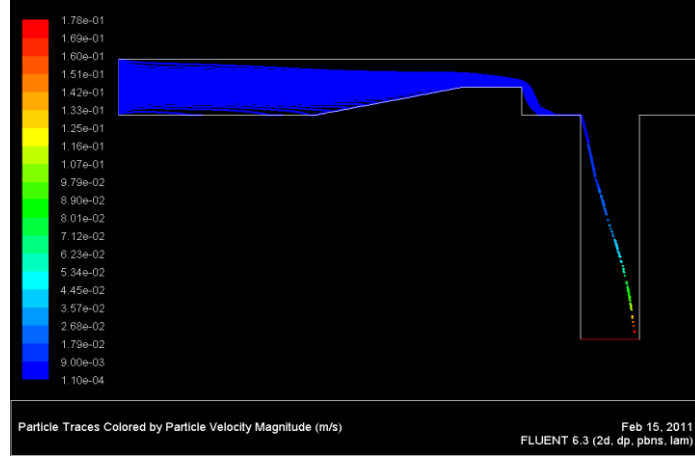
r15n40

Şekil 5.31'de mıknatısın r15n40 konumuna yerleştirilmesi sonucunda oluşan taneciklerin yörüngeleri ve hız değerleri verilmiştir.

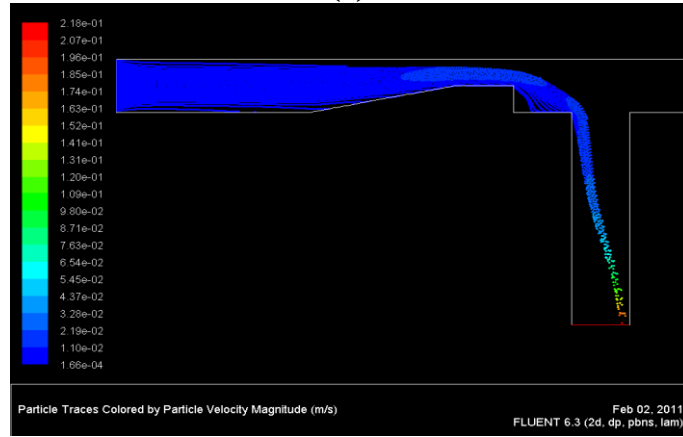
Şekil 5.31a'da asıltı giriş hızının 1 mm/s olduğu durum verilmiş ve bu durumda bir önceki incelemeye benzer olarak tanecik sürüklenme kuvveti manyetik kuvveti yenemediğinden taneciklerin tamamı kanalda oturmuşlardır. Bunun yanında Şekil 5.30a'da 1 mm/s giriş hızı için tanecikler, rampa alt köşesine dahi ulaşamamışken burada mıknatısın konum değişiminin etkisiyle rampa üst köşesine kadar çıkabilmişlerdir.



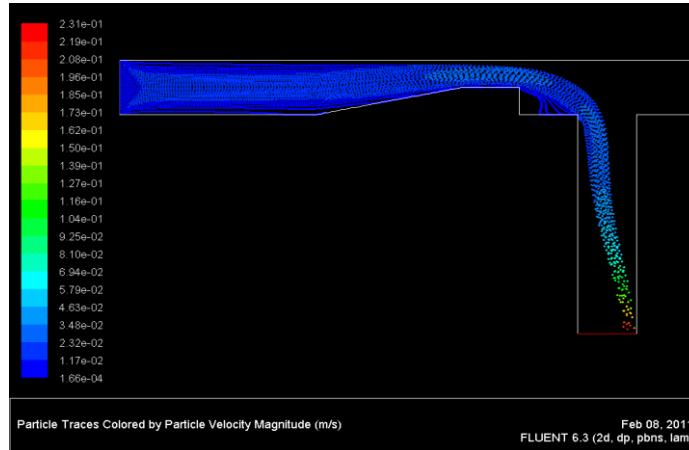
(a)



(b)



(c)

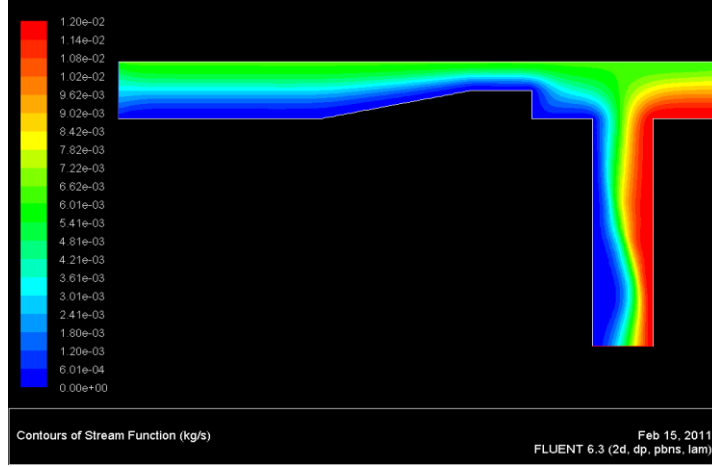


(d)

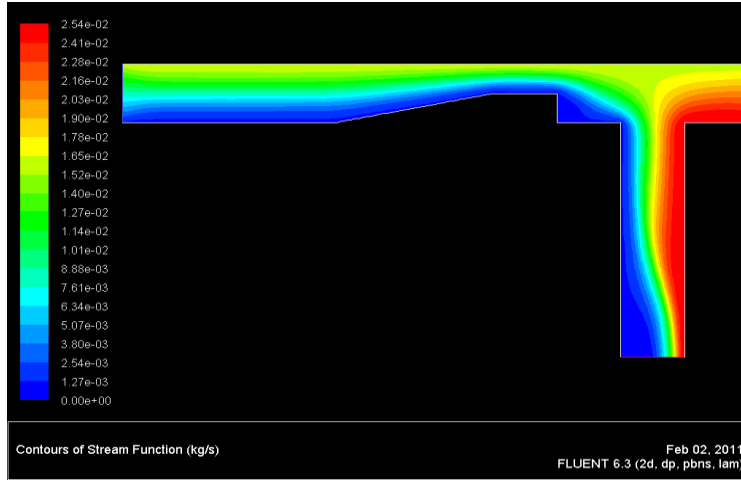
Şekil 5.31 : 141 kanalına farklı giriş hızlarında giren tanecik-su asıltısındaki taneciklerin, r15n40 konumundaki mıknatısın oluşturduğu manyetik alan etkisi altındaki davranışları (a)1 mm/s (b)2 mm/s (c)5 mm/s (d)10 mm/s

Şekil 5.30 ve Şekil 5.31a için elde edilen sonuçlar kuvvet ifadesinde, n parametresinin, r kadar etkili olmamasının, ayırmada etkin olmadığı anlamı çıkarılamayacağını gösterir. Şekil 5.31b, c ve d’de sırasıyla 2 mm/s, 5 mm/s ve 10 mm/s giriş hızları için taneciklerin bir kısmının kanalda oturduğu geri kalan kısmının

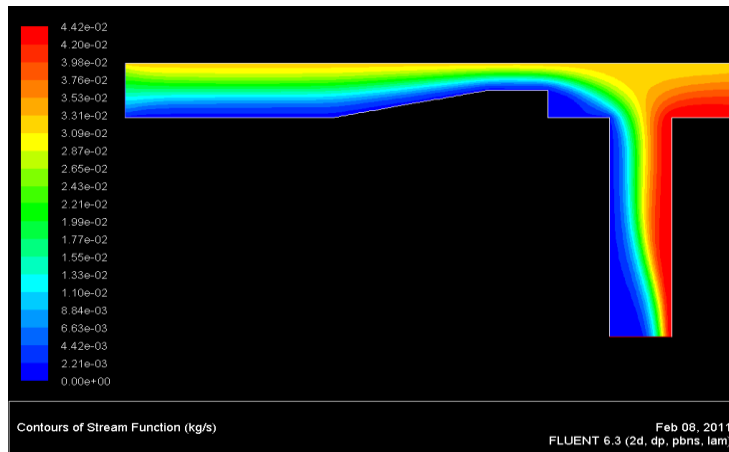
ise xc'yi tercih ettikleri görülür. Şekil 5.32 ve Şekil 5.33'de sırasıyla taneciklere ait akım fonksiyonu ve basınç konturleri verilmiştir.



(a)

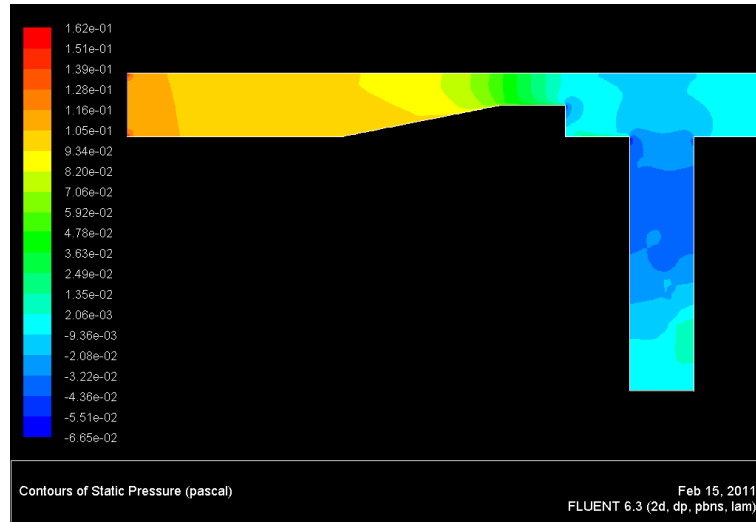


(b)

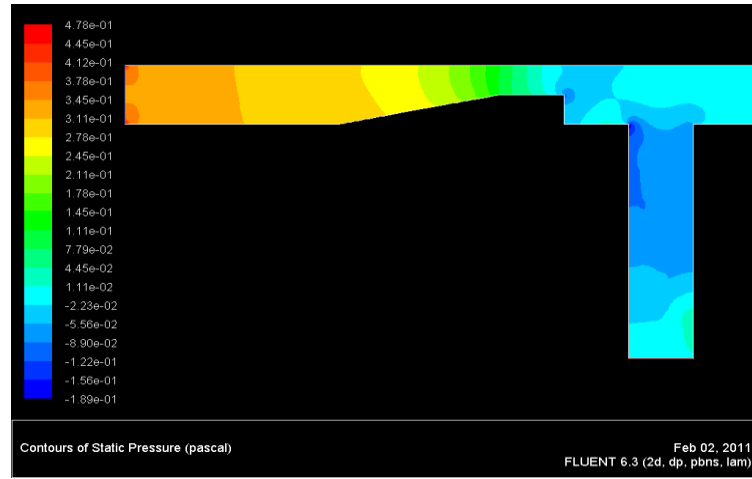


(c)

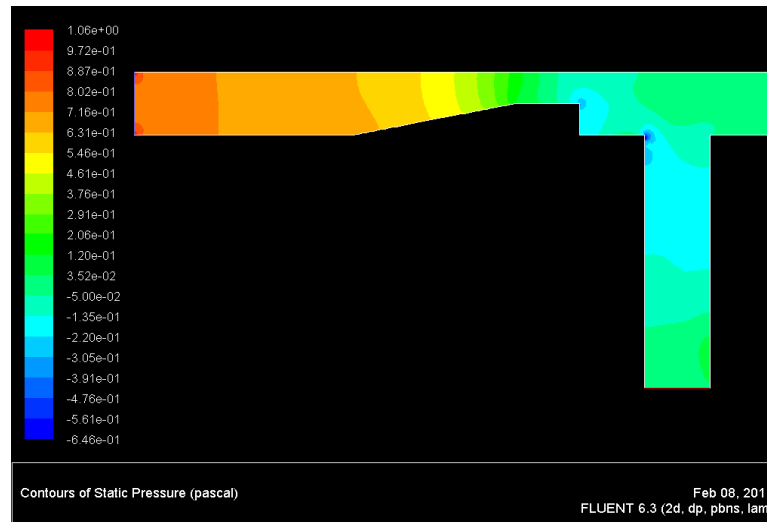
Şekil 5.32 : r15n40 konumundaki mıknatısın oluşturduğu manyetik alan etkisi altında bulunan, kanala farklı giriş hızlarında giren tanecik-su asılısındaki suya ait akım fonksiyonu konturleri (a)2 mm/s (b)5 mm/s (c)10 mm/s.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.33 : Farklı giriş hızlarında, r15n40 konumundaki mıknatısın oluşturduğu manyetik alan etkisi altındaki tanecik-su asılısında suya ait basınç konturleri (a)2 mm/s (b)5 mm/s (c)10 mm/s.

Şekil 5.31’de 1 mm/s giriş hızı dışındaki hızlar için manyetik etki altında kanalda oturan tanecikler dışındaki tüm taneciklerin xc’yi tercih ettiği görülür. İlk gözlem olarak, bu iyi bir sonuç olarak yorumlanabilir lakin Şekil 5.32 ve Şekil 5.33 incelendiğinde taneciklerin xc’ye yönelmeleriyle ardında düşük basınç oluşturdukları; sıvıyı da beraberinde götürdükleri ve c’de ters akışa neden oldukları görülür.

Çalışmanın amacı olabildiğince fazla miktarda taneciği xc’ye yöneltmenin yanında sıvının yüksek oranda c’yi tercih ederek taneciklerden ayrılmasıdır. Dolayısıyla r15n40 mıknatıs konumu için taneciğin sıvıdan ayrılması verimli olarak belirtilemez.

r15 mıknatıs konumu için tanecikler n ve hız parametrelerine bağlı olarak ya kanalda oturur ya da xc’ye yönelimlerinin ardında yarattıkları düşük basınç nedeniyle c’de ters akışa neden olurlar. Bu noktada ayırma üzerinde rolü olan r parametresinde değişikliğe gidilmesine gerek görülmüştür fakat mıknatısın yeni konumunun doğru saptanabilmesi için ters akışı yaratan düşük basıncın nedeninin belirlenmesi gerekmektedir.

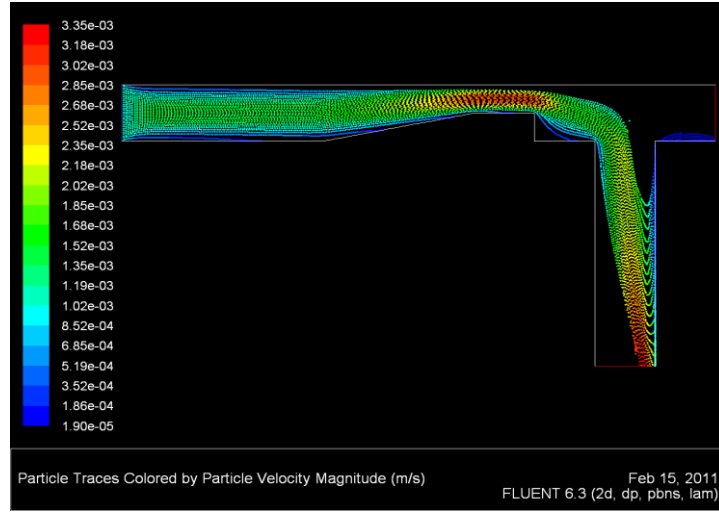
Ek.A Şekil A.1 incelendiğinde F kuvvetinin y' dolayısıyla r ile n’ye nazaran daha fazla değiştiği görülür. Tanecikler, xc koluna ilk yöneldiklerinde üzerlerine etkiyen kuvvet $y'=r=15$ mm ile $y'=r+3=18$ mm aralığında etkirken; xc kolu boyunca ilerledikçe $y'=r$ veya $y'< r$ olur. Dolayısıyla xc koluna giren taneciklere etkiyen kuvvet kol boyunca artar. Ek.A’da verilen şekillerden kuvvet ile y' ’nin ters orantılı olduğu görülür. y' azaldıkça tanecik üzerine etkiyen kuvvet arttığından dolayı tanecik üzerine etkiyen kuvvetin değeri artık y' ’nin 15 mm’deki değerinden daha büyüktür. Dolayısıyla xc koluna yönelen tanecikler, r15 mıknatıs konumu için kuvvetin yüksek olması nedeniyle sürekli (yönlendirilerek) olarak tabir edilen zamanla çekilmek yerine direk (aniden) çekilirler.

Çıkan sonuçlar doğrultusunda yeni mıknatıs konumu için taneciklerin xc koluna yönelimi de göz önünde bulundurularak r konumunun iki katına çıkarılmasına karar verilmiştir.

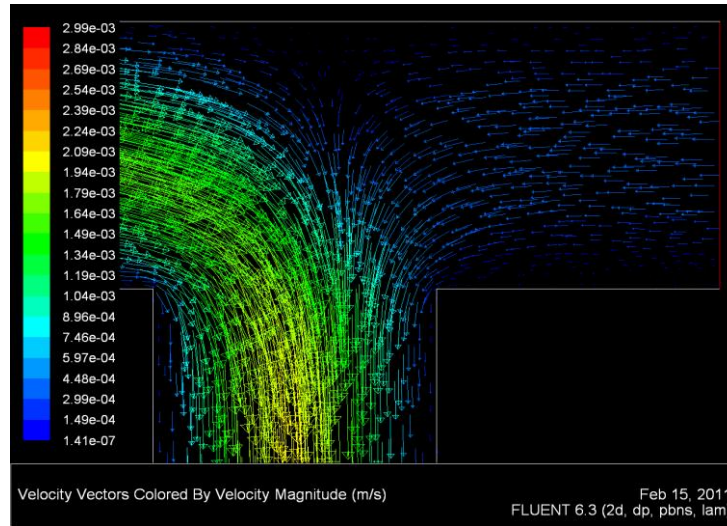
r30n45:

r’nin yeni konumu sonucu oluşan tanecik yörüngeleri ve hız değerleri Şekil 5.34’de verilmiştir. Şekil 5.34a’da mıknatısın yeni konumu için taneciklerin yüksek miktarda

xc'ye yöneldiği görülmektedir fakat bu yönelim Şekil 5.34b'de verilen suya ait hız vektörlerinden görüldüğü gibi c'de ters akış oluşumunu engelleyememiştir.



(a)



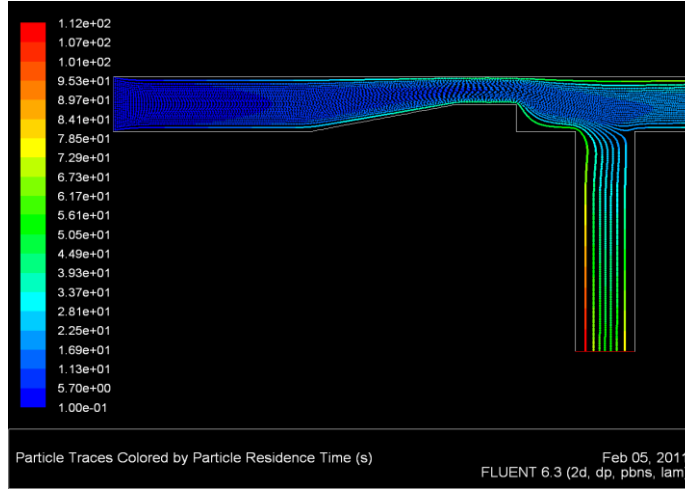
(b)

Şekil 5.34 : r30n45 konumundaki mıknatısın 1 mm/s hızla kanala giren asıltıya etkisi sonucu a)asıltıdaki tanecik hız değerleri ve yörüngeleri b)c ağzında oluşan ters akış gösterimini sağlayan asıltı içerisindeki suya ait hız vektörleri.

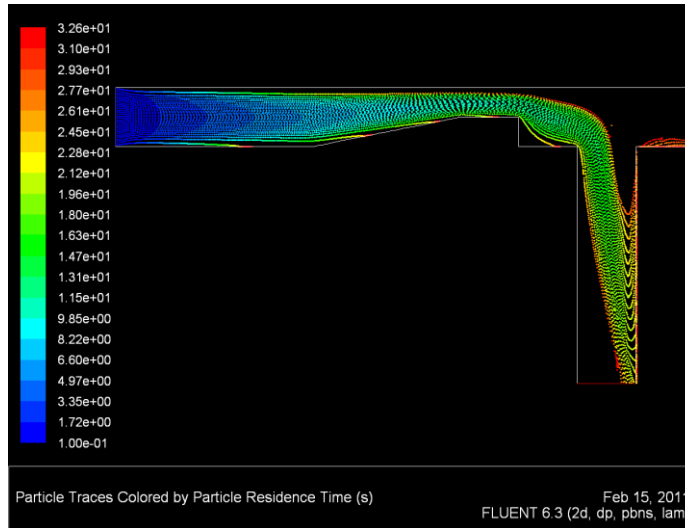
Önceki incelemede ters akışa, xc koluna yönelen tanecikler üzerine etkiyen kuvvetin değişimi sonucu oluşan düşük basıncın neden olduğu belirtilmişti. Şekil 5.35'de bu değişim kolaylıkla görülebilir. Şekil 5.35a ve b'de sırasıyla 1 mm/s giriş hızındaki asıltı içerisindeki taneciklerin, tanecik üzerine manyetik etki olmadığı ve olduğu durumlarında kanalda kalma süreleri (*residence time*) verilmiştir.

Şekil 5.35a'da manyetik alan olmadığında kanala giriş yapan taneciklerden xc çıkışına yönelenlerin 112 s sonunda hala kanalı terk etmediği görülür.

Şekil 5.35b’de ise akışın başlamasından 33 s sonra manyetik etki altında kanalda oturan tanecikler dışındaki taneciklerin yörüngelerini belirledikleri ve yine kanalda oturanlar dışında ilk giriş yapan taneciklerin çıktığı görülür.



(a)



(b)

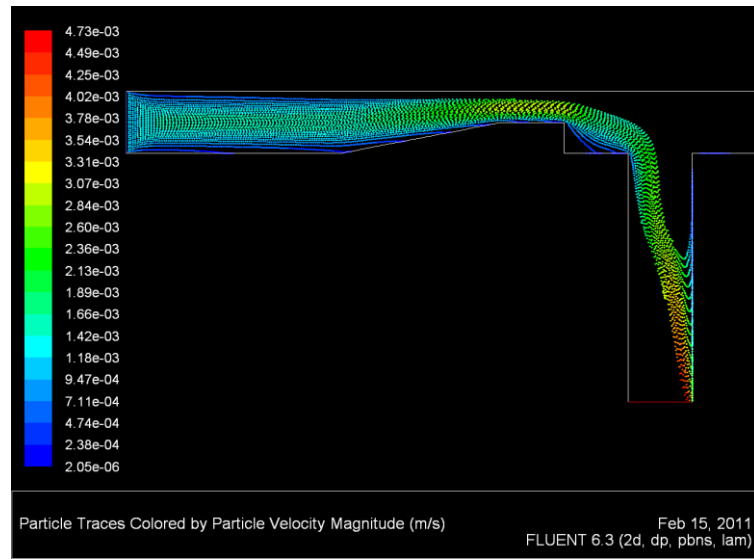
Şekil 5.35 : 141 kanalında 1 mm/s giriş hızında taneciklerin kanalda kalma süreleri (a) manyetik etki yok.(b)manyetik etki var (r30n45).

Şekilden taneciklerin mıknatıs etkisiyle xc’ye yönlendirildikleri ve xc koluna ulaşan taneciklerin kuvvet etkisiyle birden çekildikleri söylenebilir. r30n45 mıknatıs konumu da bir önceki örnekte olduğu gibi, taneciklerin xc’ye yönelim miktarları bakımından verimli olurken ters akış oluşumuna neden olduğu için tercih edilmez. Bu noktada mıknatısın +x’de ötelenmesinin, taneciklerin bir kısmının c’ye yöneleceğine neden olacağı fakat bu yönelimin suyu da c’ye yönelteceği, dolayısıyla ters akışı giderebileceği göz önüne alındığında; r sabit tutularak n parametresi değiştirilmiştir.

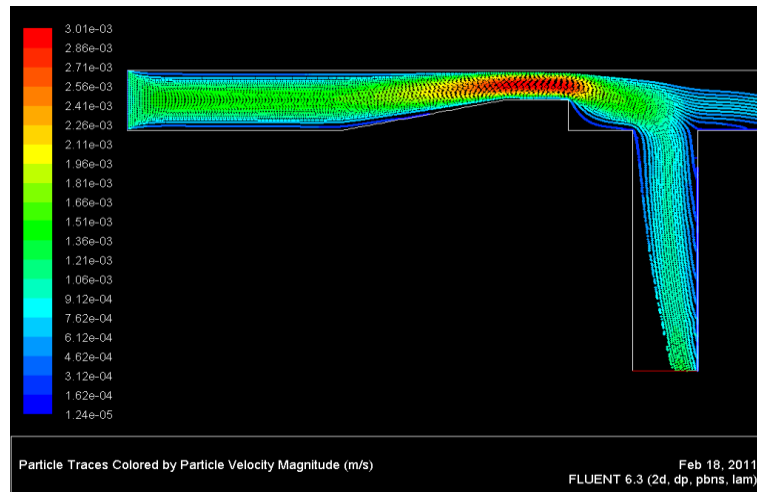
r30n50/r30n55:

Şekil 5.36'da r30n50 ve r30n55 mıknatıs konumları için elde edilen tanecik hız değerleri ve her bir taneciğin yörüngesi verilmiştir.

Şekil 5.36a'da n50 için yapılan sayısal çözümleme sonucunda, önceki incelemelerde olduğu gibi manyetik etki sonucu kanalda oturanlar dışındaki taneciklerin hepsi xc'ye yönelmiştir. n50 konumu, çıkışa ulaşan taneciklerin hepsinin xc'yi tercih etmesi bakımından verimli bir ayırma olarak gözlemlense de ters akış hala giderilemediğinden terk edilip; bir sonraki mıknatıs konumuna geçilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.36 : Farklı konumlardaki mıknatısın 1 mm/s hızla kanala giren asıltıya etkisi sonucu oluşan tanecik hız değerleri ve yörüngeleri a)r30n50 b)r30n55

n'nin yatayda ilerlemesinin taneciklerin bir kısmını c'ye yönelteceği fakat aynı zamanda sıvıyı da xc'ye çekmeyi önleyeceği düşünülerek mıknatıs yatayda 5 mm

ötelenmiştir. Bu değişiklik ile elde edilen tanecik yörünge ve hız değerleri Şekil 5.36b’de verilmiştir. Şekilden taneciklerin bir kısmının c’ye yöneldiği görülür. Bu istenmeyen bir durum olsa da mıknatısın yeni konumu için ters akış önlenmiştir.

Bu noktada taneciklerin büyük oranda xc’ye yöneliminin yanında sıvının da büyük oranda c’yi tercih etmesinin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmiştir. r30n55 mıknatıs konumu için akış sonunda giriş ve çıkışlarda elde edilen suya ait kütleli debiler Çizelge 5.22’de verilmiştir.

Çizelge 5.22 : 141 kanalına 1 mm/s hız ile giren tanecik-su asıltısına r30n55 konumunda bulunan mıknatısın etkisi sonucunda elde edilen suya ait kütleli debi miktarları.

Sınır tipleri	Kütleli debi (kg/s)
çıkış	-0.0012115426
xcıkış	-0.0017830575
giriş	0.0029946002

Çizelge incelendiğinde suyun % 59.54’ünün xc’yi tercih ettiği görülür. Manyetik etki olmaması durumunda bu değer % 24.26 oranında olup manyetik alan etkisiyle sıvı da tanecik hareketinden etkilenecek xc’ye yönelmiştir.

Asıltı içindeki taneciklerin r30n55 konumundaki mıknatısın oluşturduğu manyetik alan etkisi altındaki davranışlarının sayısal çözümlemesi sonucu elde edilen her bir çıkışı tercih etme miktarları Çizelge 5.23’de verilmiştir.

Çizelge 5.23 : r30n55 konumundaki mıknatısın oluşturduğu manyetik alan altındaki tanecikli akışta 120 s sonunda elde edilen çıkışlardaki tanecik miktarları.

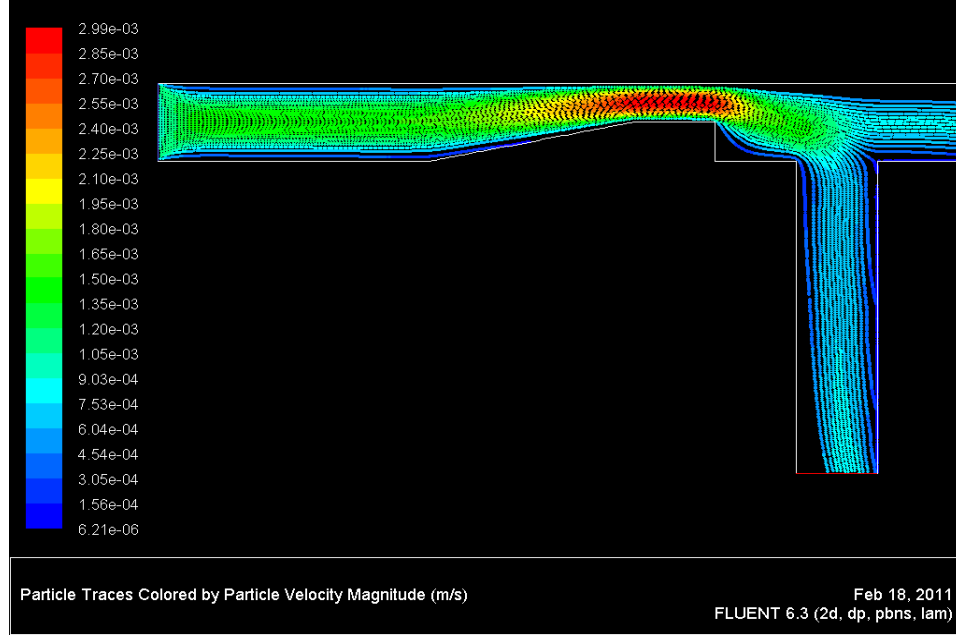
Sınır tipleri	Tanecik miktarı (kg)
çıkış	2.797e-004
xcıkış	2.227e-004

Çizelgeden taneciklerin % 44.33’ünün xc’yi tercih ettikleri sonucu çıkar. Manyetik alan olmaması durumu ile kıyaslandığında taneciklerin xc’ye yönlendirilmesinde % 20 gibi bir iyileştirilme sağlanmıştır.

r30n55 konumu ters akış olmaması ve sürekli ayırmayı sağlaması bakımlarından tercih edilebilir lakin taneciklerin yönlendirilmeleri esnasında tanecikle beraber su da xc’ye yönelmiştir. Dolayısıyla ayırmanın verimli olduğu söylenemez. Bu doğrultuda n değerinin değişiminin daha fazla taneciğin c’ye yönelmesine neden olacağı düşünüldükte tekrar r değerinin artırılmasının ayırmaya etkisi incelenmiştir.

r40n50

Şekil 5.37’de r40n50 mıknatıs konumu için elde edilen tanecik hız değerleri ve her bir taneciğin yörüngeleri verilmiştir.



Şekil 5.37 : 141 kanalına 1 mm/s hız ile giren asıltı içindeki taneciklerin r40n50 konumundaki mıknatıs ile yönlendirilmeleri sonucunda tanecik hız değerleri ve yörüngeleri.

Mıknatısın yeni konumu için bir önceki incelemede olduğu gibi ters akış önlenmiş olup Çizelge 5.24’de kanalda tanecikli akış ve dışarıda manyetik alan olduğunda giriş ve çıkışlardaki suya ait kütledebiler verilmiştir.

Çizelge 5.24 : 141 kanalına 1 mm/s hız ile giren asıltı içindeki taneciklerin r40n50 konumundaki mıknatıs ile yönlendirilmeleri sonucunda çıkışlara yönelen suya ait kütledebiler miktarları.

Sınır tipleri	Kütledebiler (kg/s)
çıkış	-0.0015637279
xcıkış	-0.0014308722
giriş	0.0029946002

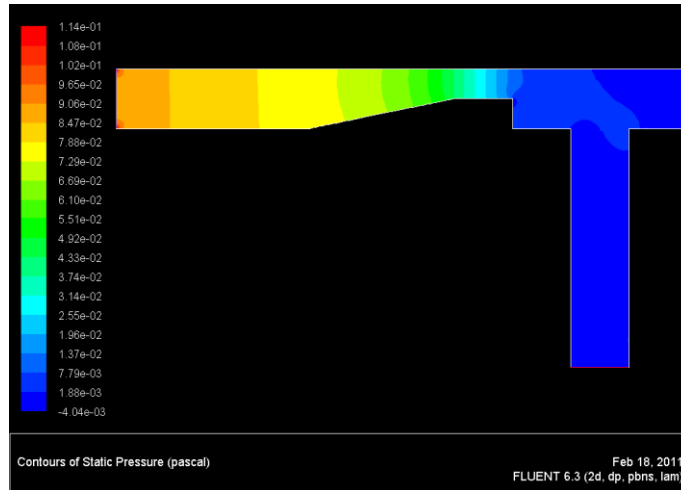
Çizelge 5.24 incelendiğinde suyun % 47.78’inin xc’yi tercih ettiği sonucu çıkar. Manyetik alan olmaması durumunda bu değer, Çizelge 5.2’de verildiği gibi % 24.26 oranında olup manyetik alan etkisiyle sıvı da tanecik hareketinden etkilenerek xc’ye yönelmiştir.

Taneciklerin her bir çıkışı terk etme miktarları Çizelge 5.25’de verilmiştir.

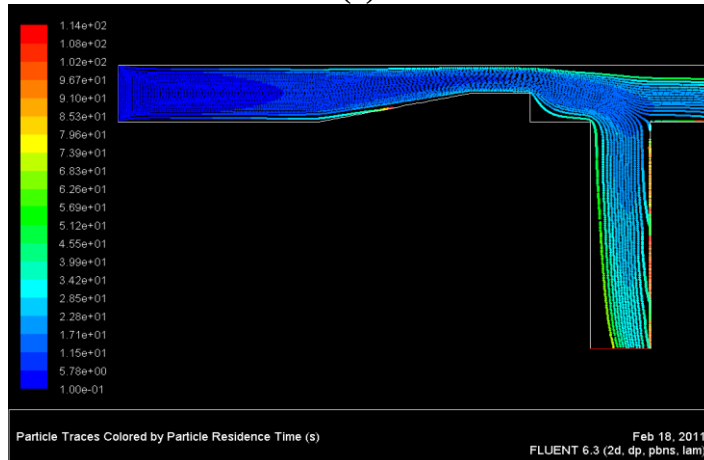
Çizelge 5.25 : 141 kanalında 1 mm/s giriş hızı ve r40n50 mıknatıs konumu için tanecikli akışta 114 s sonunda elde edilen suya ait kütleli debi miktarları.

Sınır tipleri	Tanecik miktarı (kg)
çıkış	8.985e-005
xcıkış	1.654e-004

Buradan taneciklerin % 64.8'inin xc'yi tercih ettikleri sonucu çıkar. Manyetik alan olmaması durumu ile kıyaslandığında, taneciklerin ayrılmasında iyileştirme olduğu aynı zamanda mıknatısın yeni konumunun öncekilere göre daha verimli ayırma sağladığı söylenebilir. Bu noktada ayırma oranının daha da artırılıp arttırılamayacağı; arttırılabilecekse bunun nasıl sağlanacağı (r, n'de değişiklik yaparak; kanal değiştirilerek vb.) tespit edilmeye çalışılmıştır. Şekil 5.38a'da r40n50 mıknatıs konumu için kanalda oluşan basınç konturleri Şekil 5.38b'de ise taneciklerin kanalda kalma süreleri verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.38 : r40n50 konumundaki mıknatıs etkisindeki 1 mm/s giriş hızına sahip asıltıdaki (a)suya ait basınç konturleri (b) taneciklerin kanalda kalma süreleri.

Daha önce de belirtildiği gibi manyetik etki olmaması durumunda 1 mm/s giriş hızındaki bir taneciğin en fazla kanalda kalma süresi 120 s olarak bulunmuş ve r30n45 mıknatıs konumunda Şekil 5.35b’de verildiği gibi tanecikler manyetik etkinin fazla olmasından dolayı en fazla 33 s’de kanalı terk etmişler. Şekil 5.38 incelendiğinde r40n50 için düşük basınç dolayısıyla ters akış gözlenmediği ve beklendiği gibi taneciklerin kanalda kalma süresi r30n45 konumuna göre artmış ve maksimum 115 s olarak gösterirken ortalama 50 s’dir. Dolayısıyla r40n50 konumu için şimdiye kadar yapılan ayırmalardan en iyisi elde edilmiş denilebilir (taneciklerin xc’ye yönelim yüzdeleri sıvınınkinden fazladır).

Önceki incelemeler ve r40n50 konumu sonucunda çıkışlar öncesi düşük basıncın önlenmesi için r’nin artırılması veya aynı r değeri için manyetik alan değişiminin pek hissedilmemesi için y (xc kol uzunluğu) parametresinin kısa tutulması gerektiği ortaya çıkmıştır. İncelemelerden elde edilen bir diğer sonuç ise taneciklerin direk çekilmek yerine sürekliliği bozmayacak şekilde yönlendirilmelerinin tanecik ayırmada daha iyi sonuç verdiğiidir. Bu noktada tanecik yönlendirilmesinin sağlanması amacıyla z uzunluğunun artırılması ve manyetik alanın z boyunca etkilmesi sonucu tanecikler direk çekilmek yerine sürekli ayrılmayı sağlayacak şekilde yönlendirilerek ayrıştırılacaklardır. Bu sonuçlar doğrultusunda 141 kanalı yerine bu amacı gerçekleştirmeye uygun olduğu düşünülen ve 141’e göre y/z oranı ters olan 114 kanalı üzerinde de manyetik etki incelenmiştir.

114 kanalı üzerinde yapılan manyetik alan çalışmaları

141 kanalında yapılan çözümlemelerden elde edilen sonuçlar doğrultusunda 114 kanalı üzerinde tek bir mıknatıs konumu için sayısal çözümleme yapılmıştır. Mıknatıs konumunun belirlenmesinde; taneciklerin asgari miktarda kanala oturması (r15 istenmez), konuma bağlı olarak taneciklerin xc’den c’ye kaymaması (n50, n55) ve z boyunca taneciğin yönlendirilebilmesi için mıknatısın z konumunda etkin olması amaçlanmıştır. Buradan sadece r30n40 konumu ve hız etkisinin gözlenmesi için de 1, 5 ve 10 mm/s giriş hızları için inceleme yapılmıştır.

r30n40

1 mm/s giriş hızı için elde edilen sonuçlar:

114 kanalına 1 mm/s hızla giren tanecik-su asıltısına, r30n40 konumundaki mıknatısın oluşturduğu manyetik alan etki etmektedir.

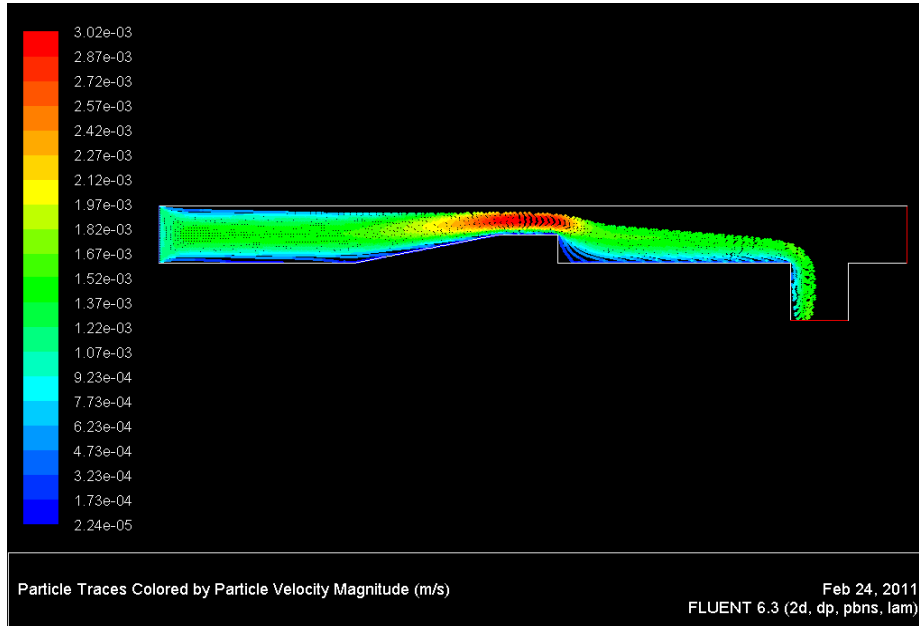
Çizelge 5.26’da r30n40 mıknatıs konumu sonucu oluşan manyetik etki altındaki kanala 1 mm/s hız ile giren tanecik-su asıltısında giriş ve çıkışlardaki suya ait kütleel debiler verilmiştir.

Çizelge 5.26 : 114 kanalında 1 mm/s giriş hızı ve r30n40 mıknatıs konumu için tanecikli akış sonunda elde edilen suya ait kütleel debi miktarları.

Sınır tipleri	Kütleel debi(kg/s)
çıkış	-0.00070391176
xcıkış	-0.0022906887
giriş	0.0029946002

Çizelge 5.26 incelendiğinde suyun % 76.49’unun xc’yi tercih ettiğı görölür. Manyetik alan olmaması durumunda xc’yi tercih etme yüzdesi % 47.82 oranında olup manyetik alan etkisiyle sıvı da tanecik hareketinden ve oluşan basınç değişiminden etkilenererek xc’ye yönelmiştir.

Şekil 5.39’da manyetik alan altındaki taneciklere ait yörüngeler ve hız değeri verilmştir.



Şekil 5.39 : 114 kanalında r30n40 konumundaki mıknatısın oluşturduğu manyetik alan etkisinde 1 mm/s giriş hızında asıltıdaki taneciklere ait hız değeri.

Sıvı kütleel debisi belirlendikten sonra tanecik için çıkışları terk etme miktarlarına bakılır. Sayısal çözümleme sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 5.27’de verilmiştir. Çizelgeden asıltıda yollanan taneciklerin % 100’ünün xc’yi tercih ettiğı görölür.

Şekil 5.39’da görülebileceği gibi manyetik etki sonucunda ihmal edilemeyecek düzeyde tanecik kanalda oturur. Dolayısıyla sonuçlarda yer alan % 100 değeri kanalı terk eden tanecikler için kullanılmıştır.

Çizelge 5.27 : r30n40 konumundaki mıknatısın oluşturduğu manyetik alan etkisi altında, 114 kanalına 1 mm/s hız ile giren asıltı içindeki taneciklerin beslendikten 95 sn sonunda her bir çıkıştan çıkan miktarları.

Sınır tipleri	Tanecik miktarı(kg)
çıkış	0
xcıkış	2.167e-004

Manyetik alan olmadığında taneciklerin % 48’i xc’yi tercih ederken manyetik etki altında bu değer artmış ve kanalda oturan tanecik dışındakiler xc’ye yönelmiştir. Ayırmanın verimliliği tespit edilirken suyun xc’ye yöneliminde % 30’luk artış olduğu fakat hem ters akış olmaması hem de tanecik yönelimi bakımından iyi bir ayırma olarak kabul edilebilir.

5 mm/s giriş hızı için elde edilen sonuçlar:

1 mm/s için yapılan incelemelerden sonra 5 mm/s giriş hızı ve bir önceki incelemeyle aynı mıknatıs konumu için sayısal çözümleme yapılmıştır.

Çizelge 5.28’de kanalda tanecikli akış ve dışarıda manyetik alan olduğunda giriş ve çıkışlardaki suya ait kütleli debiler verilmiştir.

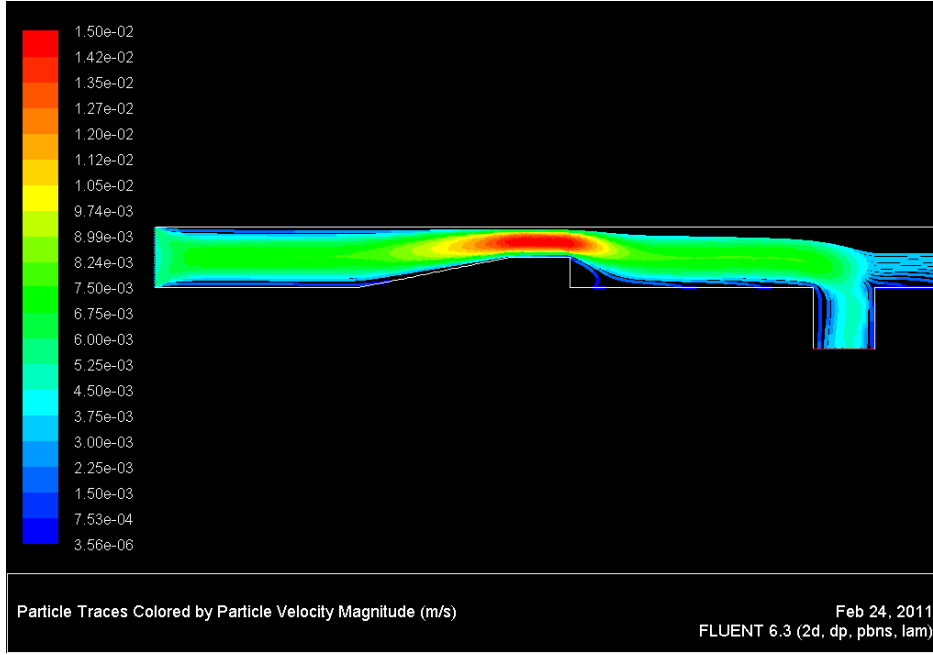
Çizelge 5.28 : 114 kanalında 5 mm/s giriş hızı için tanecikli akış sonunda elde edilen suya ait kütleli debi miktarları.

Sınır tipleri	Kütleli debi(kg/s)
çıkış	-0.006732163
xcıkış	-0.0082408376
giriş	0.014973001

5 mm/s hızla kanala giren tanecik-su asıltısında, manyetik alan altında suyun % 55.04’ü xc’yi tercih etmektedir. Manyetik alan olmaması durumunda bu oran % 38.47 olup manyetik alan etkisiyle sıvı da tanecik hareketinden etkilenerek xc’ye yönelmiştir.

Şekil 5.40’da manyetik alan altındaki taneciklere ait yörüngeler ve hız değerleri verilmiştir.

Sıvı kütleli debisi belirlendikten sonra tanecik için çıkışları terk etme miktarları Çizelge 5.29’da verilmiştir.



Şekil 5.40 : 114 kanalı için 5 mm/s giriş hızında manyetik alan altında asıltıdaki taneciklerin yörüngesi ve hız değerleri.

Çizelge 5.29 : 114 kanalında 5 mm/s giriş hızı için tanecik beslendikten 12.41 sn sonunda her bir çıkıştan çıkan tanecik miktarları.

Sınır tipleri	Tanecik miktarı(kg)
çıkış	5.085e-005
xcıkış	1.187e-004

Kanaldan ayrılan taneciklerin % 70.01'i xc'yi tercih eder. 1 mm/s giriş hızı için elde edilen sonuçlara göre hızın artması ile taneciklerin bir kısmı ataletinin etkisiyle c'ye yönelmiştir. Bunun yanında 1 mm/s hız değerinde taneciklerle beraber suyun xc'ye yöneliminde % 30 gibi bir artış olurken 5 mm/s giriş hızı için % 16 olduğu görülür. Ayrıca 5 mm/s giriş hızında 1 mm/s'ye göre daha az miktarda taneciğin manyetik etki ile kanalda oturduğu Şekil 5.39 ile Şekil 5.40'dan çıkarılabilir.

10 mm/s giriş hızı için elde edilen sonuçlar

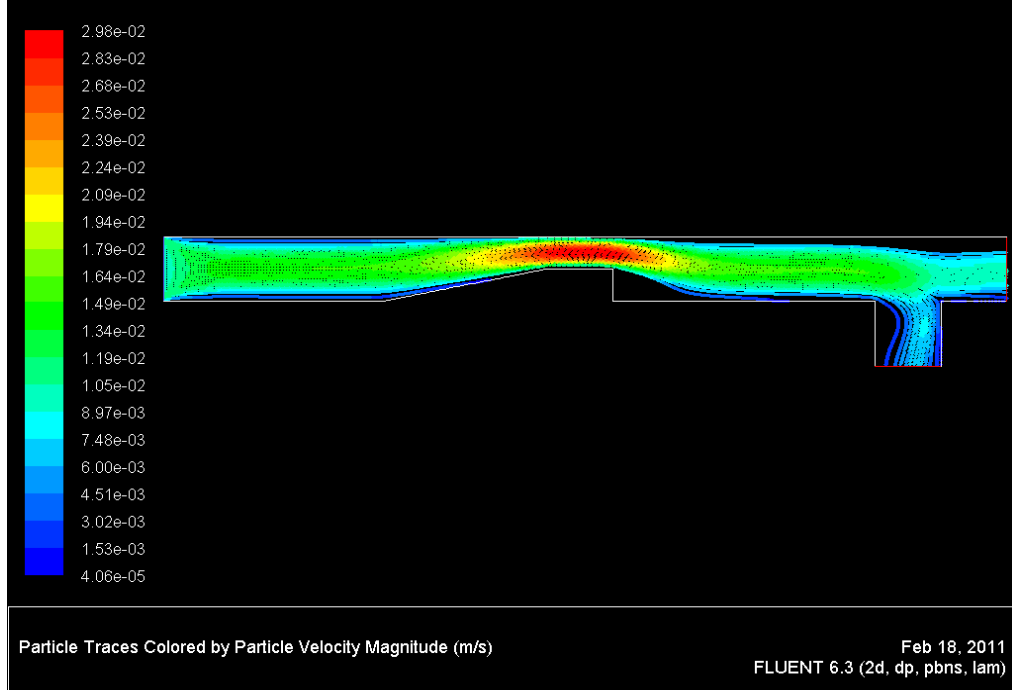
Çizelge 5.30'da kanalda tanecikli akış ve dışarıda manyetik alan olduğunda 10 mm/s giriş hızı için giriş ve çıkışlardaki suya ait kütleli debiler verilmiştir.

Çizelge 5.30 : 114 kanalında 10 mm/s giriş hızı için manyetik etki altındaki tanecikli akış sonunda asıltıdaki suya ait kütleli debi miktarları.

Sınır tipleri	Kütleli debi(kg/s)
çıkış	-0.019400541
xcıkış	-0.01054546
giriş	0.029946001

Çizelge 5.30 incelendiğinde suyun % 35.21'inin xc'yi tercih ettiği görülür. Manyetik alan olmaması durumunda bu oran % 29.39 olup manyetik alan ile taneciklerin xc'ye yönelirken bir miktar suyu da ardından sürükledikleri söylenebilir.

Şekil 5.41'de manyetik alan altında asıltıdaki taneciklere ait yörüngeler ve hız değerleri verilmiştir.



Şekil 5.41 : 114 kanalı için 10 mm/s giriş hızında taneciklere ait hız değerleri.

Tanecik için çıkışları terk etme miktarları Çizelge 5.31'de verilmiştir.

Çizelge 5.31 : 114 kanalında 10 mm/s giriş hızında tanecik beslendikten 10 sn sonra her bir çıkıştan çıkan tanecik miktarları.

Sınır tipleri	Tanecik miktarı(kg)
çıkış	6.612e-005
xcıkış	1.553e-004

Ayırma sonucunda çıkışlara yönelen taneciklerden % 70.14'ü xc'yi tercih eder. Dikkat edilirse bu değer 5 mm/s hız için elde edilen değer ile hemen hemen aynıdır fakat 10 mm/s için oran ve miktar olarak daha az su xc'ye yönelmiştir. Verim açısından 10 mm/s için elde edilen sonuçların ayırma için verimli olduğu söylenebilir.

Su ve tanecik yüzdeleri dışında ayırma işleminde zaman önemli bir parametredir dolayısıyla sayısal çözümleme sonucunda r30n40 mıknatıs konumu için,

114 kanalında, 10 mm/s giriş hızında yapılan ayırma verimli bir ayırma olarak kabul edilebilir.

Yapılan sayısal çözümler sonucunda mıknatıs konumu değiştirilerek ayırma veriminin arttırılabileceği gözlenmiştir. Ayırma işleminde sıvı ile taneciklerin birbirleriyle etkileşimde oldukları kabulünün mıknatıs konumu ve taneciklerin yönelimleri sonucunda ters akış etkisinin gözlenmesiyle geçerli olduğu saptanmıştır.

Sayısal çözümleme ile çıkan bu sonuçlar deneysel olarak da gözlemlenerek iki modelin tutarlılığı tespit edilmeye çalışılmıştır.

5.2 Deneysel Çalışma ve Sonuçları

Matematik modeli kurulan sistemin deneysel olarak modellenmesi için Şekil 4.1’de verilen deney düzeneği kurulmuş ve 141 ile 114 kanalları üzerinde çalışılmıştır. İlk olarak dışarıdan herhangi bir manyetik etki olmaması durumunda tanecik-su asıltısı incelenmiş ardından mıknatısın farklı noktalara yerleştirilmesi sonucunda oluşan yeni durum gözlenmeye çalışılmıştır. Tanecik davranışı Photron Fastcane 512 PCI hızlı kamera ile görüntülenmiştir.

5.2.1 Belirlenen kanallarda tanecik-su akışı

5.2.1.1 Kanal 141’de tanecik-su akışı

İlk olarak manyetik etki olmaması durumunda asıltının kanal içindeki davranışı deneysel olarak gözlenmeye çalışılmıştır.

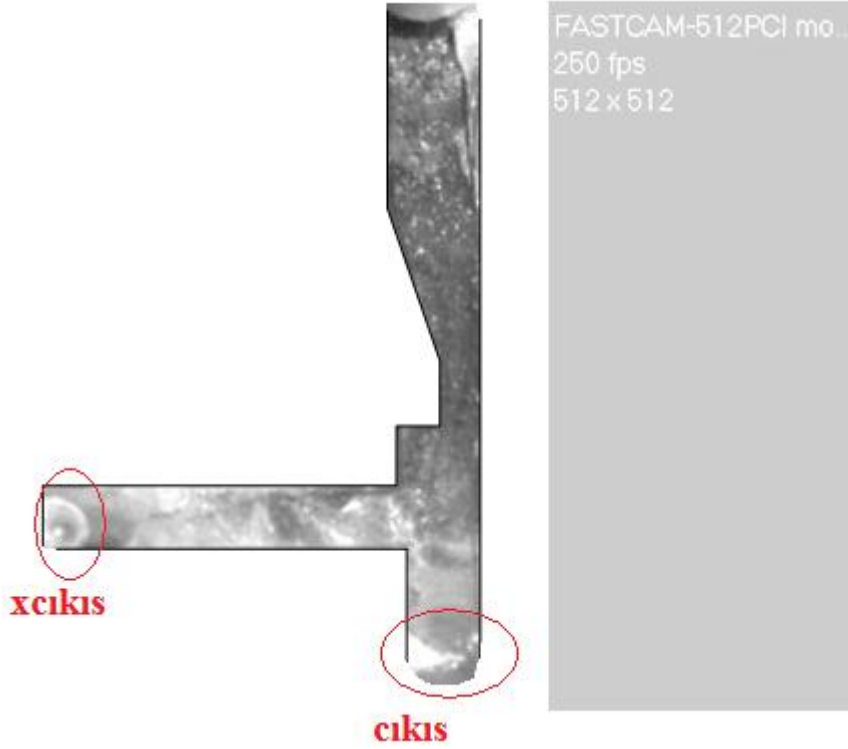
Bölüm dört ve Ek.B’de verilen donanımlar sonucunda kurulan deney düzeneğinde vakum pompası aracılığıyla kanal içinde düşük debi sağlanmıştır. Deney esnasında çıkışlardaki asıltı miktarları her bir çıkış altına yerleştirilen teraziler yardımıyla elde edilmiş ve belirlenen çıkış miktarlarından asıltının kanala 13 mm/s’lik hızla girdiği tespit edilmiştir. Çizelge 5.32’de bir dakika sonunda her bir çıkıştan çıkan asıltı miktarları verilmiştir.

Çizelge 5.32 incelendiğinde asıltının % 22.06’sının xc’yi tercih ettiği görülür. Bu değer Çizelge 5.2’de verilen sayısal çözümleme ile tutarlıdır.

Photron Fastcane 512 PCI hızlı kamerasıyla elde edilen tanecik-su asıltısının verilen şartlar altındaki davranışı Şekil 5.42’de verilmiştir.

Çizelge 5.32 : 141 kanalında manyetik etki olmadığında deneysel çalışma sonucunda 13 mm/s giriş hızı için bir dakika sonunda her bir çıkıştan çıkan asıltı miktarları.

Sınır tipleri	Asıltı miktarı (kg)
çıkış	1.127e-3
xcıkış	0.319e-3



Şekil 5.42 : 141 kanalı için manyetik etki olmaması durumunda kanala 13 mm/s giriş hızı ile giren tanecik-su asıltının deneysel olarak görüntülenmesi.

Şekil 5.42’de c kolundaki tanecik miktarı xc’ye nazaran daha az görülebilir. Sayısal çözümlemeden elde edilen sonuçlardan, kanalın toplam uzunluğunun 3 cm ve giriş hızının 13 mm/s olduğu göz önüne alındığında; Şekil 5.42’de verilen görüntünün xc’ye yönelen taneciklerin hızının düşük olması dolayısıyla kanalda kalma sürelerinin fazla olmasından kaynaklandığı bilinir.

Yüksek debi için matematik ile deneysel modelin tutarlılığı saptandıktan sonra daha düşük debi değerinde de sistemin tutarlılığı irdelenmiştir. Deneysel düzende verildiği gibi emiş kısmı hazneye bağlanan vakum pompası ve içerdeki basınç ile atmosfer basıncı arasındaki farkı ölçen basınç transmitteri sayesinde içerdeki basınç düşürülerek kanal girişinde düşük debi elde edilmeye çalışılmıştır. Bu sayede 1.79 mm/s giriş hızı elde edilmiştir. Çizelge 5.33’de her bir çıkıştaki asıltı miktarları verilmiştir.

Çizelge 5.33 : 141 kanalında manyetik etki olmadığında deneysel çalışma sonucunda 1.79 mm/s giriş hızı için bir dakika sonunda her bir çıkıştan çıkan asıltı miktarları.

Sınır tipleri	Asıltı miktarı (kg)
çıkış	0.1261e-3
xcıkış	0.0679e-3

Çizelge 5.33 incelendiğinde yollanan asıltının % 35'inin xc'yi tercih ettiği görülür. Sayısal çözümlemede bu değer % 24 dolaylarındadır. Sayısal ile deneysel çalışma uyumluluk içinde olup aradaki farka deneysel çalışmada yani sistemin gerçeğinde, kanaldaki pürüzlük ve sayısal çözümlemede kabul edilen iki boyutluluk kabulü neden olabilir.

141 kanalı üzerinde yapılan deneysel çalışma sonucunda sonuçların sayısal çözümlerle tutarlı olduğu saptanmış ve her bir hız değeri için manyetik alan etkisinin incelenmesine geçilmiştir.

5.2.1.2 Kanal 114'de tanecik-su akışı

114 kanalı üzerinde yapılan deneysel çalışma sonucunda yollanan asıltının çıkışları terk etme miktarları Çizelge 5.34'de verilmiştir.

Çizelge 5.34 : 114 kanalında manyetik etki olmadığında deneysel çözümleme sonucunda 7 mm/s giriş hızında her bir çıkıştan bir dakika sonunda çıkan miktarlar.

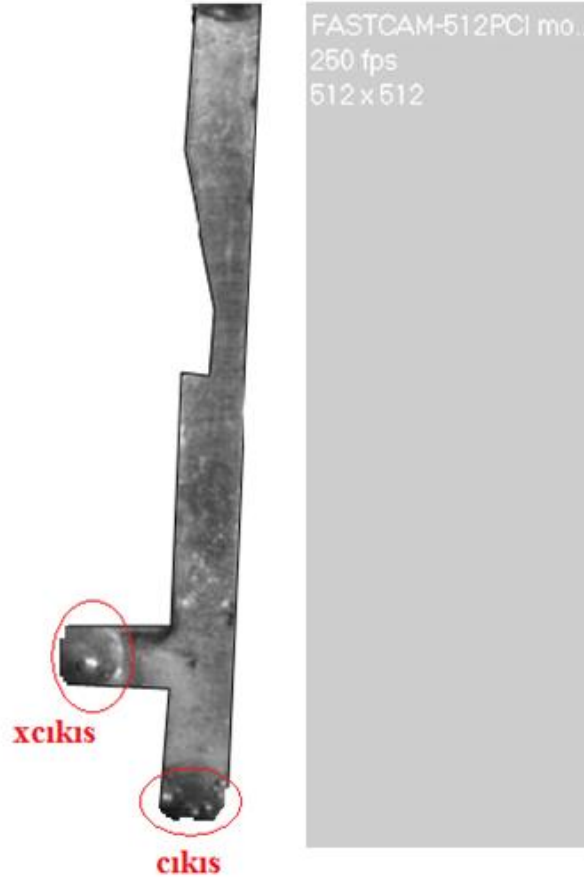
Sınır tipleri	Asıltı miktarı (kg)
çıkış	0.530e-3
xcıkış	0.261e-3

Çizelgede verilen sonuçlardan, asıltının % 33'ünün xc'yi tercih ettiği ve giriş hızının 7 mm/s'ye karşılık geldiği ortaya çıkar. Çizelge 5.2'de verilen sonuçlar doğrultusunda sayısal çözümlemede 7 mm/s giriş hızı için asıltının % 35'i xc'yi tercih etmektedir. Dolayısıyla deneysel ile sayısal çözüm sonuçları tutarlılık göstermektedir.

Şekil 5.43'de verilen giriş şartı için 114 kanalında asıltı akışının hızlı kamera ile görüntülenmesi ile elde edilen tanecik görüntüsü verilmiştir.

Bu bölümde 114 kanalında manyetik etki olmaması durumunda bir giriş hızı için deneysel sonuçlar verilmiş olup bir sonraki kısımda 7 mm/s hızı dışında sayısal

Çözümleme ile tutarlılık gösteren 20 mm/s hızı için de manyetik alan etkisi irdelenmiştir.



Şekil 5.43 : 114 kanalına 7 mm/s hızla giren asıltıdaki taneciklerin davranışının deneysel olarak gözlenmesi.

5.2.2 Belirlenen kanallarda manyetik alan etkisiyle tanecik ayırma

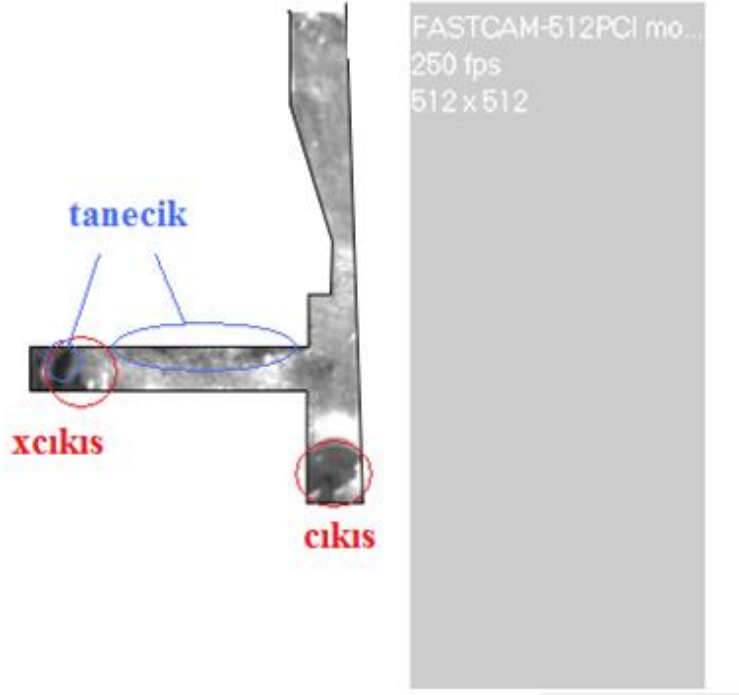
5.2.2.1 Kanal 141’de manyetik alan etkisiyle tanecik ayırma çalışmaları

141 kanalında yapılan debi ayarlarından tanecikli akışta 13 mm/s ve 1.79 mm/s giriş hızları elde edilmişti. Burada ilk olarak 13 mm/s giriş hızı ve farklı mıknatıs konumları için çalışmalar ve sonuçları verilmiştir.

13 mm/s giriş hızı ve farklı mıknatıs konumlarında yapılan deneysel çalışmalar

r30n25

Şekil 5.44’de r30n25 mıknatıs konumu için yapılan deneysel çalışmanın sonuçları verilmiştir. Şekil incelendiğinde mıknatısın xc’ye yakın yerleştirilmesinden dolayı tanecikler manyetik alan etkisiyle xc’ye yönelmişlerdir.



Şekil 5.44 : 141 kanalı için 13 mm/s giriş hızında ve r30n25 mıknatıs konumu için taneciklere ait görüntü.

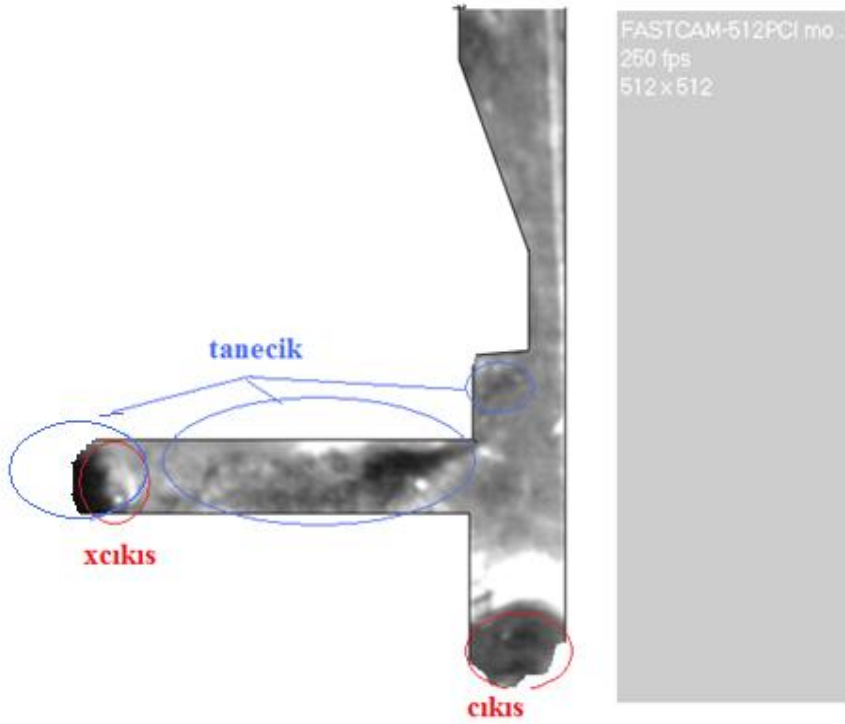
Şekilde mavi renkte iki yuvarlak görülmektedir. Bunlardan birinde manyetik alan etkisiyle xc kolunda duvara yakın hareket eden tanecikler diğerinde ise mıknatıs etkisiyle xc'ye çekilmiş ve xc ağzında tutunan tanecikler gösterilmektedir. Bu sonuç çıkış kesitlerinin boyutu için önemli bir çıkarımdır. Önceden belirtildiği gibi eğer xc ağız uzunluğu kısa tutulsaydı mıknatıs etkisiyle xc'ye yönelen tanecikler ağızı tıkayacak dolayısıyla burada xc'ye yönelen tanecikler üzerine yüksek basınç etkiyeceğinden tanecikler basınç etkisiyle c'yi tercih edeceklerdi. Buradan her bir çıkış için 3 mm'nin uygun olduğu ve mıknatıs etkisiyle xc ağzında oturan tanecik miktarının düşük olmasından dolayı xc'ye yönelen tanecikleri engellemedikleri görülür.

r30n45

Şekil 5.45'de r30n45 mıknatıs konumu için yapılan deneysel çalışmanın sonuçları verilmiştir.

Şekilden taneciklerin yüksek oranda xc'ye yöneldikleri ve xc ağzında büyük miktarda taneciğin toplandığı görülür. Burada kanalda görülen taneciklerden rampa dar kesiti ardındaki keskin köşede taneciklerin olduğu görülür.

Dikkat edilirse tanecikler verilen konum dahilinde yapılan sayısal çözüm sonucunun verildiği Şekil 5.34 incelendiğinde çözümlerin tutarlı olduğu ve taneciklerin xc koluna ilk girdiklerinde birbirlerine yakın (toplu şekilde) hareket ederken kolda ilerledikçe manyetik alan şiddeti ve şekli değiştiğinden xc kolunda çıkış ağzına yönelirler. 141 kanalı için yapılan sayısal çözümlemede 1 mm/s giriş hızı için sonuçlar verilmiş olup burada giriş hızı 13 mm/s olması durumunda ters akışın gözlenmediği görülür.



Şekil 5.45 : 141 kanalı için 13 mm/s giriş hızında ve r30n45 miknatis konumu için asıltıdaki taneciklere ait deneysel çalışma sonucundaki görüntü.

r30n50

Şekil 5.46'da r30 konumu sabit tutularak n değerinde oynama yapılmıştır. Dikkat edilirse n değerinde yapılan değişiklik xc'ye yönelen taneciklerin daha geniş aralıkta (tamamen duvara yakın değil) xc'den çıkmalarını sağlamıştır.

r30n25 için tanecikler xc kolunda duvara yakın hareket ederken n değeri arttıkça kol genişliği boyunca taneciklere rastlanır.

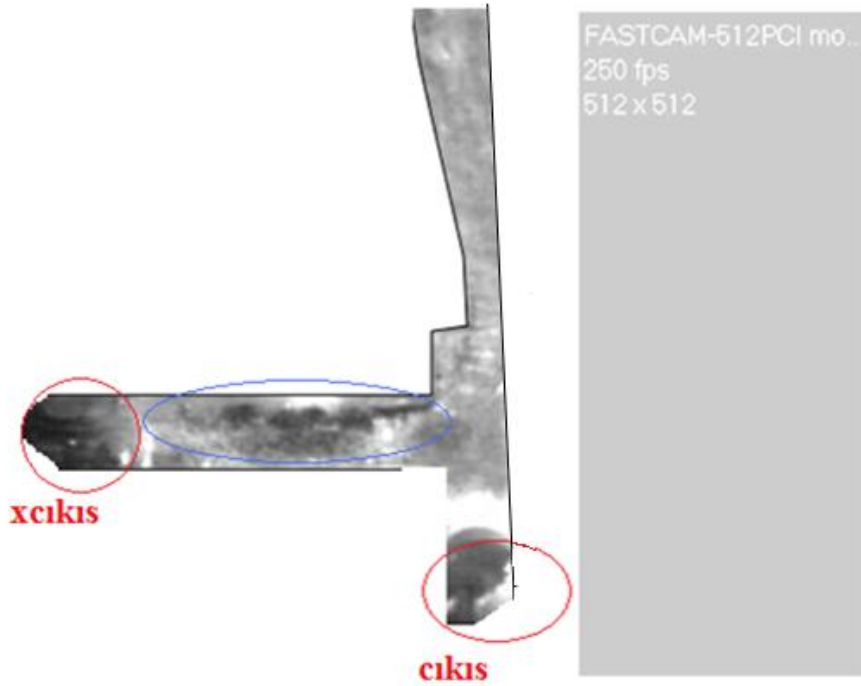
Bu miknatis konumu için yapılan incelemede sayısal çözümlemede 1 mm/s için gözlemlenen ters akış 13 mm/s giriş hızı için gözlenmemiş fakat suyun yüzde olarak büyük miktarının xc'yi tercih ettiği görülmüştür.



Şekil 5.46 : 141 kanalı için 13 mm/s giriş hızında ve r30n50 mıknatıs konumu için asıltıdaki taneciklere ait görüntü.

r40n25

Şekil 5.47’de r40n25 mıknatıs konumu için yapılan deney sonuçları verilmiştir.



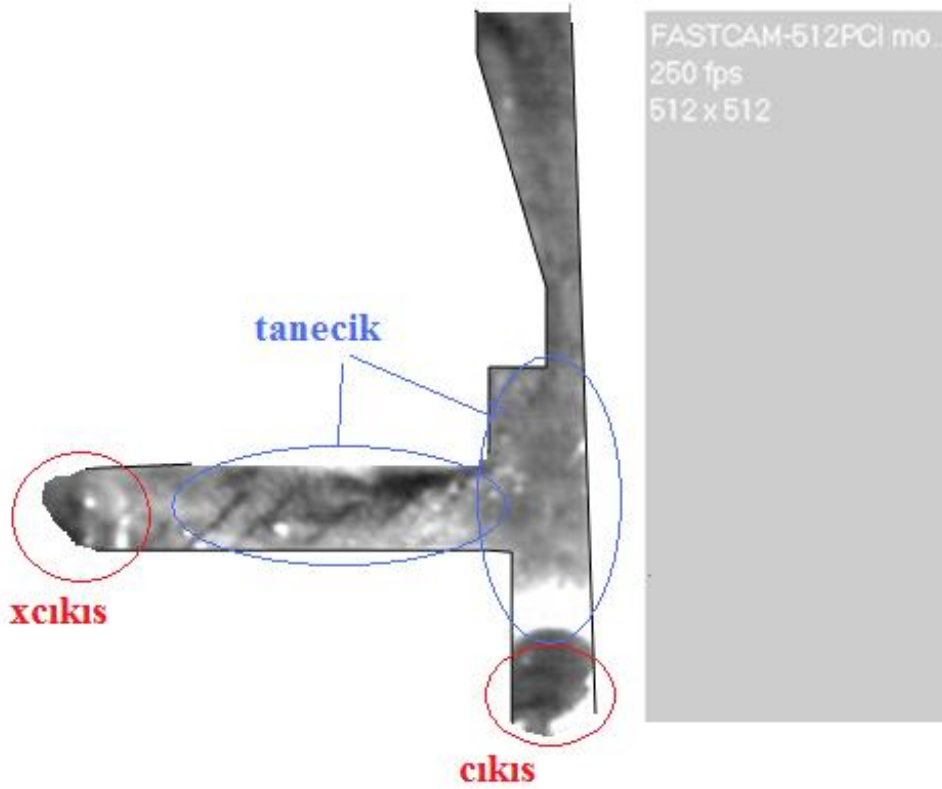
Şekil 5.47 : 141 kanalı için 13 mm/s giriş hızında ve r40n25 mıknatıs konumu için asıltıdaki taneciklere ait görüntü.

Şekil 5.47’de görüldüğü gibi mıknatıs konumunun r30’dan r40’a çekilmesi ile tanecikler yine xc’yi tercih etmekte fakat burada r’nin 30 mm olmasından farklı

olarak tanecikler xc kolu boyunca süreklilik sağlayacak şekilde xc çıkışına ilerlemişlerdir. Bu da sayısal modelde belirtildiği gibi r'nin yakın mesafelerinde taneciklerin direk çekilmesi ve r mesafesi arttıkça direk çekme yerine sürekli olarak tabir edilen yönlendirerek ayırma gözükür sonucuna bağlanabilir.

r40n50

Şekil 5.48'de r40n50 mıknatıs konumu için deneysel çalışma sonuçları verilmiştir. Mıknatıs r40n50 konumuna yerleştirildiğinde r30 konumundan farklı olarak taneciklerin bir kısmı da c'ye yönelmiş ve iki kanaldan da tanecik çıkışı olmuştur. Bir önceki şekilde n25 konumunda xc kolunda tanecikler xc ağız genişliğinin 2/3 gibi bir kısmında akarken burada tanecikler xc kolu genişliği boyunca akmışlardır. Burada taneciklerin c'ye yönelimlerinde n'nin de etkisi olduğu sonucu çıkarılabilir.



Şekil 5.48 : 141 kanalı için 13 mm/s giriş hızında ve r40n50 mıknatıs konumu için asıltıdaki taneciklere ait görüntü.

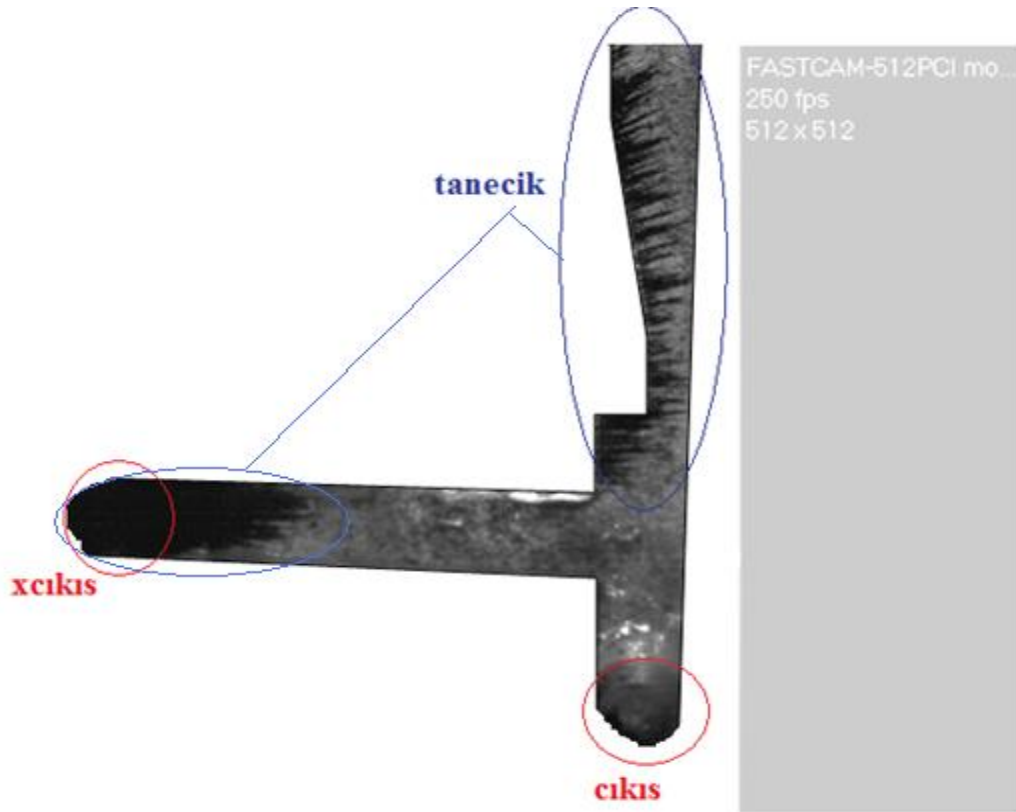
Şimdiye kadarki incelemelerde 141 kanalında 13 mm/s giriş hızında beş farklı noktadaki mıknatıs konumu için tanecik davranışı gözlenmeye çalışılmıştır. Burada r ve n parametrelerinin değişiminin ayırmaya etkisi incelenmiştir. Bu noktadan sonra daha düşük debi değerleri için tanecik davranışı ve manyetik alan etkisi gözlenmek istenmiştir. Sayısal çözümleme sonucunda verilen düşük debide taneciklerin büyük

miktarda kanala oturması veya ters akış sergilemelerinin deneysel olarak da gözlenerek tutarlılığı saptanmaya çalışılmıştır.

1.79 mm/s giriş hızı ve r20n20 mıknatıs konumu için yapılan deneysel çalışma

r20n20

Şekil 5.49'da r20n20 mıknatıs konumu için deneysel çalışma sonuçları verilmiştir. Yapılan bu incelemede tanecik hızları düşük olduğundan dolayı taneciklerin kanalda kalma süreleri fazladır.

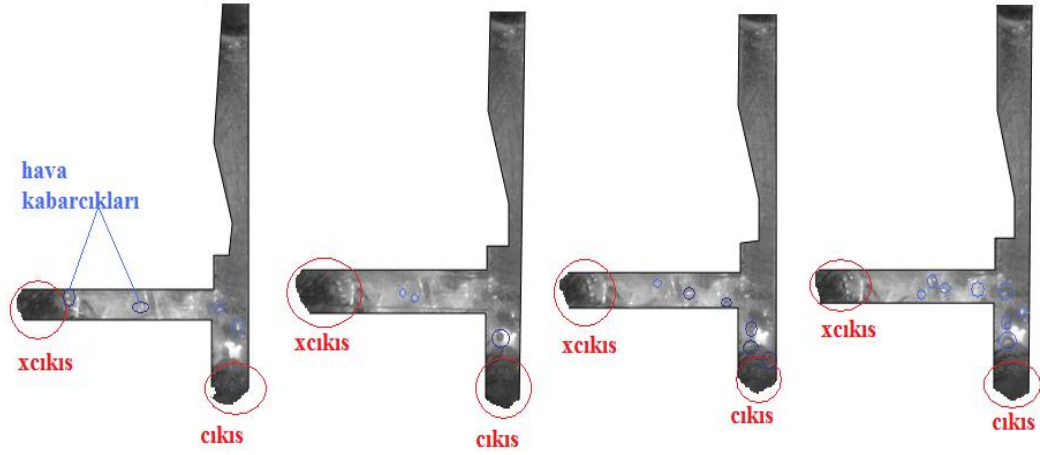


Şekil 5.49 : 141 kanalı için 1.79 mm/s giriş hızında ve r20n20 mıknatıs konumu için asıltıdaki taneciklere ait görüntü.

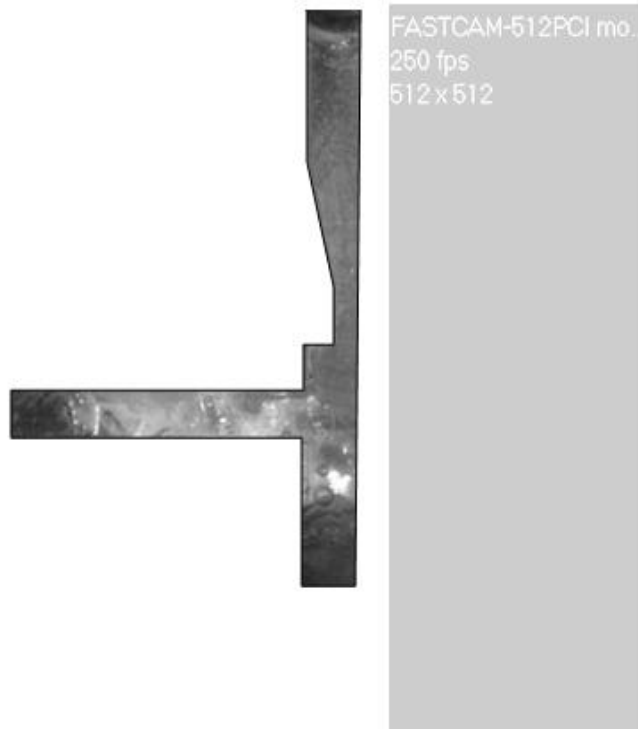
Şekil incelendiğinde düşük hız ve yüksek manyetik kuvvet dolayısıyla taneciklerin büyük kısmı kanal girişi ve rampada otururken çıkışlara yönelenlerden de hemen hemen hepsi xc ağzı önünde toplanmışlardır. Burada dikkat edilmesi gereken bir nokta da xc kolunda taneciklerin ağızda birikirken kolun üst kısımlarında taneciklere pek rastlanılmamaktadır. Bu da önceden belirtildiği gibi taneciklerin çıkışlara yönelirken direk çekilmelerinden (yönlendirilmeden-aniden) kaynaklanır. Taneciklerin kanalda oturmaları ve sürekli bir ayırma sağlanamadığından mıknatısın bu konumunun ayırma için uygun olmadığı deneysel olarak da gösterilmiştir.

r30n45

Şekil 5.50'de kanala 1.79 mm/s hız ile giren tanecik-su asıltısının r30n45 mıknatıs konumu altındaki davranışının deneysel olarak gözlenmesiyle elde edilen görüntü verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.50 : 141 kanalı için 1.79 mm/s giriş hızında ve r30n45 mıknatıs konumu için deneysel sonuç (a) c ağzında ters akış sonucu ağızdan içeriye giren hava kabarcıkları yuvarlak içine alınmıştır.(b) c ağzından kabarcık girişi ve xc ağzında kabarcıkların toplanması.

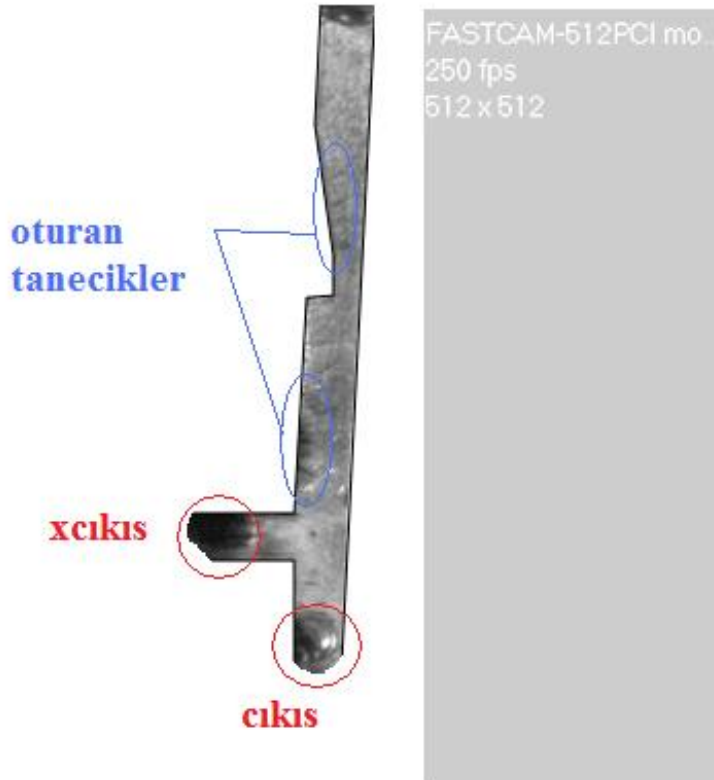
Şekil 5.34 ve 5.35’ de 1 mm/s giriş hızındaki asıltı için sayısal modelleme sonucunda c ağzında ters akış gözlenmişti. 1.79 mm/s giriş hızı için Şekil 5.50’de verildiği gibi mıknatısın r30n45 konumunda deneysel modelleme sonucu verilen kanalda c ağzından hava kabarcıklarının giriş yaparak xc ağzına yöneldikleri ve xc ağzında hava kabarcıklarının biriktiği görülür. Şekil 5.50a’da deneysel sonuçla elde edilen ters akışta hava kabarcıklarının zamanla ilerlemesi gösterilmiştir.

141 kanalı için iki farklı debi değeri ve farklı mıknatıs konumları için deneysel inceleme yapılmış ardından sayısal model ile tutarlılığı gözlenmiştir. Bundan sonra 114 kanalı için de manyetik etkinin deneysel olarak gözlenmesi amaçlanmıştır.

5.2.2.2 Kanal 114’de yapılan manyetik alan etkisiyle tanecik ayırma çalışmaları

7 mm/s giriş hızı ve r30n40 mıknatıs konumu için yapılan deneysel çalışma

114 kanalında iki debi değeri için deneysel inceleme yapılmıştır. Bunlardan ilki tanecikli akışta da verildiği gibi 7 mm/s giriş hızına karşılık gelen debi değeridir. Şekil 5.51’de deneysel çalışma sonucunda elde edilen görüntü verilmiştir.



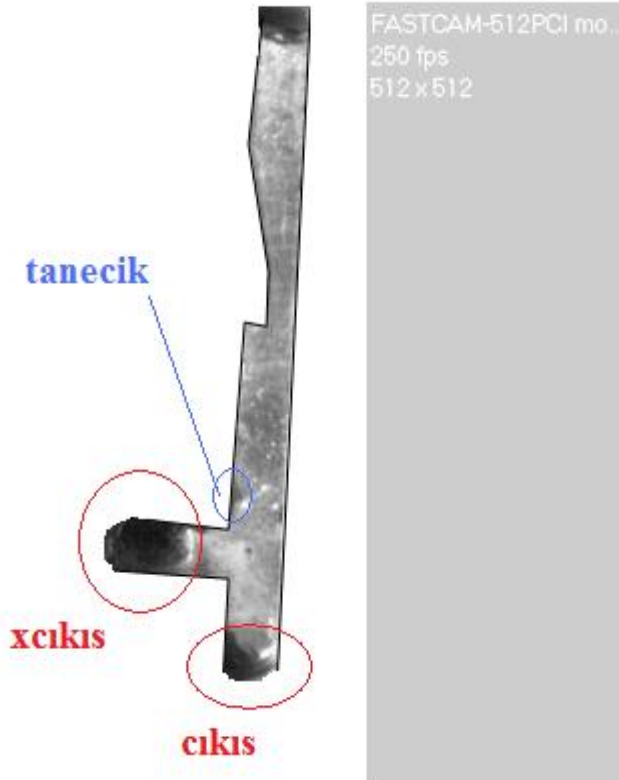
Şekil 5.51 : 114 kanalında 7 mm/s giriş hızı ve r30n40 mıknatıs konumu sonucunda oluşan tanecik davranışı.

Şekilden taneciklerin bir kısmının rampada bir kısmının da z uzunluğu boyunca oturduğu ve xc ağzında taneciklerin biriktiği görülür.

Bir sonraki kısımda da değinilecek olup Şekil 5.51'in Şekil 5.40 ve 5.41'de sırasıyla 5 mm/s ve 10 mm/s giriş hızları için sayısal çözümleme sonuçları verilen şekillerle tutarlı olduğu görülür. Her iki hızda da rampada ve 5 mm/s hız için z uzunluğunda taneciklerin oturduğu görülür.

20 mm/s giriş hızı ve r30n40 mıknatıs konumu için yapılan deneysel çalışma

114 kanalında 7 mm/s giriş hızı için taneciğin manyetik alan altındaki davranışı deneysel olarak saptanmasıyla debi arttırılarak 20 mm/s giriş hızındaki asıltının r30n40 konumundaki mıknatısın oluşturduğu manyetik alana cevabı incelenmiştir. Şekil 5.52'de deneysel sonucu verilen kanalda taneciklerin çok küçük bir bölümünün z konumunda oturduğu ve her bir çıkış ağzında tanecik olduğu görülür yani iki çıkıştan da tanecik çıkışı vardır.



Şekil 5.52 : 114 kanalında 20 mm/s giriş hızı ve r30n40 mıknatıs konumu sonucunda oluşan tanecik davranışı.

Şekil ve deneydeki sonuçlardan yola çıkarak hızın artmasıyla ataleti artan taneciklerin bir kısmının mıknatıs kuvvetini yenerek c'ye yöneldikleri gözlenmiştir.

114 kanalı için r30n40 mıknatıs konumu ayırma için uygun olmakla beraber hız artımının bazı sınırlarda tutulmasının daha iyi sonuçlar verdiği sayısal olarak da bir önceki kısımda verilmişti. Hız 5 mm/s'den 10 mm/s'ye çıkarıldığında taneciklerin bir kısmı c'yi tercih etmiş fakat sıvıdan ayrılması kolaylaşmış ve ayırma konusunda önemli bir yer teşkil eden zaman parametresinden kazanılmıştır.

6. DEĞERLENDİRME

- Mili-mikro boyutlu bir kanalda, mikro boyutlu manyetik tanecikler içeren bir asıltı akışından taneciklerin manyetik alan etkisi altında ayrılması olayı, sayısal ve deneysel olarak incelenmiş ve sonuçların uyum içinde olduğu gözlenmiştir.
- İki boyutluluk kabulü ile yapılan sayısal çözümleme sonuçlarının, gerçekte üç boyutlu olan deneysel sistemden elde edilen bulgularla uyum içinde olması, sayısal modellemede yapılan kabulün kabul edilebilir olduğunu göstermiştir.
- Manyetik ayırma için elektro mıknatıs yerine sürekli mıknatıs kullanımı, canlı hücreler içeren örnekler üzerinde yapılan uygulamalarda yöntemi güvenli kılmaktadır.
- Üzerinde çalışılmış olan yöntem, akışkan içerisindeki manyetik tanecikleri ayırmak amacıyla kullanılabileceği gibi; manyetik duyarlılığı olmayan ancak, yapay olarak beslenen manyetik tanecikler üzerindeki özel kaplamalar ile cezbedilen taneciklerin akıştan ayrılması için de uygundur. Örneğin, üzeri antikör, DNA veya benzeri biyoetkin maddeler ile kaplı manyetik polimer tanecikler tıpta tanılama uygulamalarında kullanılmaktadır.
- Sunulan çalışma kapsamında önerilen ayırma yöntemi ve kanal geometrisinin, 1 ila 10 mm/s gibi mikroakışlar için geniş kabul edilebilecek bir hız aralığında oldukça yüksek ayırma verimi sağlaması, DNA örnekleri gibi sarfiyatın az olması istenen uygulamalarda güvenle kullanılabileceğini, hızlı ve doğru sonuçlar vereceğini göstermiştir.
- Mıknatısa uygun konum belirlenerek, yüksek yoğunluğa sahip taneciklerin, kanalda oturmaları önleniği gibi, çoğunluğu istenilen doğrultuya yönlendirilebilmiştir. Buradan sistemin, sürekli ayırma işlemi için uygun olduğu ve μTAS , *lab-on-a-chip* gibi, aynı anda birçok laboratuvar işlemini gerçekleştiren bütünleşik sistemlere uyarlanabileceği öngörülmüştür.

- Manyetik alan uygulanmadığı durumda, taneciklerin akışı izlediği ve kanal çıkışlarına, akışkanla yaklaşık olarak aynı oranda dağıldığı görülmüştür. Dolayısıyla, asıltı içerisindeki manyetik duyarlılığı olan ve olmayan taneciklerin birbirinden ayrılması için de, önerilen yöntemin yüksek bir ayırma verimi ile kullanılabileceği söylenebilir. Bu amaçla, daha sonra yapılacak olan çalışmalarda yöntemin, manyetik duyarlılığı olan ve olmayan tanecikleri ayırma etkenliğinin araştırılması önerilir.
- Bu çalışmada önerilen yöntemin ve geometrinin, tıbbi tanılama yöntemleri gibi nano tanecik uygulamalarında da kullanılabilirliğini göstermek amacıyla, mikrokanalda nano boyutlu manyetik taneciklerin biyolojik sıvılardan ayrılması konusunun da, bundan sonraki çalışmalarda ele alınabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

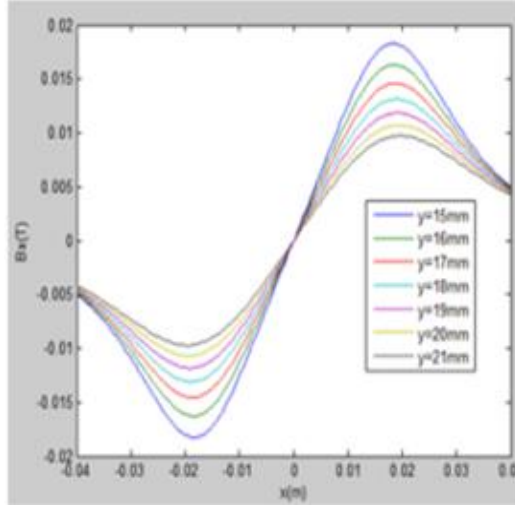
- Afshar, R., Moser, Y., Lehnert, T. and Gijs, M. A. M.,** 2009: Magnetic particle dosing and size separation in a microfluidic channel, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Elsevier, Switzerland.
- Andersen, K. B., Levinsen, S., Svendsen, W. E. and Okkels, F.,** 2009: A generalized theoretical model for ‘continuous particle separation in a microchannel having asymmetrically arranged multiple branches’, *Lab on a Chip*, DOI:10.1039/b822959g.
- Crowe, C., Sommerfeld, M. and Tsuji, Y.,** 1998: *Multiphase Flows with Droplets and Particles*, CRC Press.
- Çiçek, B.,** 1988: Flash (Ani) Piroliz Sırasında Linyit Kömürlerinde Bulunan Kükürtlü Bileşiklerin Değişiminin İncelenmesi ve Magnetik Ayrılması, Ankara Üniversitesi, YÖK-5880, Ankara.
- Else, M.,** 2005: An assessment of magnetization effects on Hydrogen cracking for thick walled pipelines, 381 Eldenstreet, MS 4021, Herndon, VA 20170-4817.
- Fluent User Guide-Fluent 6.3.26**
- Furlani, E. P. ,** 2001, *Permanent Magnet and Electromechanical Devices*, Academic Press, USA.
- Furlani, E. P.,** 2005: Analysis of Particle Transport in a Magnetophoretic Microsystem, Institute for Lasers, Photonics and Biophotonics, University at Buffalo (SUNY), Buffalo, NY, 14260.
- F.W. BELL,** SYPRIS TEST & MEASUREMENT, Model 5180 Gauss/Tesla Meter Instruction Manual.
- Gerber, R., Takayasu, M., Friedlaender, F.,** 1983: Magnetic separation of submicron particles, Purdue University, West Lafayette, IN.
- Han, K-H., Han, A. and Frazie, A. B.,** 2006: Microsystems for isolation and electrophysiological analysis of breast cancer cells from blood, *Biosensors and Bioelectronics* 21, 1907-1914, Atlanta, USA.
- Haverkort, J. W., Kenjereš, S. and Kleijn, C. R.,** 2009a: Computational Simulations of Magnetic Particle Capture in Arterial Flows, Department of Multi-Scale Physics, Delft University of Technology, Prins Bernhardlaan 6, 2628 BW, Delft, The Netherlands.
- Haverkort, J. W., Kenjereš, S., and Kleijn, R.,** 2009b: Magnetic particle motion in a Poiseuille flow, *Physical Review E* 80, 016302.
- Huang, L. R., Cox, E. C., Austin, R. H. and Sturm, J. C.,** 2004: *Science*, 304, 987.

- Häfeli, U.O., Ciocan, R. and Dailey, J.P.,** 2002: Characterization of magnetic particles and their magnetophoretic mobility using a digital microscopy method, *European Cells and Materials* Vol. 3. Suppl. 2, pg: 24-27, ISSN 1473-2262
- Kenjeres, S. and Stuart, D. C. C.,** 2009: Computational Simulations of Magnetic Particle Capture in Simplified and Realistic Arterial Flows: Towards Optimized Magnetic Drug Targeting, Department of Multi-Scale Physics, Faculty of Applied Sciences, Delft University of Technology, IFMBE Proceedings 25/IV, pp. 1006-1009.
- Langhaar, H., L.,** 1942: Steady flow in the transitional length of a straight tube, *J. Appl. Mech.*, 64: A-55.
- Modak, N., Datta, A. and Ganguly, R.,** 2009: Cell separation in a microfluidic channel using magnetic microspheres, *Microfluid Nanofluid*, DOI 10.1007/s10404-008-0343-z.
- Norpoth, J., Dreyer, S. and Jooss C.,** 2008: Straightforward field calculations for uniaxial hardmagnetic prisms: stray field distributions and dipolar coupling in regular arrays, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41 025001
- Pamme, N.,** 2007: Continuous flow separations in microfluidic devices, www.rsc.org/loc, *Lab on a Chip*, Critical Review, DOI: 10.1039/b712784g.
- Pamme, N., Eijkel, J.C.T. and Manz, A.,** 2006: On-chip free-flow magnetophoresis: separation and detection of mixtures of magnetic particles in continuous flow, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol.307, 237–244
- Purwar, H., Nag, A., Pushkar, P., and Banerjee, S.,** 2010: Measurement of Susceptibility of Manganese (II) Sulphate solution by Quincke's Method, Indian Institute of Science Education and Research, Kolkata.
- Ramadan, Q. and Gijs, M. A. M.,** 2009: Simultaneous magnetic particles washing and concentration in a microfluidic channel, *Procedia Chemistry*, Proceedings of the Eurosensors XXII Laboratory of Microsystems, Ecole Polytechnique Federale de Laussane (EPFL), 1015 Lausanne, Switzerland.
- Serway, R. A. and Beichner, R. J. ,** 2002-2005: *Fen ve mühendislik için fizik: elektrik ve manyetizma - ışık ve optik modern fizik*, Palme, Ankara.
- Sinha, A., Ganguly, R., and Puri, I.K.,** 2009: Magnetic separation from superparamagnetic particle suspensions, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 321, 2251-2256
- Sinha, A., Ganguly, R., De, A.K., and Puri, I.K.,** 2007: Single magnetic particle dynamics in a microchannel, *Phys. Fluids* 19, 117102.
- Smistrup, K., Bu, M., Wolff, A., Bruus, H. and Hansen, M. F.,** 2007: Theoretical analysis of a new, efficient multifluidic magnetic bead separator based on magnetic structures on multiple length scales, *Multifluid Nanofluid*, DOI: 10.1007/s 10404-007-0213-0

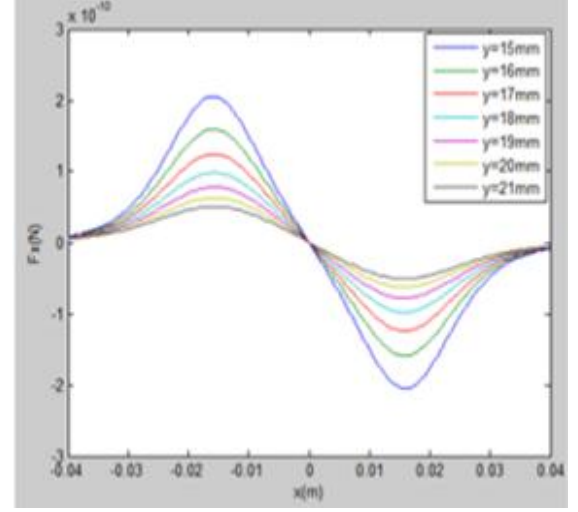
- Şenel, S., Elmas, B., and Garipcan, B.,** 2006: Manyetik poli (Etilendimetakrilat-Vinil İmidazol) Mikroküreleri ile Atık Sulardan Ağır Metal İyonlarının Uzaklaştırılması, TÜBİTAK-Proje No: 105T157, Ankara.
- Takagi, J., Yamada, M., Yasuda, M. and Seki, M.,** 2005: Continuous particle separation in a microchannel having asymmetrically arranged multiple branches, DOI: 10.1039/b501885.
- White, F.,** 2006: *Viscous Fluid Flow*, Third Edition, McGraw-Hill series.
- Yamada, M. and Seki, M.,** 2005: Hydrodynamic filtration for on-chip particle concentration and classification utilizing microfluidics, DOI: 10.1039/b509386d.
- Zhou, Y., Wang, Y., and Lin, Q.,** 2009: A Microchip for Continuous-Flow, Magnetically Controlled Capture and Separation of Microparticles, CFD Research Corporation, Huntsville, Alabama 35805, USA.

EKLER

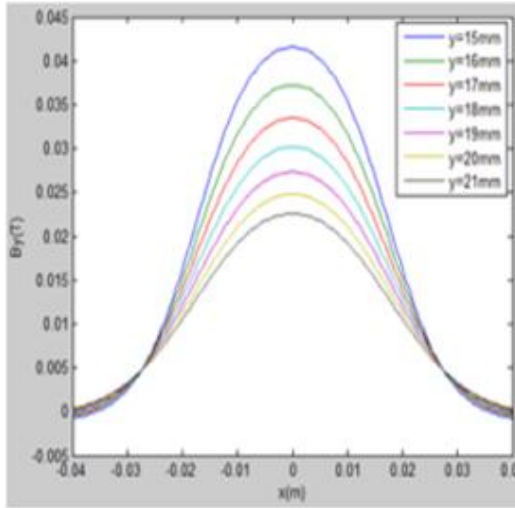
EK.A : Dikdörtgen kesitli 10mm*35mm*10mm ölçülerindeki NdFeB mıknatısına ait eğriler.



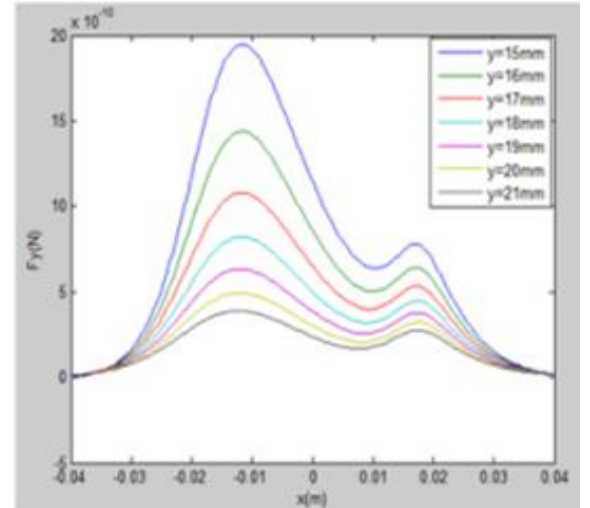
(a)



(b)

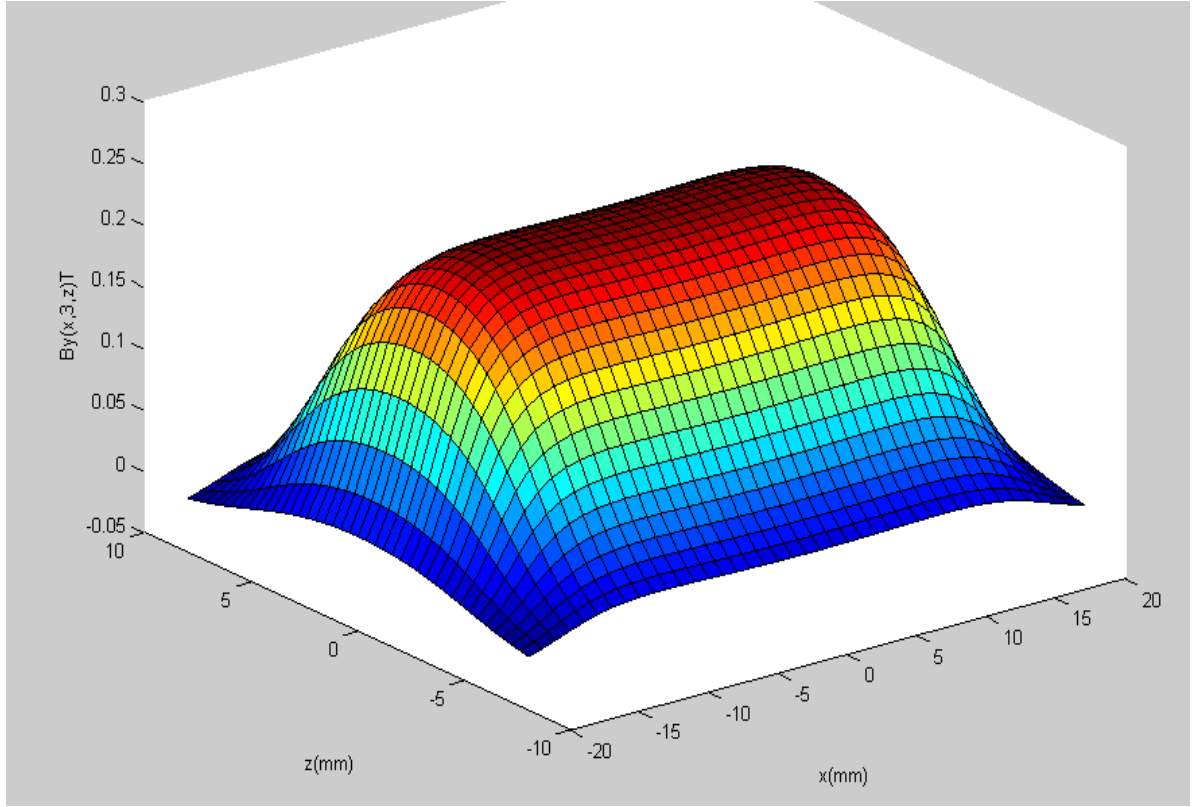


(c)



(d)

Şekil A.1 : Mıknatısa ait : (a) B_x ' in mıknatısın yatay konumu ile değişimi. (b) F_x ' in mıknatısın yatay konumu ile değişimi. (c) B_y ' in mıknatısın yatay konumu ile değişimi. (d) F_y ' in mıknatısın yatay konumu ile değişimi.



Şekil A.2 : Mıknatısın $y=3$ mm uzaklıkta oluşturduğu manyetik alanın x ve z koordinatlarına göre değişimi.

EK.B : Deney düzeneğinde kullanılan aletler

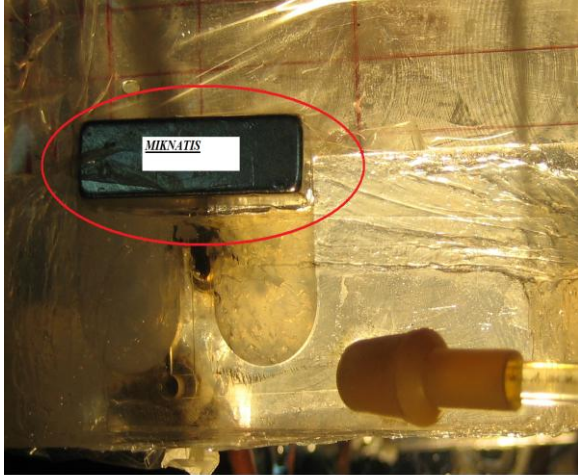
Çizelge B.1 :Deneysel modellemede kullanılan ölçüm ve diğer aletler.

	Motor1: Sayısal ve deneysel modellemelerde kanala giren asıltının homojen olduğu kabul edilmiştir. Hazne içerisinde homojen asıltı elde etmek amacıyla hazneye devri ayarlanabilir motor ve karıştırıcı takılmıştır.
	Devir ayarlayıcısı: Karıştırıcı amaçlı kullanılan motorun devrinin hassas ayarlanabilmesi için kullanılır.
	Basınç transmitteri: Atmosfer ile hazne içindeki basınç farkını ölçmek amaçlı kullanılmıştır. Bir ucu atmosfere açık diğer ucu da hazneye bağlanan aletin verdiği değer vakum pompasının emme miktarının artırılması veya azaltılması hakkında bilgi verir.
	Terazi: Kanal çıkışındaki asıltı miktarları 10^{-3} gr'a duyarlı hassas terazilerle ölçülmüştür. Her bir çıkıştaki asıltı miktarlarından asıltıların çıkışları tercih etme yüzdeleri ve belli süredeki toplanma miktarlarından debi ve kanal giriş hızına geçilir.

Çizelge B.1 : (devam) Deneysel modellemede kullanılan ölçüm ve diğer aletler.

	Kamera-Mercek: Deneysel sonuçlar Photron Fastcme 512 PCI hızlı kamera ile elde edilmiştir. Kamera 4000 fps'a kadar duyarlı olup mercek olarak Sigma 105 mm f/2.8 EX DG Macro Lens kullanılmıştır. Kamera ile elde edilen sonuçlar .avi veya .jpg formatında depolanmıştır.
	Vakum pompası: Kanal girişinde 1 - 10 mm/s gibi düşük hız dolayısıyla debi ayarı için emiş hattı hazneye bağlanan gücü ayarlanabilir vakum pompası kullanılmıştır.
	Motor2: Sayısal modellemede kullanılan iki boyut kabulünün deneysel olarak gerçekleştirilmesi ve sabit dönme hızıyla titreşim yaratarak taneciklerin kanalda oturup tıkanıklılığa neden olmaması için kullanılan ikinci motor.

Çizelge B.1 : (devam) Deneysel modellemede kullanılan ölçüm ve diğer aletler.

 A digital Gauss/Tesla Meter (F.W.BELL 5180) with a blue and silver body, a small LCD screen, and a keypad. It is connected to a probe with a blue cable and a black cable. The device is resting on a wooden surface.	Mıknatısın manyetik alan şiddetinin ölçümü için F.W.BELL 5180 Gauss/Tesla Meter kullanılmıştır. Prop olarak <i>transverse prope</i> kullanılmıştır.
 A pile of dark, granular material, likely iron-based particles, spread out on a light-colored surface.	Tanecik: Deneysel modellemede kullanılan 20 μm çapında 6586 kg/m^3 yoğunluktaki manyetik duyarlılığı olan demir bazlı tanecikler kullanılmıştır.
 A rectangular NdFeB magnet with a black label that reads "MIKNATIS". It is placed on a metallic surface, and a red circle is drawn around it. A small, dark, cylindrical object is visible in the foreground.	Manyetik alan kaynağı: Taneciklerin yönlendirilmesinde 10mm*35mm*10mm ölçülerinde 0.5 T şiddetinde NdFeB mıknatıs kullanılmıştır.

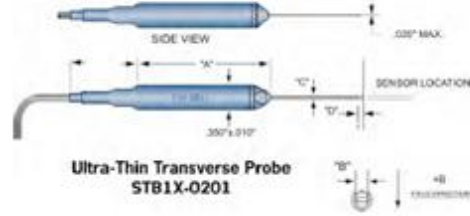
Mıknatısa ait manyetik alan şiddetinin ölçümü için kullanılan F.W.BELL 5180 Gauss/Tesla Meter ölçüm aletinde kullanılan transverse probuna ait özellikler aşağıda verilmiştir.

STANDARD TRANSVERSE PROBE

Model Number: (5180): STD18-0404
(5170): STH17-0404

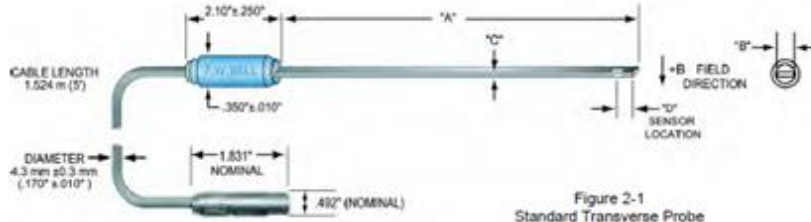
Frequency Bandwidth: (5180): 0 to 20 kHz
(5170): 0 to 10 kHz

Offset change with Temperature: ± 300 mG / °C (typical)
Accuracy change with Temperature: $-0.05\%/^{\circ}\text{C}$ (typical)
Operating Temperature Range: 0 to $+75^{\circ}\text{C}$ ($+32$ to $+167^{\circ}\text{F}$)
Storage Temperature Range: -25 to $+75^{\circ}\text{C}$ (-13 to $+167^{\circ}\text{F}$)



Model	A $\pm 0.063"$	B	C	D	Material	Corrected Linearity	Sensitivity	Active Area	Operating Temp. Range	Temp. stability (typ)		Frequency Response
STD18-0402	2"											
STD18-0404	4"	0.158" ± 0.004	0.045" ± 0.004	0.0335" (NOM)	Polypropylene **see note	0.5%/30kG						DC to 20kHz
STD18-0402	2"					1.0%/20kG	1X	0.015" DIA (NOM)	0°C to $+75^{\circ}$	± 0.030 Gauss/°C (typical)	-0.05 %/°C (typical)	DC to 10kHz
STD18-0402	4"					1.0%/20kG						DC to 10kHz
STD18-0402	4"	0.180" ± 0.004	0.080" ± 0.004	0.030" (NOM)	ALUMINUM 3003 1/4 FH	0.5%/30kG		0.025" DIA (NOM)		± 0.200 Gauss/°C	-0.1% /°C	DC only
STD18-0402	4"					1.0%/10kG						DC only
STB1X-0201	1"	0.050" ± 0.005	0.020" MAX	0.030" (NOM)	KAPTON	1.0%/10kG						DC only

Note: Due to continuous process improvement, specifications are subject to change without notice.
** Prior to late 2006 Transverse Probe Stems were rigid glass epoxy, .150 x .040".



Şekil B.1 : Transverse probuna ait özellikler (F.W.BELL)

EK.C : Sayısal çözümlerde rin miknatis konumu için yazılan UDF örneği.

```

/*****
/*
/* Tanecik uzerine manyetik etki nedeniyle etkiyen hacim kuvvetinin hesabı */
/*
/* Fluent 6 .3.26 */
/*
/* kodlayan:Sevilay Gurbuz */
/* Tarih: Aralık 2010 */
/*
/*
/*
*****/
#include "udf.h"
#include "dpm.h"
#include "math.h"
DEFINE_DPM_BODY_FORCE(Fmagnetxy,p,i)
{
double chi_t,chi_su,pi,mu_o,M,r,n,x1,x2,y1,y2,z1,z2,z;

real Hy1,Hy2,Hy3,Hy4,Hy5,Hy6,Hy7,Hy8;
real Hyy1,Hyy2,Hyy3,Hyy4,Hyy5,Hyy6,Hyy7,Hyy8;
real Hyx1,Hyx2,Hyx3,Hyx4,Hyx5,Hyx6,Hyx7,Hyx8;
real Hx1,Hx2,Hx3,Hx4;
real Hxx1,Hxx2,Hxx3,Hxx4;
real Hxy1,Hxy2,Hxy3,Hxy4;
real volforce;

/*sabitlerin girimi*/

int dir[2]={0.,1.},k[2]={1,0};
chi_t=2.0565;
chi_su=-9.035e-6;
pi=3.14159;
mu_o=4*pi*1.e-7;
M=2.e6;
r=30.e-3;
n=40.e-3;
x1=-17.5e-3;
x2=17.5e-3;
y1=-10.e-3;
y2=0.;
z1=-5.e-3;
z2=5.e-3;
z=0.;

/*y yönündeki manyetik alan şiddeti*/

```


$z2,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y2,2.))* (pow(P_POS(p)[1]+r-y2,2.))* (pow(P_POS(p)[0]-n-x2,2.)+pow(z-z2,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y2,2.))));$

*/*y yönündeki manyetik alan şiddetinin x'e göre türevi*/*

$H_{yx1}=M/(4.*\pi)*(z-z1)*(P_POS(p)[1]+r-y1)*(sqrt(pow(P_POS(p)[0]-r-x1,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y1,2.)+pow(z-z1,2.))-pow(P_POS(p)[0]-n-x1,2.))*1./sqrt(pow(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y1,2.)+pow(z-z1,2.)))/(pow(P_POS(p)[1]+r-y1,2.)*(pow(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y1,2.)+pow(z-z1,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)));$
 $H_{yx2}=M/(4.*\pi)*(z-z2)*(P_POS(p)[1]+r-y1)*(sqrt(pow(P_POS(p)[0]-r-x1,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y1,2.)+pow(z-z2,2.))-pow(P_POS(p)[0]-n-x1,2.))*1./sqrt(pow(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y1,2.)+pow(z-z2,2.)))/(pow(P_POS(p)[1]+r-y1,2.)*(pow(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y1,2.)+pow(z-z2,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)));$
 $H_{yx3}=M/(4.*\pi)*(z-z1)*(P_POS(p)[1]+r-y2)*(sqrt(pow(P_POS(p)[0]-r-x1,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y2,2.)+pow(z-z1,2.))-pow(P_POS(p)[0]-n-x1,2.))*1./sqrt(pow(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y2,2.)+pow(z-z1,2.)))/(pow(P_POS(p)[1]+r-y2,2.)*(pow(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y2,2.)+pow(z-z1,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)));$
 $H_{yx4}=M/(4.*\pi)*(z-z2)*(P_POS(p)[1]+r-y2)*(sqrt(pow(P_POS(p)[0]-r-x1,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y2,2.)+pow(z-z2,2.))-pow(P_POS(p)[0]-n-x1,2.))*1./sqrt(pow(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y2,2.)+pow(z-z2,2.)))/(pow(P_POS(p)[1]+r-y2,2.)*(pow(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y2,2.)+pow(z-z2,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)));$
 $H_{yx5}=M/(4.*\pi)*(z-z1)*(P_POS(p)[1]+r-y1)*(sqrt(pow(P_POS(p)[0]-r-x2,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y1,2.)+pow(z-z1,2.))-pow(P_POS(p)[0]-n-x2,2.))*1./sqrt(pow(P_POS(p)[0]-n-x2,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y1,2.)+pow(z-z1,2.)))/(pow(P_POS(p)[1]+r-y1,2.)*(pow(P_POS(p)[0]-n-x2,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y1,2.)+pow(z-z1,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-x2,2.)));$
 $H_{yx6}=M/(4.*\pi)*(z-z2)*(P_POS(p)[1]+r-y1)*(sqrt(pow(P_POS(p)[0]-r-x2,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y1,2.)+pow(z-z2,2.))-pow(P_POS(p)[0]-n-x2,2.))*1./sqrt(pow(P_POS(p)[0]-n-x2,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y1,2.)+pow(z-z2,2.)))/(pow(P_POS(p)[1]+r-y1,2.)*(pow(P_POS(p)[0]-n-x2,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y1,2.)+pow(z-z2,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-x2,2.)));$
 $H_{yx7}=M/(4.*\pi)*(z-z1)*(P_POS(p)[1]+r-y2)*(sqrt(pow(P_POS(p)[0]-r-x2,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y2,2.)+pow(z-z1,2.))-pow(P_POS(p)[0]-n-x2,2.))*1./sqrt(pow(P_POS(p)[0]-n-x2,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y2,2.)+pow(z-z1,2.)))/(pow(P_POS(p)[1]+r-y2,2.)*(pow(P_POS(p)[0]-n-x2,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y2,2.)+pow(z-z1,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-x2,2.)));$
 $H_{yx8}=M/(4.*\pi)*(z-z2)*(P_POS(p)[1]+r-y2)*(sqrt(pow(P_POS(p)[0]-r-x2,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y2,2.)+pow(z-z2,2.))-pow(P_POS(p)[0]-n-x2,2.))*1./sqrt(pow(P_POS(p)[0]-n-x2,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y2,2.)+pow(z-z2,2.)))/(pow(P_POS(p)[1]+r-y2,2.)*(pow(P_POS(p)[0]-n-x2,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y2,2.)+pow(z-z2,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-x2,2.)));$

*/*x yönündeki manyetik alan şiddeti*/*

$$\begin{aligned} Hx1 &= M / (4 * \pi) * \log((z - z1 + \sqrt{\text{pow}(z - z1, 2.) + \text{pow}(P_POS(p)[0] - n - x1, 2.) + r - y1, 2.)}) / (z - z2 + \sqrt{\text{pow}(z - z2, 2.) + \text{pow}(P_POS(p)[0] - n - x1, 2.) + \text{pow}(P_POS(p)[1] + r - y1, 2.)})); \\ Hx2 &= M / (4 * \pi) * \log((z - z1 + \sqrt{\text{pow}(z - z1, 2.) + \text{pow}(P_POS(p)[0] - n - x1, 2.) + r - y2, 2.)}) / (z - z2 + \sqrt{\text{pow}(z - z2, 2.) + \text{pow}(P_POS(p)[0] - n - x1, 2.) + \text{pow}(P_POS(p)[1] + r - y2, 2.)})); \\ Hx3 &= M / (4 * \pi) * \log((z - z1 + \sqrt{\text{pow}(z - z1, 2.) + \text{pow}(P_POS(p)[0] - n - x2, 2.) + r - y1, 2.)}) / (z - z2 + \sqrt{\text{pow}(z - z2, 2.) + \text{pow}(P_POS(p)[0] - n - x2, 2.) + \text{pow}(P_POS(p)[1] + r - y1, 2.)})); \\ Hx4 &= M / (4 * \pi) * \log((z - z1 + \sqrt{\text{pow}(z - z1, 2.) + \text{pow}(P_POS(p)[0] - n - x2, 2.) + r - y2, 2.)}) / (z - z2 + \sqrt{\text{pow}(z - z2, 2.) + \text{pow}(P_POS(p)[0] - n - x2, 2.) + \text{pow}(P_POS(p)[1] + r - y2, 2.)})); \end{aligned}$$

/*x yönündeki manyetik alan şiddetinin x'e göre türevi*/

$$\begin{aligned} H_{xx1} &= M/(4.*\pi)*(P_POS(p)[0]-n-x1)*(1/\sqrt{(\text{pow}(z-z2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y1,2.))}*(z-z2+\sqrt{(\text{pow}(z-z2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y1,2.))})-(z-z1+\sqrt{(\text{pow}(z-z1,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y2,2.))})/\sqrt{(\text{pow}(z-z2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y1,2.))})/((z-z1+\sqrt{(\text{pow}(z-z2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y2,2.))})*(z-z1+\sqrt{(\text{pow}(z-z1,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y1,2.))}))) \\ H_{xx2} &= M/(4.*\pi)*(P_POS(p)[0]-n-x1)*(1/\sqrt{(\text{pow}(z-z2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y2,2.))}*(z-z2+\sqrt{(\text{pow}(z-z2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y2,2.))})-(z-z1+\sqrt{(\text{pow}(z-z1,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y1,2.))})/\sqrt{(\text{pow}(z-z2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y2,2.))})/((z-z1+\sqrt{(\text{pow}(z-z2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y1,2.))})*(z-z1+\sqrt{(\text{pow}(z-z1,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y2,2.))}))) \\ H_{xx3} &= M/(4.*\pi)*(P_POS(p)[0]-n-x2)*(1/\sqrt{(\text{pow}(z-z2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y1,2.))}*(z-z2+\sqrt{(\text{pow}(z-z2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y1,2.))})-(z-z1+\sqrt{(\text{pow}(z-z1,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y2,2.))})/\sqrt{(\text{pow}(z-z2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y1,2.))})/((z-z1+\sqrt{(\text{pow}(z-z2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y2,2.))})*(z-z1+\sqrt{(\text{pow}(z-z1,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y1,2.))}))) \\ H_{xx4} &= M/(4.*\pi)*(P_POS(p)[0]-n-x2)*(1/\sqrt{(\text{pow}(z-z2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y2,2.))}*(z-z2+\sqrt{(\text{pow}(z-z2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y2,2.))})-(z-z1+\sqrt{(\text{pow}(z-z1,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y1,2.))})/\sqrt{(\text{pow}(z-z2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y2,2.))})/((z-z1+\sqrt{(\text{pow}(z-z2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y1,2.))})*(z-z1+\sqrt{(\text{pow}(z-z1,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y2,2.))}))) \end{aligned}$$

/* x yönündeki manyetik alan şiddetinin y'ye göre türevi*/

$$\text{Hxy1} = \text{M}/(4.*\pi)*(P_POS(p)[1]+n-x1)*(1/\text{sqrt}(\text{pow}(z-z1,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y1,2.))*(z-z2+\text{sqrt}(\text{pow}(z-z2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+r-y1,2.)))- (z-z1+\text{sqrt}(\text{pow}(z-z1,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-x1,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[1]+n-y1,2.)))/\text{sqrt}(\text{pow}(z-z2,2.)+\text{pow}(P_POS(p)[0]-n-$$

```

x1,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y1,2.)))/((z-z2+sqrt(pow(z-z2,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-
x1,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y1,2.)))*(z-z1+sqrt(pow(z-z1,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-
x1,2.))));
Hxy2=M/(4.*pi)*(P_POS(p)[1]+n-x2)*(1/sqrt(pow(z-z1,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-
x1,2.)+pow(P_POS(p)[1]+n-y2,2.))*(z-z2+sqrt(pow(z-z2,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-
x1,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y2,2.))-(z-z1+sqrt(pow(z-z1,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-
x1,2.)+pow(P_POS(p)[1]+n-y2,2.)))/sqrt(pow(z-z2,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-
x1,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y2,2.)))/((z-z2+sqrt(pow(z-z2,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-
x1,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y2,2.)))*(z-z1+sqrt(pow(z-z1,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-
x1,2.))));
Hxy3=M/(4.*pi)*(P_POS(p)[1]+n-x1)*(1/sqrt(pow(z-z1,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-
x2,2.)+pow(P_POS(p)[1]+n-y1,2.))*(z-z2+sqrt(pow(z-z2,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-
x2,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y1,2.))-(z-z1+sqrt(pow(z-z1,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-
x2,2.)+pow(P_POS(p)[1]+n-y1,2.)))/sqrt(pow(z-z2,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-
x2,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y1,2.)))/((z-z2+sqrt(pow(z-z2,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-
x2,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y1,2.)))*(z-z1+sqrt(pow(z-z1,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-
x2,2.))));
Hxy4=M/(4.*pi)*(P_POS(p)[1]+n-x2)*(1/sqrt(pow(z-z1,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-
x2,2.)+pow(P_POS(p)[1]+n-y2,2.))*(z-z2+sqrt(pow(z-z2,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-
x2,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y2,2.))-(z-z1+sqrt(pow(z-z1,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-
x2,2.)+pow(P_POS(p)[1]+n-y2,2.)))/sqrt(pow(z-z2,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-
x2,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y2,2.)))/((z-z2+sqrt(pow(z-z2,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-
x2,2.)+pow(P_POS(p)[1]+r-y2,2.)))*(z-z1+sqrt(pow(z-z1,2.)+pow(P_POS(p)[0]-n-
x2,2.))));

/*hacimsel kuvvet ifadesi*/

volforce=mu_o*3*(chi_t-chi_su)/((chi_t-chi_su)+3)*(((Hx1-Hx2-Hx3+Hx4)*(Hxx1-
Hxx2-Hxx3+Hxx4)+(-Hy1+Hy2+Hy3-Hy4+Hy5-Hy6-Hy7+Hy8)*(Hxy1-Hxy2-
Hxy3+Hxy4))*k[i]+((Hx1-Hx2-Hx3+Hx4)*(-Hyx1+Hyx2+Hyx3-Hyx4+Hyx5-
Hyx6-Hyx7+Hyx8)+(-Hy1+Hy2+Hy3-Hy4+Hy5-Hy6-Hy7+Hy8)*(-
Hyy1+Hyy2+Hyy3-Hyy4+Hyy5-Hyy6-Hyy7+Hyy8))*dir[i]);
return (volforce/P_RHO(p));
}

```


ÖZGEÇMİŞ

10 Mayıs 1984 tarihinde Erzurum’da doğdum. İlk ve orta öğrenimimi İzmir’de tamamladım. Lise eğitimimi 1999-2003 yılları arasında İzmir Ahmet Adnan Saygun Lisesi’nde yaptım. 2003-2007 yıllarında lisans eğitimimi İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği’nde yaptım. 2007 Temmuz ayında İstanbul Üniversitesi Makina Mühendisliği’ni tamamladıktan sonra İTÜ Makina Fakültesi Isı-Akışkan yüksek lisans programında çalışmalarına başladım. 2008-2010 yıllarında TÜBİTAK 2210 yurt içi yüksek lisans burs programından yararlandım.