

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DAİRESEL KESİTLİ PLASTİK BORULAR İÇİNDE  
BUZ YOĞUNLUĞUNDA KÜRE-SU KARIŞIM AKIŞININ  
İNCELENMESİ

139778

Makine Yük. Müh. Deniz ULUSARSLAN

FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programında  
Hazırlanan

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 29 Aralık 2003  
Tez Danışmanı : Prof. Dr. İsmail TEKE (YTÜ)  
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hasan A. HEPERKAN (YTÜ)  
: Prof. Dr. Haluk KARADOĞAN (İTÜ)  
: Prof. Dr. A. Korhan BİNARK (MÜ)  
: Doç. Dr. Nurdil ESKİN (İTÜ)

*[Handwritten signatures and initials]*

İSTANBUL, 2003

Y. C. MÜHÜRLEME KURULU  
MÜHÜRLEME MERKEZİ

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	v
ŞEKİL LİSTESİ .....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ÖNSÖZ.....	xiii
ÖZET.....	xiv
ABSTRACT .....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Buz-Su Karışımının Kullanıldığı ve Kullanılabileceği Alanlar .....	1
1.2 Araştırmanın Amacı .....	2
2. İKİ FAZLI KATI-SIVI KARIŞIMLARININ BORULARDAKİ AKIŞI .....	3
2.1 Çamur Akışları .....	3
2.1.1 Çökelen Karışımlar.....	3
2.1.1.1 Sabit Yatak Akışı.....	6
2.1.1.2 Hareketli Yatak Akışı.....	6
2.1.1.3 Asimetrik Süspansiyon Akışı .....	7
2.1.1.4 Simetrik Süspansiyon Akışı .....	7
2.1.2 Çökelmeyen Karışımlar.....	7
2.2 Kapsül Akışları.....	8
2.3 Küresel Kapsül Kullanımının Sebepleri.....	8
2.4 Kapsül Akışlarını Çamur Akışlarından Ayıran Özellikler .....	9
2.5 Küresel Kapsül Akış Mekanizması .....	11
3. KATI-SIVI KARIŞIM AKIŞLARI İLE İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR....	15
3.1 Çamur Akışları .....	15
3.1.1 Tane Yoğunluğu Sudan Fazla Olan Çamur Akışlarına Ait Çalışmalar.....	15
3.1.2 Tane Yoğunluğu Suya Yakın yada Daha Az Olan Çamurlara Ait Çalışmalar.....	18
3.1.2.1 Polisitiren-Su Çamuru Kullanılarak Yapılmış Çalışmalar .....	18
3.1.2.2 Buz-Su veya Kar-Su Çamuru Kullanılarak Yapılmış Çalışmalar .....	19
3.2 Kapsül Akışları.....	22
3.3 Kapsüller ile Yapılmış Çalışmalar ve Sonuçları .....	23
3.3.1 Tek Kapsül Akışları.....	24
3.3.1.1 Küresel Kapsül Kullanılmış Çalışmalar .....	24
3.3.1.2 Silindirik Kapsül Kullanılmış Çalışmalar .....	28
3.3.1.3 Değişik Şekillerde Kapsül Kullanılmış Çalışmalar.....	33
3.3.2 Kapsül Treni Akışları .....	34
3.3.2.1 Küresel Kapsül Kullanılmış Çalışmalar .....	34

3.3.2.2	Silindirik Kapsül Kullanılmış Çalışmalar .....	39
3.3.2.3	Değişik Şekillerde Kapsül Kullanılmış Çalışmalar .....	44
3.4	Genel Bakış .....	47
3.5	Soğutma Sistemlerinde Buz Kapsüllerinin Kullanımı .....	48
4.	ÖN DENEYLER .....	50
4.1	Birinci Ön Deney .....	50
4.2	İkinci Ön Deney .....	56
4.2.1	Su Akışı Sırasında Belli Noktalardaki Statik Basınçların Ölçümü .....	59
4.2.2	Ön Deney Sonuçları .....	64
5.	DENEY TESİSATI .....	65
5.1	Akış Sistemi .....	65
5.1.1	Depo .....	68
5.1.2	Vanalar ve Su Sayaçları .....	68
5.1.3	By-pass Hattı .....	69
5.1.4	Pompa .....	70
5.1.5	Boru Hattı .....	72
5.1.6	Basınç Düşüşü Ölçüm Bölgesi .....	73
5.1.7	Elek .....	74
5.1.8	Elevatör .....	75
5.1.9	Boru Hattını Taşıyan Konstrüksiyon .....	78
5.1.10	Kapsüller .....	78
5.2	Ölçüm Sistemi ve Ölçüm Cihazlarının Kalibrasyonu .....	78
5.2.1	Fark Basınç Transmitteri .....	80
5.2.2	Fiber Optik Sensörler .....	80
5.2.3	Termokupl .....	82
5.2.4	Endüstriyel Otomasyon Kartı .....	82
5.3	Fark Basınç Transmitterinin Kalibrasyonu .....	83
5.4	Su Sayaçlarının Kalibrasyonu .....	87
5.5	Karşılaşılan Problemler ve Çözüm Yöntemleri .....	92
5.5.1	Hava Tahliyesi Kontrol Vanaları .....	92
5.5.2	Kapsül Yönlendirme Panelleri .....	93
5.5.3	Kayış Kasnak Mekanizması .....	94
5.5.4	Klasik Manometre .....	95
5.5.5	Ölçekli Kapsül Gözlem Hattı .....	95
5.5.6	Deney Tesisatına Ait Topraklama Hattı .....	95
6.	DENEYLERİN YAPILIŞI VE HESAPLAR .....	97
6.1	Kapsül-Su Karışım Akışının Deneysel Parametreleri .....	97
6.1.1	Su Hızı .....	97
6.1.2	Kapsül Hızı ve Ortalama Hız .....	98
6.1.3	Deneylerden Önce Belirlenen Teorik Kapsül Adedi .....	98
6.1.4	Dinamik Konsantrasyon Kapsül Adedi .....	100
6.1.5	Gerçek Kapsül Hızı ve Kayma Oranı .....	101
6.1.6	Kapsüller Arası Mesafe ve Statik Konsantrasyon Kapsül Adedi .....	102
6.1.7	Tek Faz Su Akışında Oluşan Basınç Düşüşü .....	103
6.1.8	Kapsül Su Karışım Akışında Oluşan Basınç Düşüşü .....	106
6.2	Deneylerin Yapılışı .....	106
6.3	Kapsül Su Karışım Akışına Ait Örnek Hesap .....	107

6.3.1	Ölçüm Bölgesinden Saniyede Geçen Kapsül Adedi .....	111
6.3.2	Gerçek Kapsül Hızı ve Kapsül Debisi.....	112
6.3.3	Kapsüller Arası Mesafe ve Statik Konsantrasyon Kapsül Adedi.....	112
6.3.4	Statik ve Dinamik Kapsül Konsantrasyonları .....	113
6.3.5	Su ve Karışım Akışına Ait Basınç Düşüşleri .....	113
6.4	Sonuçlar.....	114
6.5	Gözlem Bölgesindeki Kapsül Sayısının Hesaplanan $N_{st}$ Değeri İle Uyum.....	123
6.6	Boyut Analizi.....	125
6.7	Karışım Yoğunluğu .....	126
6.8	Teorik Yaklaşım .....	128
6.9	DeneySEL Bulgulara Bağlı İfade.....	131
7.	İSTATİKSEL ANALİZ VE DENEY HATA ANALİZİ .....	134
7.1	İstatiksel Analiz.....	134
7.1.1	Güvenilirlik.....	134
7.2	Deney hata analizi .....	139
8.	DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ .....	141
8.1	Deneyler Sırasında Tespit Edilen Kapsül Akış Özellikleri .....	141
8.2	Deney Sonuçlarının Diğer Akış Tiplerindeki Modeller ile Karşılaştırılması.....	145
9.	SONUÇLAR.....	152
9.1	Bu Alanda Yapılabilecek Diğer Çalışmalar ve Öneriler .....	160
	KAYNAKLAR.....	161
	EKLER .....	164
	Ek 1 Sensör Sinyal Değerlendirilmesinde Kullanılan Bilgisayar Programının Akışı.....	165
	Ek 2 Sensör Sinyal Değerlendirilmesinde Kullanılan Bilgisayar Programı.....	169
	Ek 3 Durand-Condolios İfadesi İle Birim Boydaki Basınç Düşüşleri .....	176
	Ek 4 Hayden-Stelson İfadesi İle Birim Boydaki Basınç Düşüşleri.....	177
	Ek 5 Newitt İfadesi İle Birim Boydaki Basınç Düşüşleri .....	178
	Ek 6 Zandi-Govatos İfadesi İle Birim Boydaki Basınç Düşüşleri .....	179
	Ek 7 Govier-Aziz İfadesi İle Birim Boydaki Basınç Düşüşleri .....	180
	Ek 8 Agarwal İfadesi İle Birim Boydaki Basınç Düşüşleri.....	181
	ÖZGEÇMİŞ.....	182

## SİMGE LİSTESİ

A	Alan
B	Kapsül şekil faktörü
c	Yağlama faktörü (taşıyıcı sıvının sürtünmeyi azaltıcı etkisini gösteren katsayı)
C	Katı maddenin hacimsel konsantrasyonu
$C_{din}$	Dinamik konsantrasyon
$C_{st}$	Statik konsantrasyon
$C_D$	Sürüklenme katsayısı
$C_L$	Kaldırma katsayısı
d	Kapsül çapı
D	Boru iç çapı
e	Yüzey pürüzlülüğü
$e_b$	Boru yüzey pürüzlülüğü
$e_{kp}$	Kapsül yüzey pürüzlülüğü
f	Sürtünme katsayısı ( $\lambda=4f$ )
$f_b$	Boru yüzeyi sürtünme katsayısı
$f_{kp}$	Kapsül yüzeyi sürtünme katsayısı
$f_{din}$	Boru yüzeyi ile kapsül arasındaki dinamik sürtünme katsayısı
$f_{st}$	Boru yüzeyi ile kapsül arasındaki statik sürtünme katsayısı
$f_s$	Sıvı sürtünme katsayısı
$f_{tane}$	Tane sürtünme katsayısı
F	Sürtünme kuvveti
Fr	Froude sayısı
$Fr_{kp}$	Kapsül Froude sayısı
$Fr_{kr}$	Karışım Froude sayısı
$Fr_o$	Limit çökme hızına bağlı Froude sayısı
g	Yerçekimi ivmesi
G	Kapsül ağırlık kuvveti
h	Yükseklik
HR	Sürüklenme faktörü (Hold-up ratio)
$\Delta H$	Yük kaybı
$\left(\frac{\Delta H}{L}\right)$	Birim boydaki yük kaybı
k	Kapsül çapının boru iç çapına oranı ( $=d/D$ )
K	Sıvının kapsüle uyguladığı kaldırma kuvveti
KS	Boru ve kapsül malzemesine ait sertlik faktörü
$K_{DAG}$	Deneysel ani genişleme kayıp katsayısı
$K_{TAG}$	Teorik ani genişleme kayıp katsayısı
l	Kapsül uzunluğu (silindirik kapsül için)
$l_{kp}$	Treni oluşturan kapsüller arasındaki mesafe
L	Ölçüm bölgesi uzunluğu
m	Trendeki kapsül sayısı
n	Sensörlerden bilgisayara iletilen sinyal piklerinin sayısı
$N_{din}$	Dinamik konsantrasyonu oluşturan kapsül adedi
$N_I$	Basınç düşüşü indeksi
$N_{st}$	Statik konsantrasyonu oluşturan kapsül adedi
$N_{te}$	Dinamik konsantrasyonu oluşturan teorik olarak bulunmuş kapsül adedi
P	Basınç
$\Delta P$	Basınç düşüşü

$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)$	Birim boydaki basınç düşüşü (i)
$Q_{kp}$	Kapsül debisi
$Q_s$	Sıvı debisi
$Q_{top}$	Sistemde dolaşan katı ve sıvı fazın toplam debisi
$r$	Kapsül yarıçapı
$R$	Boru yarıçapı
$Re$	Reynolds sayısı
$Re_s$	Su hızına bağlı Re sayısı
$Re_{kr}$	Karışımın ortalama hızına bağlı Re sayısı
$R_v$	Hız oranı (Kayma -kapsül hızının, kapsül-sıvı karışımının ortalama hızına oranı)
$R_p$	Basınç oranı (kapsüllü akışta oluşan basınç düşüşünün, tek faz sıvı akışı sırasında oluşan basınç düşüşüne oranı)
$s$	Bağlı yoğunluk
$s-1$	Görünür yoğunluk
$S$	Kapsüle etkiyen kesme kuvveti
$t$	Zaman
$\Delta t_1$	Kapsülün iki sensör arasındaki mesafeyi geçme süresi
$\Delta t_2$	Kapsüllerin aynı sensörü ardarda geçişi arasındaki süre
$T$	Sıcaklık
$v$	Hacim
$V$	Hız
$V_e$	Halka içinden geçen akışkanın efektif hızı
$V_h$	Kapsül ve boru yüzeyi arasındaki halka içinden geçen sıvının hızı
$V_k$	Katı faz hızı (superficial)
$V_{kp}$	Kapsül hızı (superficial)
$V_{kp(G)}$	Kapsül gerçek hızı (su ile beraber akışı sırasında ulaştığı hız)
$V_{kr}$	Karışım hızı (katı + sıvı )
$V_{krt}$	Kritik hız
$V_{ort}$	Kapsül-sıvı karışımının ortalama hızı ( $=V_{kp}+V_{ort}$ )
$V_o$	Tane limit çökme hızı (çamur akışları)
$V_s$	Sıvı faz hızı (su hızı)
$Y$	Deneysel sabit (Eşitlik 6.44)
$w$	Motor devri
$\alpha$	Deneysel sabit (Eşitlik 3.20)
$\beta$	Deneysel sabit (Eşitlik 3.20)
$\lambda$	Sürtünme katsayısı (Darcy-Weisbach)
$\mu$	Dinamik viskozite
$\mu_{kr}$	Karışımın dinamik viskozitesi
$\nu$	Kinematik viskozite
$\sigma$	Standart sapma
$\rho$	Taşıyıcı sıvı (su) yoğunluğu
$\rho_{kp}$	Kapsül yoğunluğu
$\rho_{kr}$	Karışım yoğunluğu
$\rho_{tane}$	Tane yoğunluğu
$\phi$	Basınç düşüş katsayısı
$\phi_s$	Sıvı basınç düşüş katsayısı
$\phi_3(k)$	Çap oranı fonksiyonu
$\Psi$	Boyutsuz basınç düşüşü (Eşitlik 3.80)

$\delta_1$	Sıvı halka içindeki tek taraflı boşluk
$\theta$	Boru ekseninin yatayla yaptığı açı
$\tau$	Kesme gerilmesi
$\tau_b$	Boru yüzeyinde meydana gelen kesme gerilmesi
$\tau_{kp}$	Kapsül yüzeyinde meydana gelen kesme gerilmesi
$\tau_{st}$	Kapsül durağan halde iken yüzeyinde meydana gelen kesme gerilmesi
$\gamma$	Özgül ağırlık
$\xi$	Ayrılma kayıp katsayısı
$\varepsilon$	Sünme gerilimi basıncı

#### Alt İndisler

b	boru
din	dinamik
e	efektif
h	halka
hom.	homojen
G	gerçek
k	katı
kp	kapsül
kr	karışım
krt	kritik
m	manometre
ort	ortalama
p	basınç
s	sıvı
st	statik
te	teorik
v	hız
DAG	deneysel ani genişleme kayıp katsayısı
TAG	teorik ani genişleme kayıp katsayısı

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2-1 Çamur akışlarında tanımlanan dört akış örneği .....	4
Şekil 2-2 Akış örneklerine ait tane dağılımları .....	5
Şekil 2-3 Küresel kapsül ( $\rho_{kp} > \rho_s$ ) akış mekanizması (Ellis, 1964b).....	13
Şekil 3-1 Buz-su çamuru akışında değişik hızlarda basınç düşüşleri (Snoek vd.,1983).....	21
Şekil 3-2 Değişik görünür yoğunluğa sahip kapsüller için ortalama hızın hız oranına etkisi (Govier ve Aziz, 1972) .....	25
Şekil 3-3 Dikey bir boruda belirlenen kontrol hacmi ve küresel kapsül (Latto vd., 1973).....	26
Şekil 3-4 Silindirik kapsüle etkiyen kuvvet dağılımları (Garg, 1977) .....	31
Şekil 3-5 Yatay bir boruda eşmerkezli silindirik kapsül treni akışı (Govier ve Aziz, 1972) ...	39
Şekil 3-6 Eşmerkezli silindirik kapsül akışında oluşabilecek bölgeler (Charles, 1963) .....	40
Şekil 3-7 Eşitlik 3.20 ve 3.21'deki $\phi_3(k)$ fonksiyonu (Govier ve Aziz, 1972).....	43
Şekil 4-1 Düşük basınç bölgesi boru konstrüksiyonu .....	50
Şekil 4-2 Birinci ön deney tesisatı.....	51
Şekil 4-3 Birinci ön deney tesisatı boru kesiti.....	54
Şekil 4-4 Ön deneylere göre belirlenmiş düşük basınç bölgesi boru ölçüleri .....	56
Şekil 4-5 İkinci ön deney tesisatı .....	57
Şekil 4-6 İkinci ön deney tesisatı şematik görünüşü .....	58
Şekil 4-7 İkinci ön deneyde düşük basınç bölgesi .....	62
Şekil 4-8 Piyezometre borularında okunan su yükseklikleri (İkinci ön deney-2.Grup).....	63
Şekil 5-1 Deney tesisatına ait ana ölçüler .....	65
Şekil 5-2 Deney tesisatının şematik resmi .....	66
Şekil 5-3 Deney tesisatı .....	67
Şekil 5-4 Vana ve su sayaçlarının depoya bağlantısı .....	68
Şekil 5-5 By-pass hattı .....	70
Şekil 5-6 Pompa ve by-pass hattı .....	71
Şekil 5-7 By-pass hattı, pompa ve basınçlı boru bağlantıları.....	72
Şekil 5-8 Depo, su sayaçları, vanalar ve kollektör bağlantılarının üstten görünüşü .....	74
Şekil 5-9 Pompa basma hattı ve kapsül besleme bölgesi .....	76
Şekil 5-10 Elevatör ve hız kontrol ünitesi .....	77
Şekil 5-11 Ölçüm sistemindeki elektronik devre hattı .....	79
Şekil 5-12 Elevatör motoru sürücüsünün kalibrasyon eğrisi .....	81
Şekil 5-13 Endüstriyel otomasyon kartında bilgi dönüşüm zinciri (Advantech) .....	82
Şekil 5-14 Kalibrasyon şeması .....	84



Şekil 5-15 Transmitterin kalibrasyon eğrisi (mSS-Volt).....	85
Şekil 5-16 Transmitterin kalibrasyon eğrisi (kPa-Volt) .....	86
Şekil 5-17 Su sayacı kalibrasyonuna ait temsili resim.....	87
Şekil 5-18 Kalibrasyon eğrisi (1. Su sayacı).....	89
Şekil 5-19 Kalibrasyon eğrisi (2. Su sayacı).....	91
Şekil 5-20 Hava tahliyesi kontrol vanalarının tesisat üzerindeki yerleşimi .....	92
Şekil 5-21 Yönlendirme paneline monte edilmiş yaylı mekanizma.....	93
Şekil 5-22 Kayış kasnak mekanizması.....	94
Şekil 6-1 Bilgisayara aktarılan sensör sinyallerinin şematik gösterimi .....	100
Şekil 6-2 Zinciri oluşturan kapsüller arasındaki mesafe .....	102
Şekil 6-3 Sürtünme katsayısının Re sayısına bağlı olarak değişimi.....	104
Şekil 6-4 Birim boydaki basınç düşüşünün su hızına bağlı olarak değişimi.....	105
Şekil 6-5 Transmitter ve sensörlerden bilgisayara aktarılan sinyallerin değerlendirilmesi ile bulunan grafik (1) .....	109
Şekil 6-6 Transmitter ve sensörlerden bilgisayara aktarılan sinyallerin değerlendirilmesi ile bulunan grafik (2) .....	110
Şekil 6-7 Kapsül su karışım akışına ait bir fotoğraf ( $N_{st} \approx 7$ adet).....	113
Şekil 6-8 $V_s=0.659\text{m/s}$ ve $C_{din}=\%5$ iken $N_{st}=1.299$ adet kapsül (bknz. Çizelge 6-3b) .....	123
Şekil 6-9 $V_s=0.659\text{m/s}$ ve $C_{din}=\%10$ iken $N_{st}=2.647$ adet kapsül (bknz. Çizelge 6-4b) .....	123
Şekil 6-10 $V_s=0.264\text{m/s}$ ve $C_{din}=\%15$ iken $N_{st}=3.889$ adet kapsül (bknz. Çizelge 6-5b) .....	123
Şekil 6-11 $V_s=0.264\text{m/s}$ ve $C_{din}=\%20$ iken $N_{st}=5.379$ adet kapsül (bknz. Çizelge 6-6b) .....	124
Şekil 6-12 $V_s=0.264\text{m/s}$ ve $C_{din}=\%25$ iken $N_{st}=7.022$ adet kapsül (bknz. Çizelge 6-7b) .....	124
Şekil 6-13 $V_s=0.264\text{m/s}$ ve $C_{din}=\%30$ iken $N_{st}=8.349$ adet kapsül (bknz. Çizelge 6-8b) .....	124
Şekil 6-14 Teorik yaklaşıma göre kuvvet dağılımı .....	129
Şekil 6-15 Deneysel bulgulara ait $(\Delta P/L)_{kr}-V_s$ değişimi.....	133
Şekil 7-1 Gausien hata dağılımı fonksiyon grafiği.....	135
Şekil 7-2 Tek faz su akışında deneysel bulgulara bağlı $\lambda=f(\text{Re})$ değişimi.....	137
Şekil 7-3 Tek faz su akışında deneysel bulgulara bağlı $(\Delta H/L)_s-V_s$ değişimi.....	138
Şekil 8-1 Ortalama hıza bağlı $R_v$ değişimi .....	142
Şekil 8-2 Deneysel bulgulara göre $(\Delta P/L)_{kr}-V_s$ eğrileri ve korelasyon katsayıları.....	143
Şekil 8-3 Basınç oranının ortalama hıza bağlı olarak değişimi.....	144
Şekil 8-4 %5 Katı madde konsantrasyonunda Durand-Condolios çamur akışı modelinin deney bulguları ile karşılaştırılması .....	146
Şekil 8-5 %5 Katı madde konsantrasyonunda Hayden-Stelson çamur akışı modelinin deney	

bulguları ile karşılaştırılması .....	147
Şekil 8-6 %5 Katı madde konsantrasyonunda Newitt çamur akışı modelinin deney bulguları ile karşılaştırılması.....	148
Şekil 8-7 %5 Katı madde konsantrasyonunda Zandi-Govatos çamur akışı modelinin deney bulguları ile karşılaştırılması .....	149
Şekil 8-8 %5 Katı madde konsantrasyonunda Govier-Aziz küresel akış modelinin deneysel bulgular ile karşılaştırılması (%20 Sapma).....	150
Şekil 8-9 %5 Katı madde konsantrasyonunda Agarwal küresel akış modelinin deney bulguları ile karşılaştırılması.....	151
Şekil 9-1 Ortalama hıza bağlı kapsül gerçek hızlarının değişimi.....	153
Şekil 9-2 Ortalama hız ve konsantrasyona bağlı kapsül mesafeleri.....	154
Şekil 9-3 Ortalama hız ve konsantrasyona bağlı basınç oranı değişimi (Deneysel) .....	155
Şekil 9-4 Eşitlik 9.5 ve deneysel bulgular dikkate alınarak bulunan $(\Delta P/L)_{kr} - Re_s$ değişimi.....	157
Şekil 9-5 Eşitlik 9.5 ve deneysel bulgular dikkate alınarak bulunan $R_p - Re_s$ değişimi.....	159

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3-1 Deneysel sonuçlar (Ellis ve Kruyer, 1974).....	36
Çizelge 4-1 Birinci ön deneye ait ölçüm sonuçları .....	55
Çizelge 4-2 İkinci ön deneye ait ölçüm sonuçları (1.Grup) .....	60
Çizelge 4-3 İkinci ön deneye ait ölçüm sonuçları (2.Grup) .....	61
Çizelge 5-1 Deney tesisatında kullanılan boru tipleri ve kullanım bölgeleri.....	73
Çizelge 5-2 Değişik basınç farklarına ait voltaj değerleri.....	84
Çizelge 5-3 Kalibrasyona ait ölçüm değerleri (1. Su sayacı).....	88
Çizelge 5-4 Kalibrasyona ait ölçüm değerleri (2. Su sayacı).....	90
Çizelge 6-1 Dinamik konsantrasyon değerlerine göre Eşitlik 6.7'de kullanılacak sabitler .....	99
Çizelge 6-2 Deneysel bulgu tablosu.....	108
Çizelge 6-3a Değişik hızlar ve %5 kapsül konsantrasyonunda, sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunan sonuçlar .....	115
Çizelge 6-3b Değişik hızlar ve %5 kapsül konsantrasyonunda, sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunan sonuçlar .....	116
Çizelge 6-4a Değişik hızlar ve %10 kapsül konsantrasyonunda, sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunan sonuçlar .....	117
Çizelge 6-4b Değişik hızlar ve %10 kapsül konsantrasyonunda, sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunan sonuçlar .....	118
Çizelge 6-5a Değişik hızlar ve %15 kapsül konsantrasyonunda, sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunan sonuçlar .....	119
Çizelge 6-5b Değişik hızlar ve %15 kapsül konsantrasyonunda, sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunan sonuçlar .....	119
Çizelge 6-6a Değişik hızlar ve %20 kapsül konsantrasyonunda, sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunan sonuçlar .....	120
Çizelge 6-6b Değişik hızlar ve %20 kapsül konsantrasyonunda, sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunan sonuçlar .....	120
Çizelge 6-7a Değişik hızlar ve %25 kapsül konsantrasyonunda, sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunan sonuçlar .....	121
Çizelge 6-7b Değişik hızlar ve %25 kapsül konsantrasyonunda, sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunan sonuçlar .....	121
Çizelge 6-8a Değişik hızlar ve %30 kapsül konsantrasyonunda, sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunan sonuçlar .....	122
Çizelge 6-8b Değişik hızlar ve %30 kapsül konsantrasyonunda, sensör sinyallerinin	

değerlendirilmesi ile bulunan sonuçlar .....	122
Çizelge 6-9 Eşitlik 6.24'e göre hesaplanmış karışım yoğunlukları.....	128
Çizelge 7-1 %5-30 Konsantrasyon aralığında kapsül mesafelerindeki sapmalar .....	135
Çizelge 7-2 İstatiksel analiz sonuçları.....	136
Çizelge 7-3 Ölçülen değerler ve belirsizlikleri.....	139
Çizelge 7-4 Deney sonuçları ile hesaplanmış değerler ve bağıl hata oranları.....	140



## ÖNSÖZ

Dünyada çok yeni sayılabilecek, bölgesel soğutma sistemlerinde buz kullanımı teknolojisinin ülkemizde uygulanabilirliğini sağlamada bir basamak oluşturacak böyle bir çalışmada yer almak öncelikle benim için bir onurdur.

Bu zahmetli deneysel çalışmayı, başta Sayın Hocam Prof. Dr. İsmail TEKE olmak üzere, birçok önemli kuruluş (DİZAYN GRUP A.Ş., STANDART POMPA A.Ş., DUYAR VANA A.Ş., TEKSAN ÖLÇÜ ALETLERİ A.Ş., TETA ELEKTRONİK, ELİMKO ELEKTRONİK LTD.Ş., DEMİRAY SANAYİ DONANIMLARI A.Ş., İSTANBUL BORU SANAYİ LTD.Ş., GENÇLER ELEKTRONİK LTD.Ş., Y.T.Ü. BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ KOORDİNATÖRLÜĞÜ BAŞKANLIĞI) tüm yürekliliğiyle destekledi ve Türkiye’de ilk olma özelliğine sahip, soğutma sistemlerinde buz kullanımına yönelik, kapsül boru hattı prototip deney tesisatının kurulumu gerçekleştirildi.

Çalışmanın başından sonuna dek, derin bilgisini ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Tez Danışmanım Prof.Dr. İsmail TEKE’ye, değerli fikir ve görüşlerini aldığımız Tez İzleme Komitesi Üyeleri Prof.Dr. Haluk KARADOĞAN ve Prof.Dr. Hasan HEPERKAN’a , Dizayn Grup A.Ş. Yönetim Kurulu Başkanı Mak. Yük. Müh. İbrahim MİRMAHMUTOĞULLARI’na, Dizayn Grup A.Ş. Ar-Ge Bölümünden Mak. Yük. Müh. Zafer GEMİCİ’ye, Y.T.Ü. Bilgisayar Mühendisliği Bölümünden Arş. Gör. Cihan TAYŞİ’ye, Arş.Gör. Dr. H. Hüseyin ERDEM, Arş. Gör. Hakan DEMİR, Arş. Gör. Rafet KARADAĞ ve tesisatın kurulum aşamasında yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım, Çağatay KÖKSAL, Bayram SALKIM ve Erkan ULUSAL’a şükranlarımı sunarım.

## ÖZET

Soğutma sistemlerinde buz kullanımı çok yeni ve gelişmekte olan bir teknolojidir. Buz-su karışımı kullanılan sistemlerde buzun gizli ısısından yararlanılır. Böylece aynı kütleli debi ile daha fazla soğutma yapılır veya sabit soğutma yükü için daha az kütleli debi ve daha küçük boru çapları gerekeceğinden soğutma işlemi daha ekonomik olur. Soğutma sistemlerinde buz kullanımına yönelik çalışmaların hepsinde buz-su çamuru kullanılmış olup, akış parametreleri çamur akış özelliklerine göre belirlenmiştir. Bu çalışma ile gerçekleştirilen, soğutma sistemlerinde küresel buz kapsüllerinin kullanımı başlangıç niteliğinde olup, akış parametreleri ise çamur akışından farklıdır.

İlk olarak buz-su karışımının kullanıldığı alanlar, akış tipleri ve özellikleri üzerinde durulmuştur. Buz-su çamuru kullanılan sistemlerde karşılaşılan problemler açıklanarak, soğutma sistemlerinde buz kapsülleri kullanımında sağlanacak yararlı bahsedilmiştir. Kapsüllü akışlarla ilgili yapılmış çalışmaların bir özeti ve değerlendirilmesi sunulmuş, yoğunluğu sudan az olan küresel kapsül trenlerinin akışı ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır. Deney tesisatı kurulmadan önce 2 ön deney gerçekleştirilmiş, bu deneylerde polietilen boncuklar kullanılmıştır (boru ve kapsül çapı çok küçük seçilmiştir). Ön deneylerde yapılan hesaplar ve alınan kararlar doğrultusunda, kapsüllü akışta basınç düşüşü değerlerinin hassas bir şekilde ölçülebildiği, gerçekteki şartlara benzer akış şartlarının sağlandığı bir deney tesisatı kurulmuştur.

Deney tesisatını oluşturan kısımlar, kullanılan ölçüm cihazları ve malzemelerin özellikleri verildikten sonra karşılaşılan güçlükler ve çözüm yöntemleri üzerinde durulmuştur. Deneylerde, gerçeğe uygun olması bakımından buz yoğunluğuna yakın yoğunluğa sahip polipropilen malzemeden ( $870 \text{ kg/m}^3$ ) özel olarak hazırlanmış küresel kapsüller kullanılmıştır.  $d/D$  oranı 0.8 alınarak, değişik akış şartlarında (su hızı, dinamik kapsül konsantrasyonu), yatay borular içinde kapsüllü akışta meydana gelen basınç düşüşleri ölçülmüştür. Tesisat üzerindeki pleksiglas borular sayesinde, kapsül hareketleri gözlenmiş, kapsül hareket mekanizması ve akış rejimleri deney sonuçlarına göre tespit edilmiştir.

Akışa ait parametreler ve hesap yöntemleri belirlenmiştir. Basınç düşüşü ölçüm bölgesine yerleştirilen sensörlerden alınan sinyal değerleri, bilgisayar programı ile değerlendirilmiş, treni oluşturan kapsüllerin gerçek hızları ve kapsüller arası mesafeler hassas bir şekilde bulunmuştur. Basınç düşüşü ölçümlerinde kullanılan fark basınç transmitterinin ürettiği analog sinyal değerleri bir otomasyon programı ile dijital bilgiye çevrilmiştir. Darcy-Weisbach eşitliği temel alınarak, deneysel bulgulara dayalı yeni bir basınç düşüşü ifadesi geliştirilmiştir. Hesaplanan basınç düşüşleri ile deneysel olarak bulunan basınç düşüşleri arasında %3.37'lik sapma bulunmuştur ( $2.5 \times 10^4 < Re < 1.5 \times 10^5$  için). Boyut analizi yapılarak, karışım akışının basınç düşüşlerini belirlemede kullanılabilir analitik bir model oluşturulmuştur. Analitik model ile deneysel bulgular karşılaştırıldığında ortalama %8.6'lık bir sapma tespit edilmiştir.

Deneysel bulguların hata analizi hesabı yapılmıştır. %5-30 arasında değişen dinamik kapsül konsantrasyonlarında, kapsüller arasındaki ortalama mesafenin değişken aralıklarındaki sapma değerleri verilmiştir. Deney sonuçları, hem çamur akışlarına ait modeller hem de küresel kapsül akışlarına ait genel ifadeler ile karşılaştırılmış, mevcut modellerin deneysel bulgular ile uyumsuz (sapma %20'den fazla) olduğu gösterilmiştir. Kapsül akış rejimleri tanımlanarak, akışa özgü değişkenlerin hız ve basınç oranı üzerindeki etkileri belirtilmiş, konu ile ilgili daha sonra yapılabilecek diğer çalışmalara yer verilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Kapsül treni, boru hattı, buz, soğutma sistemleri, basınç düşüşü

## ABSTRACT

The usage of ice in cooling systems is a recent and developing technology. Systems using a mixture of ice and water make use of the latent heat of ice. So, more cooling with less mass flow rate is achieved or the cooling process becomes more economical as the constant load of cooling requires less mass and smaller pipe diameters. In all the studies concerning ice usage in cooling systems, ice-water slurry has been used, and flow parameters have been determined according to the flow characteristics of the slurry. The usage of spherical ice capsules in cooling systems, which we have achieved in this study, is at beginning level, and flow parameters differ from slurry flow.

Initially, we have mentioned the fields utilizing ice-water mixture, flow types and characteristics. Problems noted in systems using ice-water slurry have been described, and benefits of using ice capsules in cooling systems have been mentioned. A summary of studies on flows with capsules has been included. No study regarding the flow of capsule trains with densities less than water has been noted. 2 pre-experiments have been conducted before preparing the experimental setup, and polyethylene beads have been used during these experiments (very small values have been selected for pipe and capsule diameters). In accordance with the calculations and decisions made during the pre-experiments, the experimental setup allows for accurate measurement of pressure drops during flow with capsules, and flow conditions similar to realistic flow conditions. After defining the parts of the experimental setup, measurement devices used and characteristics of materials, noted difficulties and solution methods have been mentioned. During the experiments, specially prepared spherical capsules made of polypropylene material ( $870 \text{ kg/m}^3$ ) with density close to the density of ice have been used for realism.  $d/D$  ratio has been selected as 0.8, and pressure drops in horizontal pipes in flow with capsules have been measured under variable flow conditions (velocity of water, dynamic capsule concentration). Thanks to the plexiglas pipes on the setup, capsule movements have been monitored and movement mechanism of capsules and flow regimes have been determined in accordance with the results of experiments. Parameters and calculation methods related to the flow have been determined. Signal values from sensors placed in pressure drop measurement area have been evaluated with a computer program and actual velocities of capsules forming the train and distances between capsules have been accurately determined. Analogous signal values produced by the differential pressure transmitter used in the measurement of pressure drops have been converted into digital data by an automation program. A new, experiment based statement for pressure drop has been developed based on Darcy-Weisbach equation. An average deviation of 3.37% has been noted between calculated pressure drops and experimental results of pressure drops (for  $2.5 \times 10^4 < Re < 1.5 \times 10^5$ ). An analytic model which can be utilized in determining pressure drops of the mixture flow has been created through dimension analysis. An average deviation of 8.6% has been determined after comparing the analytic model and experimental results.

Error analysis calculation has been made for experimental results. For dynamic capsule concentrations of 5-30%, deviation values in various confidence levels of mean distance have been given. Experiment results have been compared with models regarding slurry flows and general statements regarding spherical capsule flows, and it has been pointed out that available models are incompatible (deviation exceeding 20%) with experimental results. Capsule flow regimes have been defined and their impacts on the velocity and pressure ratios of flow-related variables have been put forth, and related future studies to be conducted have been included.

**Key words:** Capsule train, pipeline, ice, cooling systems, pressure drop

## 1. GİRİŞ

Teknolojideki gelişmeye ve hayat seviyesindeki yükselişe paralel olarak soğutma talebi artmaktadır. Soğutma sistemlerinde ise buzun gizli ısısından yararlanma görüşü son yıllarda büyük önem kazanmıştır.

1gr buz eritmek için 334 J ısı enerjisi gerekir. Bu değer, diğer maddelerin erime gizli ısıları ile karşılaştırıldığında oldukça yüksektir. Soğutmada kullanılan taşıyıcı akışkanın su yerine buz olması halinde debide yaklaşık dokuz kat azalma olmaktadır. Böylece aynı kütleli debi ile daha fazla soğutma, aynı soğutma için ise daha düşük debi ve boru çapı kullanmak gerekir. Küçülen boru çapları ilk yatırım maliyetlerini düşürdüğü gibi, düşük sistem debileri ve azalan ısı kazançları işletme maliyetini azaltır.

Bölgesel soğutma sistemlerinde kapasiteyi arttırmak için geleneksel soğuk su yerine buz-su karışımı kullanımı çok yeni ve gelişmekte olan bir teknolojidir. Soğutma sistemlerine yönelik olarak buz yoğunluğundaki küresel kapsüllerle yapılan bu çalışma bu alanda başlangıç oluşturacaktır.

### 1.1 Buz-Su Karışımının Kullanıldığı ve Kullanılabileceği Alanlar

Katı ve sıvı karışımının boru hattı boyunca taşınması ile ilgili yapılmış olan çalışmaların tarihi 20.yy'ın başlarına dayanır. Oysaki; yoğunluğu taşıyıcı sıvının yoğunluğuna yakın tanelerin oluşturduğu çamurlar ile yapılan çalışmalar son 20 yıldır yapılmaktadır. Buz tanelerinden soğutma sistemlerinde, ısı depolama sistemlerinde ve buz esaslı ısı pompalarında yararlanılması görüşü bu çalışmaların temelini oluşturmaktadır.

Soğuk bölgelerdeki ısı pompalarında suyun buza dönüşümü sırasında açığa çıkan enerji ısı pompaları için potansiyel kaynak olmaktadır.

Buz esaslı ısı pompalarının kullanımında civardaki nehir veya göl suları boru hattı ile taşınarak bir ısı değiştiricide buz taneleri şekline dönüştürülmekte bu sırada ortaya çıkan ısı, ısı pompasına aktarılmakta bu şekilde üretilen ısıdan bölgesel ısıtma sistemlerinde yararlanılmaktadır. Çevrim sonunda oluşan buz taneleri tekrar boru hattı ile nehir veya göle buz-su karışımı olarak nakledilmekte ve çevrim tamamlanmaktadır. Borularla taşınan karışım genellikle buz-su çamuru şeklinde olmaktadır.

Kış aylarında ısıtma amacıyla kullanılan boru hatları, yaz aylarında soğutma amacıyla kullanılabilir.



Su ihtiyacının önemli bir kısmı dağlara yağın karın erimesi sonucu karşılanmaktadır. Su ise boru hatlarıyla kullanım bölgelerine ulaştırılmaktadır. Yağın karın dağlarda depolanıp mevcut boru hatlarıyla bölgelere ulaştırılması halinde hem su hem de soğutma ihtiyacı karşılanmış olacaktır.

Buz-su karışım akışının akış karakteristiklerinin tam olarak bilinmesi ve optimum boru hattı parametrelerinin gerçek boru hattı dizaynından önce saptanması bu teknolojinin uygulanabilirliğini arttıracaktır.

Günümüzde giderek artan enerji açığına çözüm getirecek olan buzun gizli ısısından yararlanma teknikleri araştırmacı bilim adamlarını bu yönde çalışmalara yöneltmiştir.

Boru hattı sistemlerinin dizaynında nakli yapılacak olan karışımın akış davranışını ve akış modelini belirlemek, taşıma hızı ve pompa kapasitesi gibi dizayn parametrelerini sistemdeki basınç düşüşlerine bağlı olarak tespit etmek gerekir.

## 1.2 Araştırmanın Amacı

Su ve küresel buz kapsüllerinin boru hatlarındaki akışına ait akım parametrelerini, akış özelliklerini ve basınç düşüşlerini belirleyici yönde deneysel bir çalışma yapılması amaçlanmıştır. Bu çalışmanın teorik kısmını yoğunluğu taşıyıcı sıvıdan az olan küresel kapsül treni akışlarının davranışı oluşturmuştur.

Deneysel çalışmanın hedefleri, buz yoğunluğuna yakın yoğunluğa sahip ( $870\text{kg/m}^3$ ) polipropilen malzemeden yapılmış küresel kapsüller kullanarak, değişik karışım hızları ve kapsül konsantrasyonları için basınç düşüşlerini belirlemek, küresel kapsül trenine ait akış parametreleri ve her bir parametrenin basınç düşüşü ve hızlar üzerindeki etkileri incelemektir.

## 2. İKİ FAZLI KATI-SIVI KARIŞIMLARININ BORULARDAKİ AKIŞI

Katı maddelerin borular içinde sıvı ile birlikte akışı katıların hidrolik naklinde görülmektedir. Kolay elde edilebilirliği, düşük maliyeti, kimyasal özellikleri bakımından uygunluğu ve çevre kirliliğine yol açmaması nedeniyle taşıyıcı sıvı olarak genelde su kullanılır. Belirtilen özellikleri nedeniyle ısıtmada da enerji taşıyıcı olarak kullanılmaktadır.

Katı-sıvı karışımlarının borulardaki akışı sırasında oluşan olaylar, karışımı oluşturan tanelerin yoğunluğuna, konsantrasyona, boru geometrisine göre farklar göstermektedir.

1950'li yıllardan itibaren katı-sıvı karışımlarının akışına yönelik bir çok araştırma ve çalışma yapılmıştır. Ancak bu araştırmalar yoğunluğu taşıyıcı sıvının yoğunluğundan fazla olan katı taneli iki fazlı akışlardır.

Borulardaki katı-sıvı karışımlarının akışı çamur ve kapsül akışları olarak iki ana gruba ayrılabilir.

### 2.1 Çamur Akışları

Araştırma sonuçlarında çamur akışlarını oluşturan taneler boyutlarına göre sınıflandırılmıştır (Govier ve Aziz, 1972).

- Çok ince taneler ( $0 < 0.001 \text{ cm}$ )
- İnce taneler ( $0.001 - 0.01 \text{ cm}$ )
- Orta boy taneler ( $0.01 - 0.1 \text{ cm}$ )
- Büyük taneler ( $0.1 - 1 \text{ cm}$ )
- Çok büyük taneler ( $1 - 10 \text{ cm}$ )

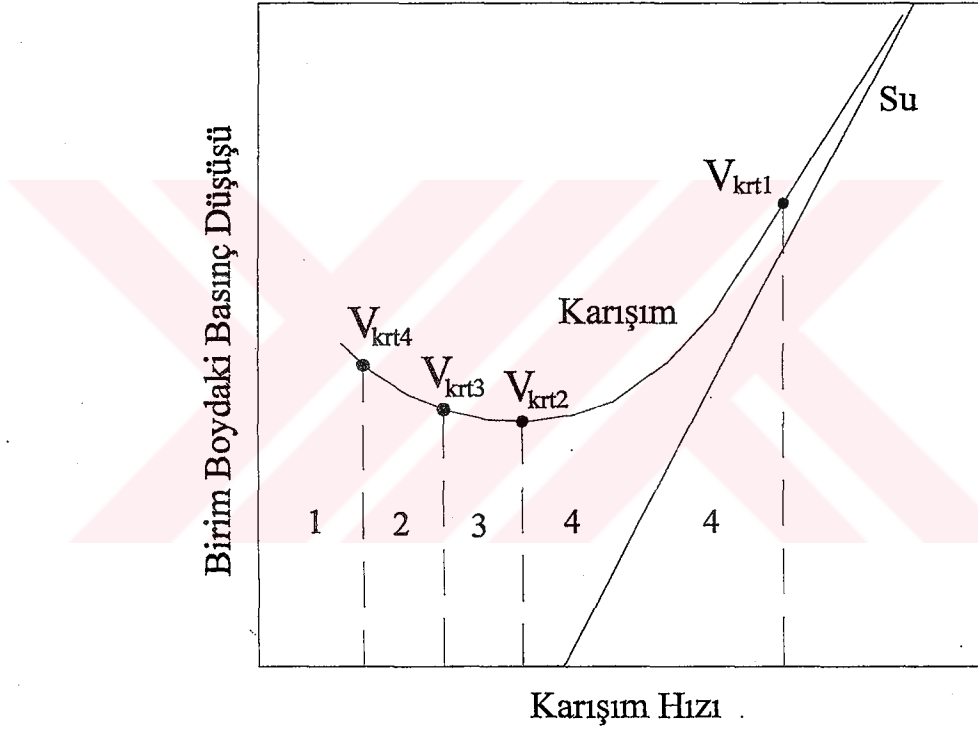
Ancak bu sınıflandırmada boyut dağılımları kesin sınırlar içinde değildir. Çünkü tanelerin davranışları tane yoğunluğundan, tane şeklinden, akışkanın yoğunluğu ve viskozitesinden ayrıca boru çapından önemli ölçüde etkilenir. Çamur akışları çökelen ve çökelmeyen özellikte olmak üzere iki genel sınıfa ayrılmıştır.

#### 2.1.1 Çökelen Karışımlar

Tane yoğunlukları sıvı yoğunluğundan fazla olan büyük tanelerden oluşmuş karışımlardır. 1963 yılında, herhangi bir katı madde konsantrasyonunda, karışım hızının en yüksek ve en

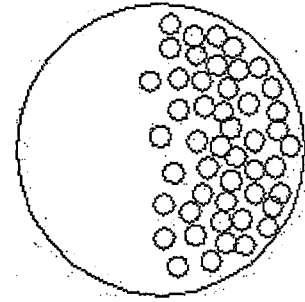
düşük değerleri arasında dört ayrı akış örneği tanımlanmıştır . Akış tiplerinin oluşması için gerekli minimum hızlar vardır. Bu hızlar kritik hız olarak adlandırılmıştır (Şekil 2.1 ve Şekil 2.2).

Tanelerin boru tabanına çökmesini önlemek için akım hızı yeterli derecede büyük seçilmelidir. Taneler yüksek hızlarda boru tabanına çökmeden taşınabilirler. Bu nedenle minimum basınç düşüşünü sağlayacak hızlarda çalışılmalıdır. Sabit tane çapı ve konsantrasyonu için basınç düşüşlerinin, karışım hızına göre değişimi incelenerek kritik hız değeri hesaplanmalıdır.

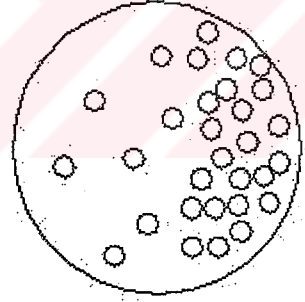


- 1 Sabit yatak akışı
- 2 Hareketli yatak akışı
- 3 Asimetrik süspansiyon akışı
- 4 Simetrik süspansiyon akışı

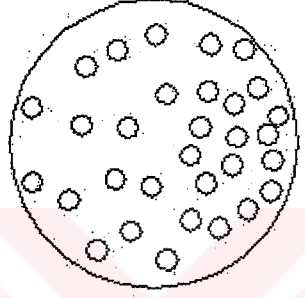
Şekil 2-1 Çamur akışlarında tanımlanan dört akış örneği



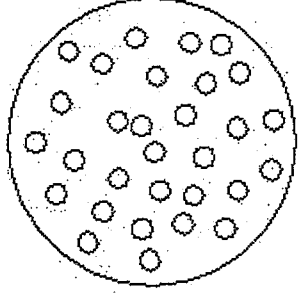
Sabit Yatak  
Akışı



Hareketli Yatak  
Akışı



Asimetrik  
Süspansiyon  
Akışı



Simetrik  
Süspansiyon  
Akışı

Şekil 2-2 Akış örneklerine ait tane dağılımları

- $V_{krt4}$  hızından daha düşük hızlarda katı partiküllerde hareket oluşmaz.
- $V_{krt4} < V_{kr} < V_{krt3}$  hız aralığında boru tabanında sabit yatak akışı meydana gelir.
- $V_{krt3} < V_{kr} < V_{krt2}$  iken karışım içindeki tanelerin bir kısmı süspansiyonun içinde taşınırken bir kısmı boru tabanında kalarak hareket eder.
- $V_{krt2} < V_{kr} < V_{krt1}$  hız aralığı akım karakteristiği açısından en önemli bölgedir.  $V_{krt2}$  hızı karışımındaki katı taneleri asılı duruma geçiren kritik hız değeridir. Kritik hızın üzerine çıktığında, tüm taneler boru içinde homojen olarak akarlar. Pratikte en çok istenen akım rejimidir.

Çeşitli yazarlar tarafından geçiş hızlarının tespitine yönelik deneysel araştırmalar yapılmış olup, farklı konsantrasyonlar, tane yoğunlukları ve şekli, boru çapları için, kritik hız eşitlikleri önermişlerdir. Ancak bu eşitliklerden herhangi biri aynı akım şartlarında kullanıldığında farklı sonuçlar vermektedir. Bu nedenle, bu tip çalışmalar ile genelleştirilmiş bir kritik hız ifadesi oluşturulamaz. En uygun olanı, katı sıvı karışım akışlarında, içinde bulunulan şartlar dahilinde kritik hız hesaplamalarının yapılmasıdır. Basınç düşüşlerini minimum yapan karışım hızı, kritik hız olarak alınmalıdır.

#### 2.1.1.1 Sabit Yatak Akışı

Karışım hızı değeri,  $V_{krt4}$  hızından daha düşük ise yatağın en altındaki taneler tamamıyla durgun hale geçer ve yatak kalınlığı artar. Yatak hareketi yatağın en üstündeki tanelerin birbiri üzerinden yuvarlanması şeklinde oluşur. Eğer karışımı oluşturan tane boyutları çok çeşitli ise en ince taneler yatağın en üstünde asimetric süspansiyon şeklinde ilerler. Her akış örneğindeki hareket şekli değişik olduğundan meydana gelecek basınç düşüşü de farklı olur.

Çamur akışları sırasında meydana gelen basınç düşüşleri aynı hızdaki su akışına göre daima büyüktür. Bunun nedeni katı madde ile boru yüzeyi arasında oluşan sürtünmeye bağlı kayıplar ve türbülanslı yapının sönmelenememesidir .

#### 2.1.1.2 Hareketli Yatak Akışı

Hareketli yatak akışında, yoğunluğu fazla olan taneler borunun tabanında toplanma eğiliminde olur. Hareketli yatağın en üst kısmındaki taneler diğerlerine göre daha hızlı hareket eder. Bu hareket tanelerin kayması ya da yuvarlanması şeklinde olur. Düşük hızlarda ve yüksek konsantrasyonlarda buz-su karışım akışlarında, buz tanelerinin borunun üst cidarında

toplanma eğilimine girmesi hareketli yatak akışına bir örnektir. Bu durumda sürtünmeye bağlı basınç düşüşü arttığı için, uygulamalarda bu rejimde çalışılmak istenmez.

### 2.1.1.3 Asimetrik Süspansiyon Akışı

Akım hızının yüksek değerlerinde ( $V_{kr3} < V_{kr} < V_{kr2}$ ), tanelerin hemen hemen hepsi türbülanslı yapı etkisi ile boru yüzeyinden ayrılmıştır. Ancak kesit içinde homojen dağılıma sahip değildir. Orta değerdeki hızlarda, türbülans şiddeti ve kaldırma kuvvetleri azaldığından tanelerde çökme eğilimi başlar ve boru ekseninin altına doğru kayalar. Yüksek hızlarda ve düşük konsantrasyonlarda çok ince taneler simetrik süspansiyon akış örneği göstermektedir. Orta hızlara inildiğinde, hızın azalması ile birlikte asimetriklik ve basınç düşüşü artmaktadır.

### 2.1.1.4 Simetrik Süspansiyon Akışı

Akış hızının çok yüksek değerlerinde ( $V_{kr1} <$ ) ince ya da orta büyüklükteki katı taneler tamamıyla asılı durumdadır ve üniform olmamasına rağmen yüksek hızlarda borunun yatay eksenini boyunca simetrik olarak dağılmıştır. Boru içindeki konsantrasyon dağılımı hemen hemen homojen hale gelir. Bu akış örneğinde, içinde askı halinde katı taneler taşıyan sıvıya yoğunluğu taşıyıcı sıvıdan fazla olan homojen bir akışkan gözüyle bakılabilir. Bu tip akışkanların yoğunluğu karışım yoğunluğu, viskozite ise karışım viskozitesi olarak ele alınmalıdır. Bazı durumlarda, eğer taneler çok ince ve katı tane konsantrasyonu çok yüksek ise akışkan Newtonian olmaktan uzaklaşır. Simetrik süspansiyon akış örneği çamur akışları içinde basınç düşüşlerinin en az olduğu akış şeklidir. Akım hızı arttırıldığında buz-su çamuru kullanılan sistemlerde oluşan basınç düşüşünün, sadece su akışında oluşan basınç düşüşüne yaklaşmasının sebebi budur.

### 2.1.2 Çökelmeyen Karışımlar

Su içindeki katı taneler çok ince ise boru içinde uzun süre çökmeden kalabilirler. Bu tip karışım akışları homojen bir akışkan olarak ele alınabilir. İnce taneler eğer çok yüksek konsantrasyona sahip ise bu durumda boru içindeki karışım akışı non-Newtonian davranış gösterir. Bu akım şartlarında basınç düşüşlerinin belirlenebilmesi için non-Newtonian akışkan özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Non-Newtonian akışkanların laminar akımda basınç düşüşleri genellikle büyük olur. Fakat akım türbülanslı hale geçince Newtonian akışkanlardaki basınç düşüşlerine göre arada fazla fark görülmez. Bu yüzden non-Newtonian karışımlarda türbülansa geçiş hızının üstündeki hızlarla çalışılmak istenir (Çeçen vd., 1976).

## 2.2 Kapsül Akışları

Kapsüller boru çapından biraz daha küçük çapa sahip küre yada silindir (uçları yuvarlatılmış yada düz) şeklindedirler. Taşınan tane çapının boru çapına oranının ( $d/D$ ) 1'e yaklaşması kapsül akışlarının karakteristik özelliğidir. Metal yada plastik malzemedan yapılmış belli et kalınlığına sahip kapsüller taşınacak katı malzeme ile doldurulmaktadır, ya da katı malzemenin kendisine (sıkıştırılarak) kapsül şekli verilmektedir.

Kapsül boru hattı, boru içinde uzun kapsül treninin akışını içerir. Bu akış, treni oluşturan her kapsülün bireysel davranışı ve birinin diğeri üzerindeki hidrodinamik etkisinin bileşkesidir. Kapsül çapı boru çapının %80-90'ı kadar olacağından, aynı miktarda malzemenin taşınması çok daha küçük hızlarda sağlanabilir, yada aynı hız değerinde daha fazla miktarda katı malzeme taşınması yapılabilir. Araştırmalara göre, kapsülün hareketi sıvı akımının türbülanslı yapısını sönmülendirmektedir. Bu nedenle kapsül-sıvı akış sistemindeki kayıplar aynı hızdaki su akışına oranla daha az olabilmektedir. Katı malzemelerin kapsül şeklinde olması, çamur şeklinde akışa göre bir çok avantajı da beraberinde getirir.

## 2.3 Küresel Kapsül Kullanımının Sebepleri

Silindirik kapsüllerin kapsül ucunda çok yüksek akış hızı değerlerinde yukarı kalkma eğilimi görülmüştür. Ellis (1976), kapsül burnunu yukarıya kaldıran kuvvetin, kapsülün ön alt ucundan yukarıya doğru oluşan vorteks olduğunu bulmuştur (Feng, 1995). Bu kaldırma kuvveti, yağlama teorisi ile bir analogi oluşturularak açıklanabilir. Başka bir deyişle; kapsül, boru ile kapsül arasında sıkışan akışkan üzerinde sürüklenir, bunu taşıyıcı sıvının yağlama etkisi sağlar. Yağlama mekanizması aralarında büyük boşluk bulunan kapsül-boru hattında veya boru cidarı ile kapsül tabanı arasında kalan eğim açısının büyük olduğu durumlarda uygulanmaz.

Silindirik kapsüllerin boru tabanı ile olan temas yüzeyi küresel kapsüllere göre daha fazladır. Sürtünmeye bağlı kayıplar daha fazla olacağından, kapsülün ivmelenme hızı büyür, kapsül yoğunluğunun artması ile birlikte basınç düşüşleri de artar. Küresel kapsüllerin ivmelenme hızı düşüktür ve küreye etkileyen basınç kuvvetleri, kayma gerilmeleri, kaldırma kuvveti akım hızının artması sonucunda hızla denge konumuna erişir. Küresel kapsülün boru eksenine merkezlenmesi daha çabuk olmaktadır. Ayrıca, boru hatlarının değişen geometrilerine uyum ve boru ekleme elemanlarında rahat geçiş için küresel kapsül kullanımı tercih edilmelidir. Küresel kapsüllerin geometrisi nedeniyle, silindirik kapsüller ile taşınan malzeme miktarının

2/3'nün sağlandığı fakat akım sırasında silindirik kapsüllere göre daha hızlı hareket etmeleri sonucunda bu durumun telafi edildiği gözlenmiştir. Küresel kapsüllerde düşük hızlarda meydana gelen basınç düşüşü silindirik kapsüllerde meydana gelen basınç düşüşünden daha azdır.

Bu nedenle bölgesel soğutma sistemlerinde buz kullanımına yönelik bu çalışmada küresel buz kapsülleri-su karışımının sürekli akışı incelenecektir.

#### 2.4 Kapsül Akışlarını Çamur Akışlarından Ayıran Özellikler

- 1) Katı malzemenin sıvı ile homojen bir karışım oluşturabilmesi için tanelendirilmesine gerek yoktur.
- 2) Akış sonrasında katının kurutulması ya da ayrıştırılması işlemine ihtiyaç yoktur.
- 3) Zararlı atıklar ve kimyasal maddeler için en uygun yöntemdir.
- 4) Akış süresince taşıyıcı sıvının ve katı malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri korunur.
- 5) Kapsül boru hattı çamur boru hattına göre çok daha ekonomiktir.
  - Kapsüllerin akış sırasında ulaştığı hız, karışım ortalama hızından büyüktür. Dolayısıyla katı fazın kütleli debisi yüksektir ve birim katının taşınması için daha az güç gerekir.
  - Uygun akış hızları seçildiğinde, kapsül karışım ortalama hızından daha hızlı hareket edecektir. Bu şekilde kapsül ile boru cidarı arasındaki sürtünmenin önüne geçilmiş olur. Kapsülün aşınması önlenir ve basınç düşüşleri çamur akışlarına oranla daha az olur.
  - Kapsül akışında, çamur akışında oluşan türbülanslı yapı görülmez. Bu nedenle basınç düşüşleri çamur akışında meydana gelen basınç düşüşlerinden oldukça azdır. Hatta bu değer, boru hattında sadece su akışı varken oluşan basınç düşüşü değerinin altında bile olabilir.
- 6) Kapsül akışlarında karışım taneli yapıya sahip olmadığı için, tanelerin dağılması ya da çökme eğilime girmesi nedeniyle oluşan boru hattı tıkanma problemleri ile karşılaşmaz. Kapsüller özellikle küresel olarak seçildiğinde dirsek gibi bağlantı elemanlarından geçişi rahat olur.
- 7) Çamur akışlarında akım hızı kritik hız değerinin altına düşürülmemelidir. Akım hızı kritik hızın altına düştüğünde sistemde ani tıkanmalar ve aşırı basınç düşüşleri meydana gelir.



Kapsül akışlarında ise kritik hız sınırlaması yoktur. Minimum akım hızlarında dahi taşıma işlemi problemsiz olarak sürer.

- 8) Çamur akışında karışımın sisteme pompalanması gerekmektedir. Bu işlem için özel pompalara ihtiyaç duyulur. Oysa kapsül akış sistemlerinde basit besleme mekanizmaları katı malzemelerin sisteme verilmesi işlemi için yeterlidir.
- 9) Çamur akışları sırasında boru hattı içinde her zaman arzu edilen konsantrasyon seviyelerine ulaşamaz. Çünkü taneler akım şartlarından çabuk etkilenecek dağılma ya da çökme (çoğunlukla boru ekleme elemanlarında) eğilimine girerler. Oysa, sürekli kapsül akışının olduğu sistemlerde kapsül hızı ayarlanarak konsantrasyon kontrol altında tutulabilir.

Soğutma sistemlerinde küresel buz kapsüllerinin kullanılması durumunda ise yukarıda sağlanan avantajların yanında:

- Buz kapsülleri büyük boyutlarda olduğundan daha uzun bir süre sistem içinde erimeden kalabilecektir. Kapsüllerin plastik kılıf içinde olması halinde erime daha da azalacaktır.
- Akım sırasında buz konsantrasyonu ve buz kapsüllerinin ulaştığı hız değeri buz-su çamuru akışında ulaşılan konsantrasyon ve karışım hızı değerlerinin çok üstündedir. Dolayısıyla bölgesel soğutma sisteminin kapasitesi artacaktır.
- Isıtma amaçlı kullanılan boru hatları yaz aylarında soğutma için kullanıldığında, yeni yatırıma gerek kalmayacaktır. Su taşıma amaçlı boru hatları buz-su karışım akışları için kullanılabilir.
- Buz kapsülü akışında tek bir kütle hareketi olduğundan buz-su çamuru akışlarında oluşan tane dağılımlarına bağlı tıkanma problemleri görülmeyecektir.
- Kapsüllerin küre halinde olmasıyla boru ek parçalarında tıkanma olmadığı gibi yerel kayıplar da en düşük seviyede kalacaktır.

Yukarıdaki akış avantajlarının tümünün sağlanabilmesi için kapsül taşıyıcı sıvı sistemine ait özelliklerin tam olarak bilinmesi gerekmektedir. Boru ve kapsül yüzeyinin pürüzlülüğü, kapsül ve taşıyıcı sıvının yoğunluğu, kapsüller silindirik olarak seçilmişse uç şekli, kapsül-boru çap oranı, silindirik kapsülde kapsül uzunluğunun boru çapına oranı ve kapsülün boru içinde yerleşme pozisyonu (boru eksenini ile aynı ekseninde-eşmerkezli yada boru eksenini ile açılı durumda-dışmerkezli) basınç düşüşünü ve hız oranını ( $V_{kp(G)}/V_{ort}$ ) büyük ölçüde etkileyen

özelliklerdir. Başlangıçta boru tabanında hareketsiz duran kapsülün hızı, taşıyıcı sıvı hızının artması ile birlikte yavaş yavaş artar. Kapsül hareketsiz iken taşıyıcı sıvının akış yönüne ters bir kuvvet oluşturur, bu sırada kapsül ile boru cidarı arasındaki boşluktan geçmek zorunda kalan akışkanın hızı artar. Bu şartlar altında, boru hattının kapsüllü kısmındaki basınç düşüşü, kapsülün sıvı akımı ile birlikte hareket ettiği durumda oluşan basınç düşüşünden büyüktür. Bu aşamada kapsül, iki ucundaki basınç kuvvetleri ve sıvı akımının oluşturduğu kayma kuvvetleri etkisi altındadır. Bu kuvvetlerin bileşkesi kapsül ile boru cidarı arasındaki statik sürtünme kuvvetini aşınca kapsül hareket etmeye başlar. Sıvı akımının, kapsülü harekete geçirmeye yeterli olduğu andaki hız sınır hızı olarak isimlendirilir. Dinamik sürtünme katsayısı statik sürtünme katsayısından daha küçük olduğundan kapsülün hızı giderek artar ve bu artış kapsül üzerine etkiyen kuvvetlerin dengesi kurulana dek sürer. Sıvı hızı ile kapsül hızı arasındaki fark azaldığı için kapsül yüzeyine etkiyen kesme kuvvetleri küçülür. Gerçekte kapsül hızı sıvı hızını aştığında kapsül yüzeyini çevreleyen sıvı tabakası bu sefer akışa ters yönde bir kuvvet oluşturur. Bu noktadan sonra kapsül hızı sabit kalır (Govier ve Aziz, 1972).

Kaldırma kuvveti ve taşıyıcı sıvının hidrodinamik yağlama etkisi nedeniyle kapsül ile boru cidarı arasında kalan sıvı, kapsülün boru eksenini boyunca kaymasını (kapsülün akması hali) sağlayacaktır. Kapsüllerin boru ile aynı eksen üzerinde eşmerkezli ve sabit hızla hareketi en az basınç düşüşlerinin olduğu akış şartıdır. Bu şartın oluşması için kapsül üzerine etkiyen kuvvetlerin birbirini dengelemesi gerekmektedir (kararlı akış).

## 2.5 Küresel Kapsül Akış Mekanizması

Akış halindeki sıvı ile dolu bir boru içinde serbest halde duran küresel kapsüle etkiyen kuvvetler (boru yatay ya da düşey, taşıyıcı sıvı ve kapsül herhangi bir yoğunlukta olabilir):

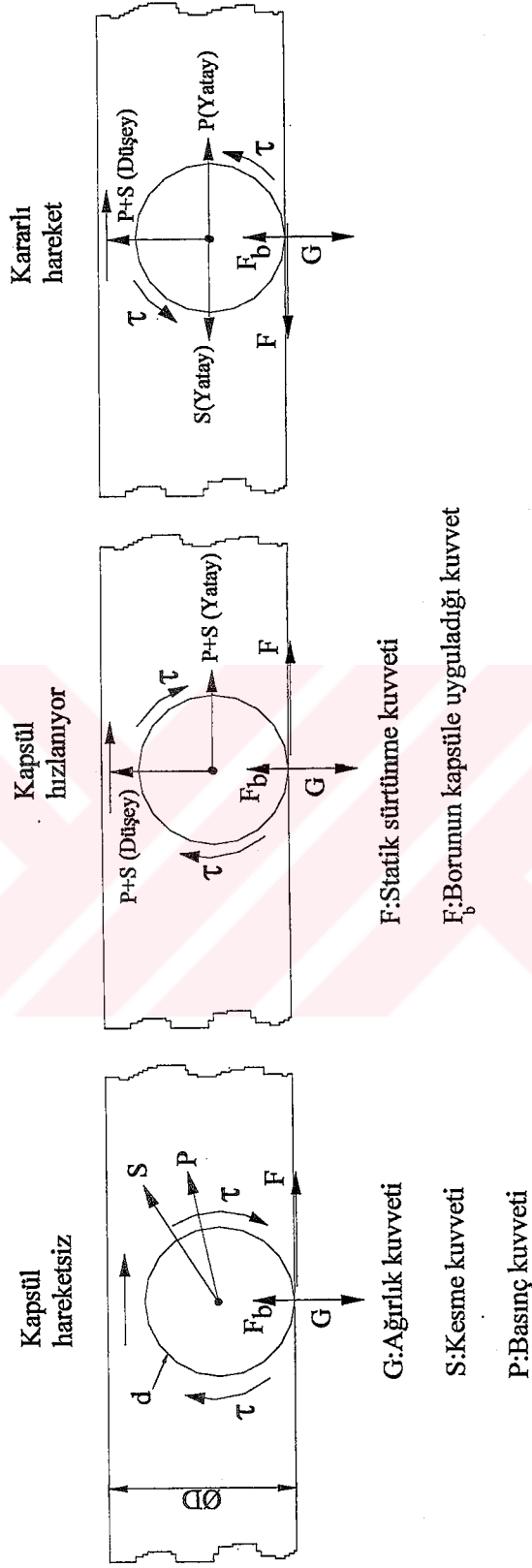
- 1) Kapsül yüzeyine her noktada dikey olarak etkiyen basınç kuvvetleri,
- 2) Sıvı tarafından kapsülün her noktasına teğetsel olarak etkiyen kesme kuvvetleri,
- 3) Düşey doğrultuda kapsülün ağırlık kuvveti,
- 4) Kapsülün hareketi sırasında yüzeyler arasındaki sürtünmeden dolayı oluşan, boru cidarına bağlı kuvvetlerdir (tepki kuvveti).

Kapsülün varlığı nedeniyle oluşan girdaplar bu kuvvetlerin etkisini sıvıda hız ve basınç değişimleri olarak gösterir. Kapsül üzerine etkiyen bu kuvvetler boruya paralel ve dik bileşenlere ayrılarak, dönme momentleri de ilave edilerek çözülebilir (Ellis, 1964b).

Küre merkezi etrafında oluşan tüm dönme momentleri kesme kuvvetlerinin (S) etkisi ve momentum değişiminden oluşmaktadır. Sıvı basınç kuvvetlerinin tümü radyaldır ve bu kuvvetlerin bileşkesi (P) kürenin merkezinden geçmektedir (Şekil 2.3). Statik sürtünme kuvveti (F), boru pürüzlülüğünün oluşturduğu sıvı akışına ters yönde olan bir kuvvettir. Borunun kapsüle uyguladığı kuvvet (tepki kuvveti,  $F_b$ ) ise statik sürtünme katsayısı ile çarpılarak bulunmuştur.  $F_b$  kuvveti kürenin merkezi etrafında dönme momenti oluşturur. Bu moment, küre harekete başlamadan önce, kesme çiftinin oluşturduğu momente eşit fakat ters yönlüdür (Ellis, 1964b).

Eğer boru yatay ve kapsül sıvıdan daha yoğun ise, kapsülün ağırlığı nedeniyle basınç ve kesme kuvvetlerinin dik bileşenleri boru tabanında oluşan kuvveti azaltacaktır ve kuvvetlerin bileşkesi sürtünme katsayısı ile çarpıldığında sürtünme kuvveti sağlanacaktır. Başlangıçta kapsül hareketsiz iken sürtünme kuvveti kapsülün hareketini engelleyecek güçtedir. Küresel kapsül düşük hızla hareket eden sıvının etkisine girince, sıvının oluşturduğu kesme kuvveti kürenin her noktasına teğetsel olarak etkir. Küre boru tabanı ile temas halinde olmasına rağmen boru yüzeyi ile arasında iki yüzeyin toplam pürüzlülüğünden daha ince bir sıvı filmi bulunmaktadır. Boru ve kapsül yüzeyleri arasında oluşan maksimum sürtünme kürenin yuvarlanmasını engellemeye yetmez. Kürenin boru tabanı ile temas halinde olan her noktası bir dönme momenti oluşturur ve küresel kapsül boru tabanında dönerek ilerler. Bu sırada oluşan sürtünme kuvveti kayma hareketini engellemektedir. Bu hareket hafif kapsüllerde boru üst cidarında oluşacaktır. Kapsül hız kazandıkça basınç kuvvetleri nedeniyle bir itme oluşur. Bu itme kesme kuvvetine ters yöndedir.

Kapsül boru cidarında yuvarlanırken oluşan hız oranı ( $R_v$ ) sıvı hızının artması ile birlikte artar. Bu artış sıvıdan daha yoğun silindirlere görülen hız artışından daha büyüktür (Ellis, 1964a). Çünkü küresel kapsüller daha küçük sürtünme kuvvetine sahiptirler. Düşük kapsül hızlarında büyük çaplı küresel kapsüllere etkiyen kesme ve basınç kuvvetleri de büyüktür. Kayma olsun ya da olmasın eğer kapsül dönmeye devam ederse etrafındaki sıvı akışı nedeniyle oluşan sirkülasyon sonucu (Magnus Etkisi) küreye etkiyen özel bir kaldırma kuvveti oluşur. Bunun sonucu olarak kürenin boru tabanındaki basıncı azalır, sürtünme kuvveti düşer ve kürenin boru içinde kayma eğilimi artar. Bu sayede kapsülün boru içinde eşmerkezli pozisyona geçme süresi kısalır. Yoğunluğu taşıyıcı sıvıdan daha düşük kapsüllerde Magnus Etkisi kapsülün boru üst cidarından ayrılmasını sağlar. Akışkanın sürtünmeyi azaltıcı yöndeki yağlama etkisi bu noktadan sonra önem kazanır.



Şekil 2-3 Küresel kapsül ( $\rho_{kf} > \rho_s$ ) akış mekanizması (Ellis, 1964b)

Küre boru yüzeyinden ayrılarak yükselir, yüzeyler arası temas olmaksızın küre sıvı filmi üzerinde döner ve kayar hatta bazen boru hattı boyunca eksene doğru sıçrar. Sıvı artışı ile birlikte kapsül hızı da artar ve kapsül sıvı tabakası üstünde taşınmaya başladıktan sonra yatay yöndeki kesme ve basınç kuvvetleri azalır. Yuvarlanma hareketi küre eşmerkezli pozisyona geçene kadar devam eder. Yoğunluğu taşıyıcı sıvıdan daha az olan kapsüllerde ise küre boru üst yüzeyinden ayrılarak eşmerkezli duruma geçecektir. Eşmerkezli durumda ise basınç ve kesme kuvvetleri denge konumundadır, bu andan itibaren kapsül sabit bir hızla yoluna devam eder. Kürenin taşıyıcı sıvının hidrodinamik yağlama etkisi ile kaymaya (akmaya) başladığı sıvı hızı, küre ve boru hattı arasındaki sürtünme katsayısına, kürenin yoğunluğuna ve çap oranına bağlıdır (Ellis, 1964b).



### 3. KATI-SIVI KARIŞIM AKIŞLARI İLE İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Boru hatlarında katı-sıvı karışımı akış rejimi ve akış parametrelerinin tespitine yönelik teorik ve deneysel çalışmalar çamur ve kapsül akışları olarak gruplandırılabilir.

#### 3.1 Çamur Akışları

Yapılmış çalışmalar, çamurları oluşturan tanelerin yoğunluğuna göre ikiye ayrılmıştır:

- Tane yoğunluğu sudan fazla olan çamurlar
- Tane yoğunluğu suya yakın yada sudan daha az olan çamurlar

##### 3.1.1 Tane Yoğunluğu Sudan Fazla Olan Çamur Akışlarına Ait Çalışmalar

Bu gruba giren çamur akışları seçilen akım hızına bağlı olarak dört değişik akış rejimi göstermekteydi (bkz. Bölüm 2). Çamur akışlarında, en az basınç düşüşünün olduğu akış rejimi Asimetrik Süspansiyon ve Simetrik Süspansiyon akışlarıdır. Araştırmalar bu iki tip akış rejimi üzerinde yoğunlaşmıştır.

$V_{kr2} < V_{kr} < V_{kr1}$  hız aralığı akım karakteristiği açısından önemli bir bölge olduğundan, asimetrik süspansiyon akışlarında uygulanabilir olan bazı boyutsuz basınç düşüşü ifadelerine kısaca değinilecektir.

Boyutsuz basınç düşüşü ifadesi, bazı yazarlar tarafından basınç düşüş katsayısı ( $\phi$ ) olarak adlandırılmıştır.

Durand ve Condolios asimetrik süspansiyon akışları için, boru tabanında yatak oluşması kabulünü yaparak aşağıdaki eşitliği önermişlerdir.

$$\phi = \frac{i_{kr} - i_s}{C i_s} = 81 \left[ \frac{gD(s-1)}{V_{kr}^2} \frac{1}{\sqrt{C_D}} \right]^{1.5} \quad (3.1)$$

Eşitlik 3.1'deki  $C_D$  küresel katı tanenin sürüklenme katsayısı olup tanenin Re sayısına bağlıdır. Hesaplamalarda  $1000 \leq Re \leq 200000$  için  $C_D = 0.444$  olarak alınmıştır.

Hayden ve Stelson, Durand ve Condolios'un önermiş olduğu ifade üzerinde yaptıkları çalışmalar neticesinde yeni bir eşitlik geliştirmişlerdir.

$$\phi = \frac{i_{kr} - i_s}{Ci_s} = 100 \left[ \frac{gD(s-1)}{V_{kr}^2} \frac{V_o}{\sqrt{gd(s-1)}} \right]^{1.3} \quad (3.2)$$

Küresel katı taneye etkiyen kaldırma kuvveti ile sürüklenme kuvvetinin toplamı yerçekimi kuvveti ile dengelendiğinde, taneler sabit bir hıza erişirler. Bu hıza limit çökme hızı denir. Eşitlik 3.2'deki  $V_o$  tanenin çökme hızını göstermektedir. Tane çökme hızı hesaplanırken aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır (Govier ve Aziz, 1972).

$$V_o = \sqrt{\frac{4}{3} g \frac{d}{C_D} (s-1)} \quad (3.3)$$

Asimetrik süspansiyon akışlarında uygulanabilecek bir başka boyutsuz basınç düşüşü ifadesi Zandi ve Govatos'undur. Karışım hızı değerinin, süspansiyonun kritik karışım hızı değerinden büyük olması şartı ile bir basınç düşüşü indeksi ( $N_I$ ) ve ona bağlı eşitlikleri oluşturmuşlardır.

$$N_I = \frac{V_{kr}^2 \sqrt{C_D}}{CDg(s-1)} < 40 \quad (3.4)$$

$$CN_I \geq 10 \quad \frac{i_{kr} - i_s}{Ci_s} = 6.3(CN_I)^{-0.354} \quad (3.5)$$

$$CN_I \leq 10 \quad \frac{i_{kr} - i_s}{Ci_s} = 280(CN_I)^{-1.93} \quad (3.6)$$

Newitt vd., 25mm çapındaki boruda kömür ve kum taneleri ile yaptıkları deneyler sonucunda süspansiyon içinde  $V_o$  hızı ile çökelmekte olan bir tanenin yaptığı işin tanenin etkin ağırlığına ve limit çökme hızına bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu yaklaşıma göre boyutsuz basınç düşüşü ifadesi aşağıdaki şekli almıştır.

$$\phi = \frac{i_{kr} - i_s}{Ci_s} = 1100 \frac{gDV_o}{V_{kr}^3} (s-1) \quad (3.7)$$

Gaessler 1967 yılında hem simetrik hem de asimetrik süspansiyon akışları için kullanılabilen ve ilk olarak katı tanenin sürtünme katsayısını içeren boyutsuz basınç düşüşü ifadesi geliştirmiştir. Bu eşitliğin en genel hali aşağıdaki gibidir.

$$\frac{i_{kr} - i_s}{i_s} = \frac{f_{tan e}}{f_s} C(s-1) \quad (3.8)$$

Katı tanenin sürtünme katsayısının tespiti için,değişik konsantrasyonlarda  $f_{\text{tane}}$  değeri ile Froude sayısı arasındaki bağıntıyı sağlayacak grafikler oluşturulmuştur (bknz. Govier ve Aziz,1972). Gaessler'in önermesindeki Froude sayısı karışıma ait olup;

$$Fr_{kr} = \frac{V_{kr}}{\sqrt{gD}} \quad (3.9)$$

şeklinde ifade edilmiştir.  $f_{\text{tane}}$  değerinin hesaplanabilmesi için, akıma özgü değişkenlerden  $Fr_o$  ve  $\rho_{kr}$  değerlerinin bilinmesi gereklidir. Bu değişkenler aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$Fr_o = \frac{V_o}{\sqrt{gD}} \quad (3.10)$$

$$\rho_{kr} = C(\rho_{\text{tane}} - \rho) + \rho \quad (3.11)$$

Akışkana ait sürtünme katsayısı ise Moody diyagramından bulunmuştur.

Newit (1962), simetrik süspansiyon akış örneğinde, katı-sıvı süspansiyonları için basınç düşüş katsayısını aşağıdaki şekli ile önermiştir (Govier ve Aziz, 1972).

$$\phi = \frac{i_{kr} - i_s}{C.i_s} = K(s-1) \quad (3.12)$$

K değeri tanenin özelliğine bağlı olarak değişen deneysel bir sabittir (K=0.6-1.0).

Karışımın birim boydaki basınç düşüşü için aşağıdaki ifade geçerlidir.

$$i_{kr} = i_k + i_s \quad (3.13)$$

Shook ve Daniel'in analizinde simetrik süspansiyon akış örneğinde karışım Newtonian akışkan olarak düşünerek sürtünme katsayısını aşağıdaki gibi tanımlamıştır (Govier ve Aziz, 1972).

$$f = \left( \frac{\Delta P}{L} \right)_{kr} \cdot \frac{D}{2 \cdot \rho_{kr} \cdot V_{kr}^2} \quad (3.14)$$

Karışımın yoğunluğu aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\rho_{kr} = (1 + (s-1)C)\rho \quad (3.15)$$

Yine karışım hızına bağlı Re sayısı;



$$Re = \frac{V_{kr} \cdot D \cdot \rho_{kr}}{\mu_{kr}}, \quad (3.16)$$

Karışımın viskozitesi ise;

$$\mu_{kr} = \mu (1 + 2.5C + 14.1C^2) \quad (3.17)$$

olarak yazılabilir.

Toda ve Newitt (1962), yatay bir boru içinde tanelerin tamamı asılı halde taşındığında (simetrik süspansiyon akış örneği) katı fazın hızı ile sıvı fazın hızı arasındaki ilişkiyi bir katsayı ile tanımlamışlardır.  $C_0$  deneysel sabit olmak üzere,

$$V_k = C_0 \cdot V_{kr} \quad (3.18)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Dikey boru içinde  $C_0$  değeri 1'e yaklaşır. Yüksek hızlara çıkıldığında konsantrasyon profili boru ekseninde bir pik noktasından geçer ve  $C_0$  değeri 1.2 değerine yaklaşır ya da daha yüksek bir değer alır (Govier ve Aziz, 1972).

### 3.1.2 Tane Yoğunluğu Suyu Yakın yada Daha Az Olan Çamurlara Ait Çalışmalar

Düşük yoğunluklu tanelerin oluşturduğu çamurlar ile yapılmış çalışmalara 1980'li yıllarda başlanılmıştır. Bu tip çamurlar (ortalama tane büyüklüğü 0.165-12mm arasında değişmektedir) boru içindeki akışta çökelen çamurlara kıyasla farklı davranış gösterirler, çünkü taneler taşıyıcı akışkanın türbülanslı yapısından önemli ölçüde etkilenirler.

Buzun suya faz dönüşümünü esas alan ısı pompaları ve buz kullanılan bölgesel soğutma sistemleri büyük miktarlarda buz kullanımı gerektirir. Bu kullanım, buz-su karışımının akışı ile ilgili birçok problemi de beraberinde getirir. Bu nedenle yapılacak olan deneysel veya teorik çalışmalar bu teknolojilerin gelişimi için oldukça önemlidir (Anderson, 1997).

Çalışmalar polisitiren-su çamuru, buz veya kar-su çamuru akışları ile ilgili olmak üzere iki grupta toplanabilir.

#### 3.1.2.1 Polisitiren-Su Çamuru Kullanılarak Yapılmış Çalışmalar

Shook (1985), yoğunluğu taşıyıcı akışkanın yoğunluğuna yakın tanelerin oluşturduğu çamurlar ile deneysel araştırma yapanların arasında ilktir. Yaptığı çalışmaların sonuçları buz esaslı soğutma sistemlerinin temelini oluşturmuştur.

Sudaki polisitiren tanelerini yüksek yoğunlukta kullanarak tane hareketlerini gözlemiş, basınç düşüşü, akış viskozitesi ve tane hız profillerini ölçmüştür. Kullanılan polisitiren tanelerin bağıl yoğunluğu ( $s$ =katı tane yoğunluğu/su yoğunluğu) boru içinde temas yükü oluşumunu engellemek için 1.05 olup, 0.3mm ve 1.4mm tane boyutlarında araştırma yapmıştır. Deneylerde kullanılan borunun iç çapı 52.23 mm ve basınç düşüşü ölçüm bölgesinin uzunluğu 2.9m olmuştur.

Takahashi vd., (1991) yoğunluğu suya yakın olan büyük taneli çamurlar için tane hız profilleri ve basınç düşüşlerini teorik ve deneysel olarak araştırmıştır. Tane çapları; 3.21mm ve 3.09mm tane yoğunlukları ise 0.86 ve 1.04 olan iki tip polisitiren tane kullanılmıştır. Test bölgesinde kullanılan pleksiglas borunun iç çapı 50mm, uzunluğu 12m olmuştur. 1.25m/s'den düşük hızlarda asılı tanelerin borunun üst yüzeyinde toplandığı, 1.25m/s'den büyük hızlarda ise tanelerin boruda üniform olarak dağıldığı gözlenmiştir.

Kawashima vd., 13m uzunluğunda ve iç çapları 39.7 ve 49.7mm olan borularda kar-su karışım akışında oluşacak basınç düşüşlerini araştırmıştır. Boru hattı boyunca kar-su karışımı akışının benzerini oluşturmak için deneylerde 3.21-3.22-3.09mm çaplarında ve yoğunlukları 0.87-0.96-1.04 olan üç değişik tipte polisitiren tane kullanılmıştır. Yatay boruda düşük akış hızlarında basınç düşüşündeki artışa rağmen, yüksek hızlardaki basınç düşüşlerinin, türbülanslı rejimde sadece su akışında meydana gelen basınç düşüşü değerine yaklaştığı tespit edilmiştir (Anderson, 1987).

### 3.1.2.2 Buz-Su veya Kar-Su Çamuru Kullanılarak Yapılmış Çalışmalar

Cheng ve Chang (2003), soğuk depolama sistemlerine yönelik deneysel bir çalışma yapmıştır. Dışarıdan soğutulan silindirik bir kapsül içindeki suyun donma prosesi dört aşamada incelenmiş, kapsül içinde oluşan buz katmanının şekil profili ve kalınlığı araştırılmıştır.

Sellgren (1986), buz esaslı ısı pompalarında buz kullanımına yönelik deneysel bir çalışma yapmıştır. Toplam uzunluğu 25m ve iç çapı 105mm olan bir boru hattında buz-su çamuru akışının özellikleri araştırılmıştır. Buz tanelerinin çapı 12mm ve buz konsantrasyonu 0.13-0.15 olarak alınmıştır. Çalışma yapılan en düşük hız 0.7m/s olmuştur. Akım hızı 1-1.5m/s değerinde iken meydana gelen basınç düşüşününün temiz su ile oluşan basınç düşüşünden %50 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni düşük akış hızlarında tanelerin borunun üst kısmında toplanması ve boru yüzeyi ile temas eden alanının artmasıdır. Yüksek akış hızlarında çamur akışında oluşan basınç düşüşü temiz su akışında oluşan basınç düşüşüne

yaklaşmıştır.

Knodel ve France, bölgesel soğutma sistemlerinde buz uygulamasıyla buz-su çamur akışlarının basınç düşüşü özelliklerini deneysel olarak araştırmıştır. Deneysel olarak iç çapları 102.3mm ve 52.5mm olan iki tip pleksiglas boru kullanılmıştır. Sistemde kullanılan buz tanelerinin şekli rastgele belirlenmiştir ve çapları yaklaşık 5mm alınmıştır. Bu çalışmalarda ulaşılan en yüksek buz konsantrasyonu 0.16 olmuştur. Ölçümler çeşitli Re sayılarında yapılmıştır. Basınç düşüşünü azaltmak için buz konsantrasyonunu artırma işleminin gerekli olduğunu tespit etmişlerdir. Gözlenebilir test kısmındaki akışta sürtünmeyi azaltmanın tıkaç tipi bir akış (plug flow) geliştirmekle ilgili olduğunu göstermişlerdir. Buz konsantrasyonunun 0.08 ve 0.12'nin üzerine çıktığı durumlarda ve yüksek akış hızlarında buz tanelerinin daha sınırlı hareket ettiği, ve kümeleşme eğilimine girdikleri gözlenmiştir (Anderson, 1987).

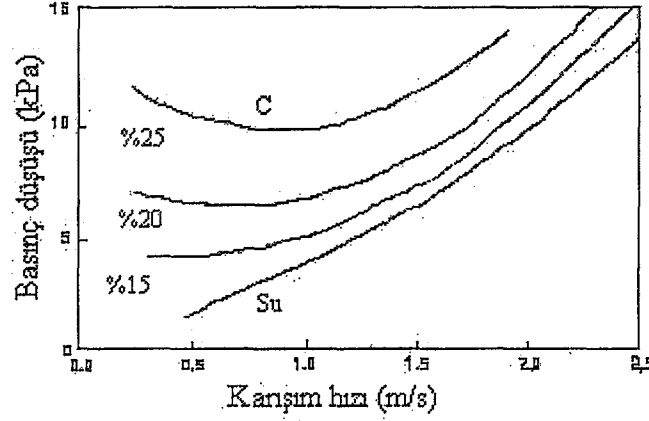
Shirakashi vd., bölgesel soğutma sistemlerinde kar-su karışımı kullanımı sırasında oluşabilecek tıkanma olayları üzerinde araştırma yapmıştır. Kar-su karışım akışı sırasında oluşabilecek kar kümelerinin zamanla boru ekleme elemanlarında birikmelere sebep olduğu ve akışa ters yönde bir tıkaç etkisi meydana getirdiği belirlenmiştir. Bu durumda basınç düşüşleri de büyük olmuştur (Kawada, 1999).

Winters ve Kooy, bölgesel soğutma sistemlerinde buz çamurunun tamamen donmasını değerlendirmek için, iç çapları 50mm, 100mm ve 150mm olan PVC borularda deneyler yapmıştır. Deneysel olarak düşük hızlardaki buz çamuru akışında oluşan basınç düşüşünün sadece su akışında oluşan basınç düşüşünden büyük olduğu bunun nedeninin ise, boru ekleme elemanlarında oluşan kayıplar ile ilgili olduğu belirlenmiştir (Anderson, 1987).

Takahashi vd., yatay bir boruda buz-su çamur akışı için tane hız profilleri ve basınç düşüşü özelliklerinin deneysel araştırılmasına yönelik bir çalışma yapmıştır. Çalışmada ortalama çapı 12mm ve yoğunluğu 0.917 olan buz taneleri kullanılmıştır. Maksimum buz konsantrasyonu 0.25 olmuştur. Uzunluğu 12m, iç çapı 49.7mm olan boruda basınç düşüşü ölçümleri yapılmıştır. 1m/s'den daha düşük akış hızlarında buz tanelerinin borunun üst kısmında taşındığı (hareketli yatak) bu durumda buz taneleri ve boru üst yüzeyi arasında oluşan sürtünmenin çok yüksek olduğu tespit edilmiştir. 1m/s'den daha yüksek akış hızlarında ise buz tanelerinin boru kesiti boyunca üniform bir şekilde dağıldığı (simetrik süspansiyon) bu durumda oluşan basınç düşüşünün, suyun basınç düşüşüne yaklaştığı belirlenmiştir. Bu deneylerde katı konsantrasyonun basınç düşüşüne bir etkisi olmamıştır (Anderson, 1987).

Snoek vd. (1993), değişik akış hızları ve buz-su çamuru konsantrasyonları için basınç düşüşü

ölçümlerini tekrarlamıştır. Deneylerde iç çapları 20-100mm arasında değişen borular kullanılmıştır, test kısmı 23m uzunluğundadır. Çalışılan hız aralığı 0.5-2.5m/s ve buz konsantrasyonu 0-0.25 seviyesinde olmuştur. Değişik karışım hızlarında ve çamur konsantrasyonlarında oluşan basınç düşüşü değerleri Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3-1 Buz-su çamuru akışında değişik hızlarda basınç düşüşleri (Snoek vd.,1983)

Kawada vd. (1997-1998-1999), bölgesel soğutma sistemlerinde buz-su karışımı kullanımına yönelik çalışmıştır. Boru yüzeyi ile buz tanelerinden oluşmuş kümenin sürtünme katsayısını ve basınç düşüşüne etkisini, buz tanelerinden oluşmuş kümenin sünme gerilimi basıncını ( $\epsilon$ ) (bu basınç boru içindeki akışta buz tanelerinin kümeleşmesine neden olan yapışkanlık kuvvetini temsil eder) araştırmıştır. T şeklinde dizayn edilmiş bir boru demetinde (yatay ve dikey boruların iç çapları sırasıyla 78.7mm ve 51.7mm olarak alınmıştır) tane çapı 10mm olan buz taneleri ve polipropilen malzemedan yapılmış küresel boncuklar kullanarak ayrılma kayıp katsayısı ( $\xi$ ) ve bu tip bir boru konstrüksiyonunda karışımın akış davranışı belirlenmiştir.

Buz-su çamuruna ait Froude sayısı ( $Fr$ ) ve basınç düşüş katsayısı ( $\phi$ ) arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Deneysel çalışmada kar-su ve buz-su karışım akışları, çökelen karışımların akış davranışına benzetilerek, bu tip akışların basınç düşüşü hesaplarında kullanılan genel ifadelerden yararlanılmış ve bazı deneysel katsayılar elde edilmiştir. Sonuç olarak, çökelen karışımlara ait yük kaybı ifadelerinde yer alan basınç düşüş katsayısı ile Froude ( $Fr$ ) sayısı arasında deneysel bir bağıntı kurulmuştur.

$$Fr = \frac{V_s^2}{gd|s-1|} \quad (3.19)$$

Basınç düşüş katsayısı  $\phi = \frac{i_{kr} - i_s}{C i_s}$  olarak alındığında aralarındaki deneysel bağıntıyı aşağıdaki gibi ifade etmişlerdir (Kawada vd., 1997).

$$\phi = \phi_s + \alpha.Fr^{-\beta} \quad (3.20)$$

Yapılan literatür araştırması göstermiştir ki, deneylerde çalışılan hızlar 0.7-3m/s olup, buz konsantrasyonu 0.25'i geçmemiştir. Deneylerde kullanılan tanelerin çapları maksimum 12mm ve boru çapları 20mm ile 150mm arasında değişmiştir. Deneylerin hemen hemen hepsinde boru içindeki iki fazlı akış, buz-su çamuru akışı olarak gerçekleşmiştir.

Büyük çaplı küresel buz kapsüllerinin, bölgesel soğutma sistemlerinde kullanılmasına yönelik deneysel bir çalışmaya rastlanmamıştır.

### 3.2 Kapsül Akışları

60'lı yılların başında Alberta Araştırma Merkezi'nde (Kanada) çalışan bir grup araştırmacı, boru hatları boyunca ham petrol-su gibi homojen karışmayan karışımların akışı üzerinde laboratuvar çalışmaları başlattı.

Deneyler sırasında, yatay borunun bir bölgesini işgal eden petrol kütlelerinin laminar ve türbülanslı akışta ulaştığı doğrusal hız değerinin ortalama sıvı hızından büyük olduğu fark edildi. Ayrıca türbülanslı akışta petrol-su karışımına ait basınç düşüşü, boru içinde sadece su akışı varken oluşan basınç düşüşünden daha düşüktü. Böylece petrol kütlelerinin yerini (daha sonra kapsül olarak adlandırılacak olan) katı kütleler aldığı katı maddelerin nakli için en uygun hızlar ve basınç düşüşlerine ulaşılabileceği görüldü (Chow,1979).

Bu gelişme 1963 yılında Hodgson ve Charles'ın sunduğu bir makalede boru hatları ile büyük ölçekli katı madde taşınması sağlamak amacıyla önerildi. Ulaşılan sonuçlar kapsül boru hattına ait projelerin temelini attı ve Alberta Araştırma Merkezi'nde 15 yıl sürecek olan geniş kapsamlı teorik ve deneysel çalışmaların başlangıcı oldu.

1970'li yılların ilk yarısına kadar dairesel kesitli dikey veya çoğunlukla yatay borular içinde bir tek silindirik (uçları düz veya yuvarlatılmış) ya da küresel kapsül akış davranışlarının karakteristiği üzerinde çalışıldı. Taşıyıcı akışkan genellikle su olsa da, bazı çalışmalarda suya viskozitesini arttırmak için polimer eklemesi yapıldı, ya da ölçümlerin daha viskoz ortamlarda yapılabilmesi için değişik viskozitelere sahip yağlar taşıyıcı akışkan olarak kullanıldı. Bir tek kapsül akışı nedeniyle oluşan basınç düşüşündeki artış oldukça küçüktü (en çok 0.762mmss

olan bu değer, hemen hemen sıradan bir basınç dalgalanması kadardı). Bu nedenle basınç düşüşlerine ait ölçümler kapsüllerin sürekli akışta olduğu sistemlere ait çalışmaların başlamasına kadar ertelendi. Çalışmalar kapsül yüzeyine etkiyen kuvvetlerin dağılımı ve kapsül-taşıyıcı sıvı hızlarına ait ölçümler ile sınırlı kaldı. Kapsül-taşıyıcı sıvı hareketinde hız oranını (fazların hızları birbirinden farklı ise bir faz diğerini sürüklüyor demektir (Özgür,1979)) etkileyen faktörler ve daha viskoz taşıyıcı akışkanlar kullanıldığında türbülanslı yapının ne oranda sönümlendiği araştırıldı.

Ticari anlamda, kapsül boru hatları kapsüllerin sürekli akışını ve birbirleri üzerinde karşılıklı etkilerini içerdiğinden, bir tek kapsüle ait ölçümler gerçek kapsül boru hatlarına ait yeterli bilgiyi vermemekteydi. Bu sebeple, 1970'li yılların 2. yarısına doğru kapsül trenleri ile ilgili çalışmalara yön verildi. Ancak bu çalışmalarda treni oluşturan kapsül sayısı sınırlı idi. Gerek bir tek kapsülün akış mekanizmasını gerekse kapsül treninin davranışını çözümlenmeye yönelik ilk çalışmalarda kapsül (veya kapsül treni) ya boru içine sabitleniyor ya da boru içinde asılı durumda iken sıvı akışına bırakılıyordu. Hareket eden kapsüllerin hidrodinamiğine yönelik olarak Vlasak (1999) anormal şekilli (üzerine helisel kanallar açılmış silindirik kapsül) ve yoğunluğu taşıyıcı akışkandan fazla olan kapsüller ile yaptığı çalışmasında özel bir besleme mekanizması ile sistem içinde kapsül treninin devamlı akışını sağladı.

Du ve Nair (2002), ticari ölçekli kapsül boru hatlarının otomasyonu ve kontrol konuları üzerinde araştırma yapmıştır. Kolon ayrılmalarının önlenmesi, basınç dalgalanmaları ve akış düzensizliklerinin azalması için pompa by-pass hattına ait vanaların çalışması kontrol edilmelidir. Prototip bir deney tesisatı üzerinde pompa by-pass istasyonu kurularak, sistem üzerindeki vanaların kontrol stratejileri incelenmiştir. Çalışma kapsül boru hatlarına yönelik olmasına rağmen deneyler sadece su ile yapılmıştır.

### 3.3 Kapsüller ile Yapılmış Çalışmalar ve Sonuçları

Boru içindeki kapsül hareketinin teorik çözümü oldukça karmaşık olup problemin bazı kısımları değişik yazarlar tarafından çözülmüştür. Kapsül üzerine etkiyen kuvvetlerin dağılımı, kapsül-sıvı sisteminin beraber hareketinde kapsül hızı ve basınç düşüşlerine ait temel kanunlar ele alınmıştır (Myska ve Vlasak 1983).

Kapsül boru hattı sistemlerinin modeli için, hız oranı ( $R_v$ ) ve kapsül basınç düşüşü ile sistemin fiziksel değişkenleri arasındaki ilişkileri sağlamak gereklidir. Bu nedenle bir çok araştırmacı kapsül taşıyıcı sıvı sistemini değişik yönleri ile incelemiştir. Ancak hesaplamalar

yapılırken, kapsül taşıyıcı sıvı hız oranına etki eden parametrelerin yalnızca bir kısmı dikkate alınmış ve çalışmaların çoğunda kapsül uç etkileri ihmal edilmiştir.

Teorik analizlerin doğruluğu deney sonuçları ile kontrol edilmiştir. Bu çalışmalarda sistemin matematiksel modeli oluşturulurken yapılan kabuller ve uygulanan metodlar aşağıda verilmiştir.

Küresel, silindirik veya değişik şekillere sahip kapsül akışlarını içeren çalışmalar, tek kapsül akışı ya da kapsül treni akışı olmak üzere iki ana başlık altında toplanmıştır.

### 3.3.1 Tek Kapsül Akışları

#### 3.3.1.1 Küresel Kapsül Kullanılmış Çalışmalar

Bu alanda yapılmış ilk çalışmalarda mümkün olan en ekonomik kapsül boyutu, şekli ve yoğunluğunun, taşıyıcı akışkanın hızı ve reolojik özelliklerinin kapsül hızı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

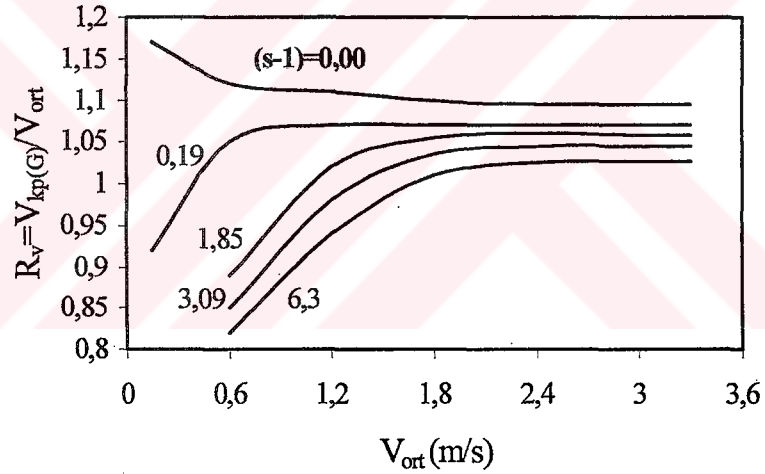
Ellis (1964a), eşit yoğunluklu (taşıyıcı akışkan ile aynı yoğunlukta) küresel kapsül akışlarına ait deneysel çalışmasında hız ölçümlerini 10m uzunluğunda ve iç çapı 40mm olan yatay pleksiglas bir boruda yapmıştır. 0.06-3.7m/s arasında değişen akış hızlarında kapsüllerin ulaştığı hız değerinin, karışım ortalama hızının ( $V_{ort}$ ) 1.05 ile 1.5 katı büyük olduğu bulunmuştur.

Sisteme ait boyutsuz parametrelere boyut analizi yapılarak ulaşılmıştır. Hesaplamalarda ya bağıl yoğunluk ( $s = \rho_{kp}/\rho$ ) ya da görünür yoğunluk ( $s-1$ ) dikkate alınmıştır. Küresel kapsüllerde geometrisi nedeniyle, kapsül uzunluğu ve uç şekli etkisi oluşmamaktadır. Ayrıca kapsülün boru yüzeyi ile teması noktasal olacağından kürenin yüzey pürüzlülüğü de ihmal edilebilmektedir (Ellis, 1964a).

Taşıyıcı sıvının sürtünmeyi azaltıcı etkisini gösteren bir katsayı Yağlama Faktörü (c) olarak tanımlanmış olup kapsül ve boru yüzeyleri arasında meydana gelen sürtünmenin hesabında kullanılır. Sürtünme katsayısı, yağlama faktörü ve yüzey pürüzlülüğünün bir fonksiyonudur. yağlama faktörü, kapsül-boru çiftinin malzeme özelliğine ve taşıyıcı sıvının fiziksel karakterine göre değişir. Eşit yoğunluklu kapsüllerde ( $s-1=0$ , iken) yağlama faktörünün uygulanamaz olduğu rapor edilmiştir (Ellis, 1964a). Re sayısına bağlı olarak kapsüllerin sürüklenme katsayıları da değişmiştir. Kapsül akışkan tabakası üzerinde kayarken, bu esnada türbülans dalgalanmaları sönümlendiğinden sürüklenme katsayısında bir azalma görülmüştür.

Küresel kapsüllerin sürtüklenme katsayısı laminar akıştan türbülanslı akışa geçişin başladığı akım şartlarında yaklaşık 0.5 değerini almıştır.

Ellis (1964b), çalışmasının ikinci kısmında bağıl yoğunluğu ( $s$ ), 1.19-2.84 arasında değişen küresel kapsül akışının davranışını araştırmıştır. Küresel kapsüllerin 0.39-0.89 çap oranlarında ve orta hızlarda boru tabanında hem kayma hem de dönme hareketi yaparak ilerledikleri tespit edilmiştir. Daha düşük yoğunluğa sahip küresel kapsüllerin yoğunluğu fazla olanlara göre daha çok kayma eğiliminde olduğu, ortalama sıvı hızının artması ve çap oranının azalması ile birlikte akış yolunun çoğunu kayarak tamamladığı görülmüştür. Bunun nedeni, yaklaşık 1.2m/s ve daha yüksek akış hızlarında küresel kapsüle etkileyen ek kaldırma kuvvetlerinin artması ile birlikte kapsül ve boru yüzeyi arasında kalan akışkanın hidrodinamik yağlama etkisini (taşıyıcı sıvının sürtünmeyi azaltıcı etkisi) göstermesidir. Bu durumda hız oranı da artmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3-2 Değişik görünür yoğunluğa sahip kapsüller için ortalama hızın hız oranına etkisi (Govier ve Aziz, 1972)

Ellis ve Bolt (1964), ortalama hız ve kapsül boru çap oranının, kapsül hızına etkilerini araştırmıştır. Yüzeyi pürüzsüz olarak kabul edilen, eşit yoğunluklu küresel kapsüle ait bağımsız grupların, kürenin geometrisi yüzünden  $Re$  sayısı ve  $d/D$  oranı ile sınırlı olduğu ayrıca eşit yoğunluklu kapsüllerde akımın  $Re$  sayısı sabit kaldığı sürece viskozite değişiminin hız oranını etkilemediği gösterilmiştir.

Round ve Bolt (1965), taşıyıcı akışkan olarak farklı viskozitelere sahip yağlarda ( $7-45\text{mm}^2/\text{s}$ ) küresel kapsülün akış davranışını incelemiştir. Kapsül yoğunlukları 1.19-7.86 ve çap oranları

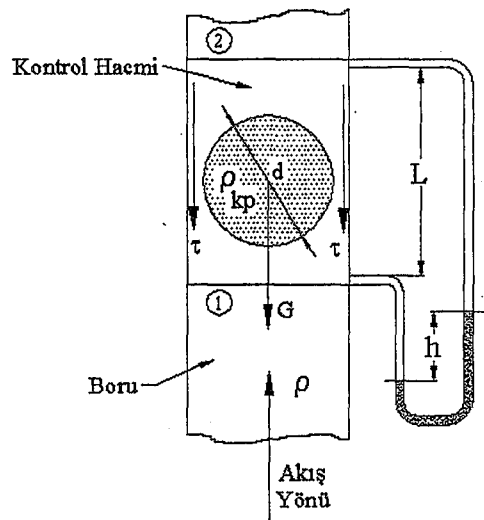


0.4-0.9 arasında değişmiştir. Hafif kürelerde sıvı viskozitesinin artışı ile birlikte kapsül ve boru yüzeyi arasında kalan sıvının yağlama özelliğinin de arttığı buna bağlı olarak hız oranının da arttığı tespit edilmiştir. Yoğunluğu fazla olan küresel kapsüllerde ise bu akış mekanizmasının tersi gerçekleşmiştir. Küresel kapsüllerde yüzey pürüzlülüğü etkisi silindirik kapsüllere oranla önemsiz kabul edilmiştir.

Chow (1979), 11m uzunluğunda çapı 7.6cm olan çelik dikey bir boruda alüminyum, çelik ve naylon malzemeden yapılmış küresel kapsüllerin su ile taşınmasında akış mekanizmasını incelemiştir. Deneyle, 0.57-0.65-0.82 çap oranlarında yapılmıştır.  $d/D$  oranı 0.57 olan çelik kürelerde ( $s=7.8$ ), hız 3m/s iken basınç oranı ( $R_p=\Delta P_{kr}/\Delta P_s$ ) 1.25 bulunmuştur.  $d/D$  oranı 0.8 olan çelik kürelerde aynı akış hızında basınç oranı 2.5 olarak tespit edilmiştir. Sabit boru çaplarında küresel kapsüllerin çapı büyüdükçe, kapsüle ait basınç düşüşü artmıştır. Aynı sonuç silindir kapsüller içinde geçerlidir.

Latto vd. (1973), iç çapı 5.3cm olan dikey yerleştirilmiş cam bir tüp içinde asılı durumda duran küresel kapsüle ait ve değişik viskozitelere sahip sıvı ortamlar için basınç düşüşleri ve sürüklenme katsayısını araştırmıştır. Suya polimer eklemesi yapılarak viskozitesi arttırıldığında,  $d/D < 0.7$  için, sürüklenme katsayısının da arttığı görülmüştür.  $d/D > 0.7$  çap oranlarında sürüklenme katsayısının viskozite artışından etkilenmediği rapor edilmiştir.

Sistemde bir kontrol hacmi belirlenerek, kuvvet dengesi yazılmıştır. Kontrol hacminin giriş ve çıkışına bağlanan U manometresinde okunan basınç farkı ile sistem içinde yalnız sıvı akışı sırasında oluşan basınç farkı arasında aşığıdaki bağıntı sağlanmışır (Şekil 3.2).



Şekil 3-3 Dikey bir boruda belirlenen kontrol hacmi ve küresel kapsül (Latto vd., 1973)

$$\frac{\Delta P_{kr} - \Delta P_s}{(\rho_{kp} - \rho)D} = \frac{2}{3} \left( \frac{d}{D} \right)^3 \quad (3.21)$$

Yukarıdaki bağıntı kurulurken boru yüzeyi boyunca kesme gerilmesinin sabit kaldığı kabulü yapılmıştır. Boru eğimli olduğunda ise genel olarak;

$$\frac{\Delta P_{kr} - \Delta P_s}{(\rho_{kp} - \rho)D \sin \theta} = K \left( \frac{d}{D} \right)^n \quad (3.22)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Buradaki K ve n deneysel sabitlerdir. Sıvı-polimer solüsyonu ise deney sonuçlarına göre , yukarıdaki ifadede K=0.633 ve n=2.94 olmaktadır.

Dikey boru içinde cisme etkiyen toplam itme kuvveti kaldırma kuvvetine eşittir. İki tip sürüklenme katsayısı tanımlanmıştır. Birincisi, suyun serbest akışı sırasında ortalama hıza bağlı sürüklenme katsayısı değeri, diğeri sınırlandırılmış bir ortamda yani kapsülün etrafını çevreleyen sıvının ortalama hızına bağlı sürüklenme katsayısıdır.

$$G = \left( \frac{\pi}{6} \right) d^3 (\rho_{kp} - \rho) \quad (3.23)$$

G kapsülün ağırlık kuvveti olmak üzere, küre için sürüklenme katsayısı;

$$C_d = \frac{\frac{G}{A}}{\frac{\rho V_{kp}^2}{2g}} \quad (3.24)$$

olarak yazılır. Gerekli sadeleştirmeler yapıldığında, kapsülün etrafını çevreleyen sıvının ortalama hızına bağlı sürüklenme katsayısı değeri Eşitlik 3.25 ile ifade edilir.

$$C_D = \left( \frac{4}{3} \right) \frac{d}{V_{kp}^2} \left( \frac{(\rho_{kp} - \rho)}{\rho} \right) g \quad (3.25)$$

Sürüklenme katsayısı çap oranları cinsinden yazılmıştır ve kapsül hızı aşağıdaki gibi tanımlanarak;

$$V_{kp} = \frac{V_{ort}}{\left( 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^2 \right)} \quad (3.26)$$

$$C_D \left( \frac{V_{ort}^2}{(\rho_{kp} - \rho) D g} \right) = \left( \frac{4}{3} \right) \left( \frac{d}{D} \right) \left( 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^2 \right)^2 \quad (3.27)$$

$C_D$  Eşitlik 3.27'deki gibi bulunmuştur.  $d/D$  oranı 0.447 olduğunda eşitliğin sol tarafı maksimuma ulaşır ve küreye ait sürüklenme katsayısı aşağıdaki gibi olur.

$$\frac{V_{ort}^2}{(\rho_{kp} - \rho) D g} = \frac{0.382}{C_D} \quad (3.28)$$

Button ve Ma (1975), iç çapı 95.6mm olan yatay şeffaf bir boruda, çapları 9.47-12.55-15.75 ve 18.9mm olan ve özgül ağırlıkları 1300,1620,2100 ve 2710 kg/m<sup>3</sup> olan 4 tip kürenin hareketini kamera ile incelemiştir. Su hızı 1.21-4.55m/s arasında değişmiştir. Su içinde hareket eden bir tek kürenin geometrik ve kinematik yörüngeleri tespit edilerek sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri Eşitlik 3.29 ve 3.30 ile ifade edilmiştir.

$$C_D = \left( \frac{d}{D} \right)^{0.150} \frac{1}{(1.17 + 0.235 \times 10^{-5} \text{ Re})} \quad (3.29)$$

$$C_L = \left( \frac{d}{D} \right)^{0.303} (0.462 - 0.0252 \times 10^{-5} \text{ Re}) \quad (3.30)$$

### 3.3.1.2 Silindirik Kapsül Kullanılmış Çalışmalar

Boru içinde sıvı akışı etkisi altında herhangi bir boyut ve yoğunluğa sahip silindirik kapsüle ait parametreler,  $V_{ort}$  ( $V_{kp} + V_s$ ),  $\mu$ ,  $\rho_{kp}$ ,  $\rho$ ,  $l$ ,  $d$ ,  $D$ ,  $e_{kp}$ ,  $e_b$ , uç şekli ve  $c$  faktörü (yağlama faktörü) olarak belirlenmiştir (Ellis,1964a).

Ellis (1964b), çalışmasında bağıl yoğunluğu, 1.19-2.84 arasında değişen silindirik kapsüllerin akış davranışını araştırmıştır. Silindirik kapsüllerde yeterli sıvı akımı hızlarında (1.8-2.5m/s) burun yukarı eğilim gözlenmiştir. Bu durum basınç düşüşünü arttırmıştır. Daha yüksek hızlara çıkıldığında silindirik kapsülün tamamı boru yüzeyinden ayrılmıştır.

Ellis ve Bolt (1964), silindirik kapsüller ile yaptığı deneysel çalışmada, ortalama hızın, kapsül-boru çap oranının, kapsül uzunluğu-boru çapı oranı ve uç şeklinin kapsül hızına etkilerini araştırmıştır. Gerekli boyut analizleri yapılarak yatay bir boruda, yüzeyi pürüzsüz olarak kabul edilen, eşit yoğunluklu, silindirik kapsüle ait hız oranını etkileyen boyutsuz

sayıların  $Re$ ,  $d/D$ ,  $l/d$  (narinlik oranı) ve kapsül uç şekli olduğu gösterilmiştir. En fazla basınç düşüşü ön kısmı yuvarlak arka kısmı düz profile sahip kapsüllerde oluşmuştur. Froude sayısının diğer kullanılabilir boyutsuz sayı olduğu,  $Re$  sayısı ile karşılaştırıldığında ise taşıyıcı akışkan ile aynı yoğunluğa sahip kapsüller için etkisinin önemsiz olduğu rapor edilmiştir.

Round ve Bolt (1965), taşıyıcı akışkan olarak farklı viskozitelere sahip yağlarda ( $7-45\text{mm}^2/\text{s}$ ) silindirik kapsülün akış davranışını incelemiştir. Kapsül yoğunlukları 1.19-7.86 ve çap oranları 0.4-0.9 arasında değişmiştir. Silindirik kapsüllerde boru tabanı ile daha fazla temas olduğundan yüzey pürüzlülüğü ve ona bağlı olarak gelişen sürtünme kuvvetlerinin önemi üzerinde durulmuş ve bu durumun aynı şekilde yağlama faktörü içinde geçerli olduğu belirtilmiştir.

Jensen ve Bruce (1970), çelik ve plastik kapsüllerin bakır bir boru içindeki akışında, çelik kapsüllerin oluşturduğu basınç düşüşünün plastik kapsüllere oranla %50 büyük olduğunu buldular. Bu etki kapsül ile boru malzemesinin yüzey pürüzlülüğü ve iki katı yüzey arasında oluşan kuvvetler ile ilgilidir. Kapsülün bir kısmı boru iç yüzeyi ile temas halinde ise ya da boru yüzeyine çok yakın hareket ediyorsa, boru ve kapsülün yüzey şartları basınç düşüşüne etki eder. Pürüzlü yüzeye sahip boru ve kapsüllerin basınç düşüşü, pürüzsüz yüzeye sahip olanlara göre daha fazla olacaktır.

Kruyer ve Ellis (1974), yatay bir boruda, silindirik kapsülün hızı, kapsül basınç düşüşü ve ortalama hız arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir model geliştirmiştir. Kapsül hızı ve basınç düşüşü bilindiğinde bu model ile ortalama hız bulunmakta böylece istenilen miktarda katı malzemenin taşınması için gerekli sıvı debilerine ulaşılmaktadır. Boru çapları 12.7-254mm arasında olup, taşıyıcı sıvının viskozitesi  $1-45 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  aralığındadır. Kapsül-boru çap oranları 0.8-0.95 ve kapsül yoğunlukları 1.03-12 arası olmuştur. Aynı sıvı hızlarında kapsül yoğunluğu arttıkça, basınç düşüşü de artmıştır. Sıvı hızı 2.5m/s iken yoğunluğu 2 olan kapsüle ait basınç düşüşü, yoğunluğu 1.03 olan kapsüle ait basınç düşüşünden 3 kat büyük çıkmıştır.

Kapsül çevresindeki akımın laminar ( $Re < 1000$ ) ya da türbülanslı ( $Re > 1000$ ) olduğunu gösteren bir  $Re$  sayısı geliştirilmiştir.

Pratikteki tüm kapsül uygulamalarında kapsül hızı, debi ve konsantrasyon miktarlarından bulunabilir. Kapsülün basınç düşüşü ise kapsül-boru-sıvı etkileşiminin bir fonksiyonudur ve bu kriterlerden bağımsız olarak ifade edilemez. Bununla beraber; ortalama hız, kapsül hızından ya da kapsülün basınç düşüşünü veren sürtünme katsayısı ve  $Re$  arasındaki bağıntıdan hesaplanabilir. Bu nedenle, boru  $Re$  sayısını da kapsayan birkaç değişik formdaki

Re sayısı deneysel çözümlerde kullanılmıştır. Re sayısının halka aralığına ve halka hızına bağlı olarak formu aşağıdaki gibidir.

$$Re = \frac{\rho V_h (D - d)}{\mu} \quad (3.31)$$

Bu ifade sürtünme katsayısı ile bağlantı kurmakta kullanılır ve kapsül yüzeyindeki sıvının oluşturduğu kesme kuvvetlerinin etkisini belirler. Sürtünme katsayısının belirlenmesinde aşağıdaki bağıntı önerilmiştir.

$$f(\text{Re}^*)_h = C \quad (3.32)$$

Laminar ve türbülanslı akım şartlarında kapsülün birim boydaki basınç düşüşü için aşağıdaki ifadeler verilmiştir.

Re ≤ 1000 için,

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{kr} = \frac{19.2(V_{ort} - kV_{kp})\rho v}{(D - d)^2(1 - k)^2} \quad (3.33)$$

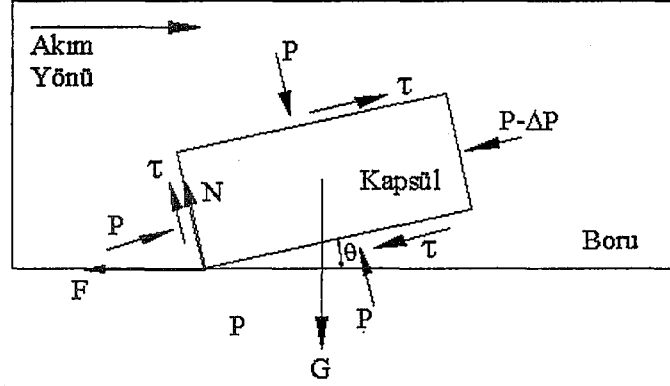
Re ≥ 1000 için,

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{kr} = \left[\frac{V_{ort} - kV_{kp}}{1 - k^2}\right]^{1.75} \left[\frac{0.14\rho v^{0.25}}{(D - d)^{1.25}}\right] \quad (3.34)$$

Garg (1977), yatay bir boruda, boru yüzeyine paralel olarak hareket eden bir tek silindirik kapsülün davranışını, kapsül ile boru yüzeyi arasındaki sürtünmeyi ve kapsül boyunca oluşan eksenler arası açıklığı dikkate alarak inceledi. Kapsül ve boru cidarı arasında sıkışan akışkanın kapsüle uyguladığı kuvvetlerin bulunması için hidrodinamik yağlama teorisini kullandı.

Uygulamalarda, kapsül boru hattının davranışı kapsül ile boru yüzeyi arasında meydana gelen yüzey sürtünmesinden ve kapsül uzunluğu boyunca boru eksenine boyunca oluşan üniform olmayan açıklıktan önemli ölçüde etkilenir. Kapsülün hızı ve boru içindeki pozisyonu, kapsüle etkiyen kuvvetlerin ve momentlerin dengesi hesaplanarak sağlanmıştır. Şekil 3.3'deki kuvvetler, sürtünme kuvvetlerinin kapsül üzerindeki etkisini belirlemek için gereklidir. Kuvvet analizi yapılarak kapsül üzerindeki basınç ve kesme kuvvetleri hesaplanmıştır. Daha sonra halka içinde iki boyutlu koordinat sistemi kullanılarak akış alanına ait geometri tanımlanmıştır. Böylece verilmiş bir basınç düşüşüne bağlı olarak kapsülün hız eşitliği elde

edilmiş, ortalama hız, basınç oranı ve enerji gereksinimi gibi diğer parametreler hesaplanmıştır. Kapsül hızı ve kesme gerilmesi arasındaki ilişki halka için Re sayısı oluşturularak sağlanmıştır (Eşitlik 3.35 ve 3.36).



Şekil 3-4 Silindirik kapsüle etkiyen kuvvet dağılımları (Garg, 1977)

$$Re = \frac{(D-d)V_h}{\nu} \quad (3.35)$$

$$f = \left( \frac{\Delta P}{L} \right)_{kr} \frac{D}{2\rho V_h^2} \quad (3.36)$$

Kapsül hızı ve boru içindeki pozisyonu, kapsüle etkiyen kuvvetlerin ve momentlerin dengesine göre bulunmuştur.

Ortalama hızlar 0.3 ve 2.5m/s, boru iç çapı 101.6mm, silindirik kapsülün uzunluğu 2.5m, bağıl yoğunluk 2, çap oranı 0.9-0.95 arasında olmuştur. Akışkanın su olduğu sistemde ( $\rho=1000\text{kg/m}^3, \nu=1.14 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ ) kapsül ve boru cidarı arasındaki dinamik sürtünme katsayısı 0.3 olarak kabul edilmiştir.  $d/D$  oranı arttığında kapsüle ait basınç düşüşleri de artmıştır. Bu şöyle açıklanabilir; sabit boru çaplarında, kapsül çapı arttıkça kapsülün hareketi için daha fazla basınç düşüşü gerekmektedir. Kapsül ve boru eksenleri arasındaki açıklık arttığında basınç düşüşü de artmıştır.

Latto ve Lee (1978), iç çapı 5cm olan dikey pleksiglas bir boru içinde hidrodinamik anlamda asılı halde duran alüminyum ve çelik silindirik kapsüllerin basınç düşüşü ve hız ölçümlerini yapmıştır. Dört farklı  $d/D$  oranlarında çalışılmış (0.4-0.8), taşıyıcı akışkana polimer eklemesi yapıldığında sürtünme katsayısının azaldığı tespit edilmiştir.

İç çapı 4.88cm ve uzunluğu 2.4m olan dikey borunun 1.5m'lik kısmı ölçüm bölgesi olarak

kullanılmıştır. Ölçüm bölgesinin girişine ve çıkışına bağlı bir manometre ile basınç düşüşleri ölçülmüştür. Yoğunlukları 2.7 ve 7.8 olan alüminyum ve çelik silindirik kapsüller birbirlerine eklenerek ölçüm bölgesi uzunluğunda tek bir kütle oluşturulmuştur. Dolayısı ile silindirlerin ölçüm bölgesine girerken ve çıkarken oluşturacağı basınç düşüşleri bertaraf edilmiştir. Uzun silindirik kütle boru içinde asılı halde iken yarı deneysel eşitlikler ile basınç düşüşleri, sürüklenme katsayıları arasındaki ilişkiler analiz edilmiştir.

Tüp içinde kapsül olsun veya olmasın, kütle dengesi basınç fonksiyonu formunda yazılırsa Eşitlik 3.37 haline gelir;

$$\Delta P_{kr} - \Delta P_s = \left(\frac{d}{D}\right)^2 l(\rho_{kp} - \rho)g \sin \theta \quad (3.37)$$

Boru dikey olduğu için  $\sin \theta = 1$  olur. Yukarıdaki eşitlik en genel hali ile aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\left[\frac{\Delta P_{kr} - \Delta P_s}{(\rho_{kp} - \rho)gD}\right] = \left(\frac{d}{D}\right)^3 \left(\frac{l}{d}\right) \quad (3.38)$$

Cismin ağırlığı=Kaldırma kuvveti+Toplam sürüklenme kuvveti

Kabulü yapılarak,  $d/D=0.447$  iken silindirik kapsül için sürüklenme katsayısı:

$$\left[\frac{V_{ort}^2}{\left(\frac{(\rho_{kp} - \rho)g}{\rho} D \frac{l}{d}\right)}\right] = \frac{0.572}{C_D} \quad (3.39)$$

olarak elde edilmiştir.

Kroonenberg (1978), yatay bir boru içinde eşmerkezli pozisyonda hareket eden (boru eksenine ile kapsül ekseninin çakışması durumu) bir tek silindirik kapsüle ait matematiksel bir model geliştirmiştir. Uç etkilerinin ihmal edilebilmesi için kapsül uzun olarak düşünülmüştür. Borunun her iki yönünden kapsüle etkiyen basınçlar sabit alınmış ve sadece türbülanslı akış olduğu kabul edilmiştir. Boru ve halka içindeki gerçek hız profili ihmal edilip bu hızların yerine hesaplamalarda sadece ortalama hızlar dikkate alınmıştır. Boru ve kapsül yüzeyine ait sürtünme katsayıları Moody diyagramından okunup, kapsül yoğunluğu taşıyıcı sıvı yoğunluğuna eşittir.

Yüzey sürtünmesinin ortalama hızın karesi ile orantılı olduğu, silindirik kapsülün kararlı

hareket ettiği, kapsül yoğunluğunun taşıyıcı sıvı yoğunluğuna eşit olduğu kabulleri yapılmıştır. Çap oranı 0.8, kapsül uzunluğu (l) 2.64m, boru iç çapı 0.07m, kapsül çapı 0.056, kapsül hızı 2.5m/s, ortalama hız 2.11m/s ve halka içindeki hız 1.42m/s iken kapsülün birim boydaki yük kaybı 0.035 mss/m olarak bulunmuştur.

Myska ve Vlasak (1983), kapsül hızlarına ait deneysel çalışmaların bir özetini sunarak, hız oranının çözümü için basitleştirilmiş iki katsayılı bir ifade önermiştir. Yatay bir boru içinde bir tek silindirik kapsül akışında hız oranına etki eden parametreler araştırılmıştır. Daha önceki çalışmalarda hız oranı hesaplanırken bazı parametrelerin (kapsülün uç şekli, kapsül ve boru eksenleri arasındaki açıklık, sürtünme katsayısı, taşıyıcı sıvının sürtünmeyi azaltıcı özelliği vb.) hız oranına etkisinin ihmal edildiğine dikkat çekilmiştir. Bu nedenle hız oranına etki edebilecek tüm parametreler tekrar gözden geçirilip boyut analizi yapılmıştır. Deneysel olarak, sırayla bazı parametreler sabit tutularak değişken parametrenin hız oranına etkisi incelenmiştir. Deneysel olarak 50mm boruda yapılmış taşıyıcı sıvı su olmuştur. Deneysel olarak kullanılan silindirik kapsül düz uçlu, 34mm çapında ve uzunluğu 150mm'dir. Sıvının bir tek kapsülü taşıdığı sistemlerde sisteme etkileyen tek dış kuvvetin yerçekimi kuvveti olduğu belirtilmiştir.

Gao vd. (2000), bir tek silindirik kapsülün ( $s=1.176-1.174$ ) boru içinde akışkan tabakası üzerinde kayarak taşınmaya başladığı andaki akış hızını araştırmıştır. Test kısmını oluşturan yatay pleksiglas borunun iç çapı 54mm'dir. 0.884-0.695 çap oranlarında çalışılmış, ulaşılan ampirik sonuçlar kapsül trenleri içinde uygulanabilir hale getirilmiştir. Tek kapsüle etkileyen kaldırma katsayısı ve kapsülün akışkan tabakası üzerinde kayarak hareket etmesini sağlayan akış hızı için deneysel bir eşitlik sunulmuştur.

### 3.3.1.3 Değişik Şekillerde Kapsül Kullanılmış Çalışmalar

Agarwall vd. (2001), kapsül şekli ve bağıl yoğunluğunun hız oranına etkisini deneysel olarak incelemiştir. Deneysel olarak, küre ( $d=25.4-50.8$ mm), silindirik ( $d=20.4$ mm, $l=50.8$ mm), küp ( $25.4 \times 25.4$ mm) ve dikdörtgenler prizması ( $25.4 \times 25.4 \times 50.8$ mm) şeklinde ve bağıl yoğunlukları 1.25-2-2.4 olarak değişen kapsüller kullanılmıştır. Ölçüm bölgesini, uzunluğu 7.45m , iç çapı 103mm olan yatay pleksiglas boru oluşturmuştur. Tek kapsül ile çalışılmış, hız oranını veren deneysel bir eşitlik önerilmiştir.

Hochmuth ve Sutera (1969), dikey ince bir tüp içinde (iç çapı 1cm) hareket eden bir tek küresel başlığın hız ve basınç ölçümlerini yapmıştır. Başlıkların düz kısmı akış yönüne dik



gelecek şekilde boru içine merkezlenmiştir.

Feng vd. ((1995), taşıyıcı sıvının yoğunluğundan fazla yoğunluğa sahip, elips şeklindeki bir tek kapsülün yatay bir boru içindeki hareketinde, kapsül etrafındaki sıvının akış mekanizmasını incelemiştir. Elips kapsülün hareketi iki boyutlu olarak ele alınmıştır ve hareket üç aşamada tanımlanmıştır. Bunlar; ilk kalkış, geçici kararsızlık ve kararlı uçuş halleridir. Elips kapsülün akış mekanizması silindirik kapsüle çok yakındır.

Yanaida ve Tanaka (1997), dikey bir boruda küp şeklindeki bir adet kapsül akışına ait sürüklenme katsayısını, silindirik kapsül için oluşturulmuş analitik metodun bir benzerini kullanarak araştırmıştır. Küp şeklindeki kapsülün sürüklenme katsayısı ile karakteristik bir sayı arasında bağlantı kurulmuştur. Kapsülün yoğunluğu 1.18 olup, test bölgesi için iç çapı 35mm, uzunluğu 2m olan pleksiglas boru kullanılmıştır.

### 3.3.2 Kapsül Treni Akışları

#### 3.3.2.1 Küresel Kapsül Kullanılmış Çalışmalar

Govier ve Aziz (1972), borularda kapsül akışı sırasında tipik akış özellikleri, sürüklenme faktörü ve basınç düşüşü ile ilgili temel alınabilecek teorik analizleri vermiştir. Yapılmış çalışmalar ve sonuçlar irdelenerek pratikteki uygulamalar için hem eşmerkezli hem de eşmerkezli olmayan kapsül akışlarını kapsayan modeller oluşturulmuştur.

1972 yılına kadar yoğunluğu suya yakın yada daha az olan küresel kapsüllerin hidrolik taşınması ile ilgili yapılmış bir çalışma olmadığına ayrıca eşmerkezli ya da eşmerkezli olmayan küresel kapsüllerin akışında oluşan basınç düşüşlerine ait hiçbir teorik analizin bulunmadığına dikkat çekilmiştir. Normal hızlarda ve çap oranının 0.8-0.9 gibi değerlerinde dikey borular içinde Taylor kabarcıkları ile benzerlik kurularak  $V_{kp(G)}=R_v V_{ort}$  ifadesinde,  $R_v=1.2$  olarak tespit edilmiştir.

Basınç düşüşünü, karışım yoğunluğu ve karışım hızı ele alınarak tek fazlı sıvı akışının oluşturduğu basınç düşüşü olarak belirlenebileceği gösterilmiştir. Bu durumda birim boydaki basınç düşüşü:

$$i_{kr} = \left( \frac{\Delta P}{L} \right)_{kr} = \frac{2 f \rho_{kr} V_{ort}^2}{D} \quad (3.40)$$

olarak verilmiştir. Sıvı fazın boru içindeki akışı sırasında oluşan Re sayısı Eşitlik 3.41'deki

gibidir.

$$Re = \frac{DV_{ort}}{\nu} \quad (3.41)$$

Kapsül ve sıvının beraber akışında sistemin ortalama hızı aşağıdaki eşitlikten bulunmuştur.

$$V_{ort} = \frac{4(Q_{kp} + Q_s)}{\pi D^2} = V_{kp} + V_s \quad (3.42)$$

Birbirleri ile temas halinde olan küresel kapsül için karışım yoğunluğu:

$$\rho_{kr} = \rho \left( \frac{2}{3} k^2 (s-1) + 1 \right) \quad (3.43)$$

şeklinde ifade edilmiştir.

Çamur akışlarındaki simetrik süspansiyon akış örneğine benzerdir. Çözümlemeler yapılırken sıvının hız profilindeki değişim etkileri ve büyük ölçekli türbülans etkileri ihmal edilmiştir. Eşmerkezli küresel kapsül hareketinin çoğunlukla bir kayma şeklinde olduğu ya da katı-katı sürtünmesinin sıvı sürtünmesine oranla daha küçük olduğu kabul edildiğinde yukarıdaki yaklaşımın gerçekçi olduğu kabul edilmiştir.

Birbirleri ile temasta olan kürelerin kararlı akışında eğer  $Q_{kp}$  biliniyorsa, kapsül hızları ve basınç düşüşü aşağıdaki yol izlenerek bulunabilir.  $D$  bilinmektedir ve çap oranı  $0.8 < k < 0.9$  aralığında ise  $V_{kp}$  süreklilik denklemi kullanılarak hesaplanır.

$$Q_{kp} = \frac{\pi d^3}{6} \left( \frac{V_{kp}}{d} \right) = \frac{\pi}{6} d^2 V_{kp} \quad (3.44)$$

Kapsül hızı için en uygun değerlerin 0.3-8m/s arasında olduğu belirtilmiştir. Hesaplamalarda  $V_{ort} = 0.9V_{kp(G)}$  alınmıştır. Karışımın yoğunluğu Eşitlik 3.43 ile hesaplanmış, basınç düşüşü için tek fazlı metod yaklaşımında verilen eşitlikte kullanılmıştır (Eşitlik 3.40).

Ellis ve Kruyer (1974), kapsül trenine ait deneysel çalışmasında boru çapı 16mm ve 102mm arasındadır. Boru hattı uzunluğu 25m olup, bir tek küre ile çalışmış ya da treni oluşturan kapsül sayısı 2-5-10 adet ile sınırlı kalmıştır. Küresel kapsüllerin özgül ağırlıkları 1550-4330kg/m<sup>3</sup> arasında olmuştur. Küresel kapsül akışında oluşan basınç düşüşünün ve güç ihtiyacının aynı yoğunluğa sahip yüzeyi pürüzsüz silindirik kapsüllere oranla daha az olduğu belirlenmiştir. Ancak kapsül treni akışında küresel kapsüllerin debisi aynı akış hızlarında

silindirik kapsüllere ait hacimsel debinin 2/3'ü kadardır. Bunun sebebi kapsüller arasındaki geometrik farklılıktır.

Alüminyum malzemeden yapılmış küresel kapsüllerde birim boyda oluşan basınç düşüşü, demir malzemeden yapılmış küresel kapsüllerin basınç düşüşünden azdır. Aynı kapsüllerde d/D oranı 0.95 iken oluşan birim boydaki basınç düşüşünün, çap oranı 0.85 iken oluşan basınç düşüşünden daha fazla olduğu görülmüştür (Çizelge 3.2).

Çizelge 3-1 Deneysel sonuçlar (Ellis ve Kruyer, 1974)

Alüminyum kütrelere			Demir kütrelere		
d/D	V <sub>ort</sub> (m/s)	i <sub>kr</sub> (Pa/m)	d/D	V <sub>ort</sub> (m/s)	i <sub>kr</sub> (Pa/m)
0.85	1.5	150	0.85	1.5	250
0.95	1.5	300	0.95	1.5	750

Ellis vd. (1975), deneysel çalışmasında, 25m uzunluğunda 12.7-50.8-101.6-254mm iç çaplarındaki yatay borular içinde, yoğunlukları 1.3'ten 7.8'e kadar değişen belli sayıda kürelerden oluşmuş kapsül treninin akış davranışını incelemiştir. Suya poliglukol eklemesi yapılarak  $1-45 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s arasında değişen viskoz ortamlar sağlanmıştır. Taşıyıcı sıvı viskozitesinin fazla oluşu basınç düşüşünü arttırmıştır. Bunun nedeni, daha viskoz ortamlarda, kapsül trenini çevreleyen sıvının oluşturduğu kesme kuvvetlerinin artışıdır. Bu etkiye kapsül ve boru yüzeyi arasındaki sürtünme ayrıca düzensiz küre hareketleri de eklenmekte, sonuçta basınç düşüşü artmaktadır. Basınç farkı diferansiyel tipte transmitter ile ölçülmüştür.

Kapsüle ait basınç düşüşü, test bölgesindeki karışımın oluşturduğu toplam basınç düşüşünden, boru içinde sadece sıvı akımı varken oluşan basınç düşüşü çıkarılıp tren uzunluğuna bölümü ile hesaplanmıştır. Kapsül-boru çap oranı 0.91'dir. Aynı kütleli debiyeye sahip silindirik kapsüllere oranla, küresel kapsüllerin basınç düşüşü daha küçük olmaktadır. Nakli yapılacak maddenin yoğunluğu arttıkça basınç düşüşü de artmıştır. Bu çalışmada ayrıca, küresel kapsüle ait şekil faktörünün basınç düşüşlerine etkisi incelenmiştir. Treni oluşturan kapsüller, şekil olarak tam küre olduğunda, daha az küresel olan kapsüllere oranla basınç düşüşü daha küçük olmuştur. Buna ilave olarak, su ile taşınan küresel kapsüllerde, eğer kapsül tam küre ise yoğunluğa bağlı sürtünmenin (yüzey sürtünmesi) basınç düşüşü üzerine çok az bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Deneysel olarak iki tip küresel kapsül kullanılmıştır.

- a) Döküm Al ve Fe küreler
- b) Tornalanarak tam küre şekli verilmiş Al ve Fe küreler

Aynı akış hızlarında tornalanmış demir kürelerin basınç düşüşü, döküm demir kürelerin basınç düşüşünden %50 küçük bulunmuştur. Boru çapı arttıkça kapsül hızı azalmıştır. Viskozitesi sudan fazla olan bir sıvı ile yoğunluğu 1.3 olan kapsüllerin akışında ortaya çıkan basınç düşüşü sadece su akışında oluşan basınç düşüşünden oldukça fazladır. Hızın belli bir değerinden sonra ise, kapsül ve viskozitesi sudan fazla olan sıvının oluşturduğu basınç düşüşü, kapsül-su basınç düşüşünden daha düşük olmaktadır. Bunun nedeni, daha hafif küresel kapsüllerin daha viskoz akışkan tabakası üzerinde kayarak taşınmasıdır.

Küresel kapsüllerin birbirleri arasında dönmelerine izin verecek kadar bir mesafeye ihtiyaçları vardır. Çünkü küresel kapsüllerin hızı aynı akış hızlarında silindirik kapsüllerin ulaştığı hızdan büyüktür ve bu durum taşınan miktarlar arasındaki farkı azaltır. Ayrıca ilk hareket ve taşınma hızlarının düşük oluşu, çok düşük basınç düşüşleri ve buna bağlı olarak daha az güç ihtiyacı oluşturması küresel kapsüllerle akışlarda işletme maliyetini azaltmıştır. Deneysel sonuçlara göre çap oranı 0.9 olan tornalanmış demir ve alüminyum kürelerin 101.6mm ve 254mm'lik borular içinde birim boydaki basınç düşüşleri aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{kr} = \left[0.0005 + 2.2\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_s\right] k^2 \quad (3.45)$$

12.7 ve 50.8mm'lik borularda ise,

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{kr} = \left[0.0006 + 2.7\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_s\right] k^2 \quad (3.46)$$

olarak bulunmuştur.

Chow (1979), dikey bir boruda küresel kapsül treni akışı için aşağıdaki ifadeyi önermiştir.

$$\frac{\Delta P_{kr} - \Delta P_s}{(\rho_{kp} - \rho)D} = 0.79 \left(\frac{d}{D}\right)^{3.572} m^{1.003} \quad (3.47)$$

Buradaki m trendeki kapsül sayısını göstermektedir.

Agarwal ve Mishra (1998), küresel kapsül boru hattına ait en uygun boyutların ve iki pompalama istasyonu arasındaki en uygun mesafenin sağlanması için bir çalışma yapmıştır. Kapsül yoğunluğu arttıkça sürtünme katsayısı da artmıştır. Yüksek Re sayılarına çıkıldığında

sürtünme katsayısında bir azalma meydana gelmiştir. Bu çalışmada, Govier ve Aziz'in (1972) küresel kapsüllerin basınç düşüşü ve küresel kapsül hızlarına yönelik kabulleri temel alınarak, kapsül-sıvı karışımı tek fazlı homojen akış olarak ele alınmıştır. Deneyleerde kullanılan kapsüllerin bağıl yoğunlukları 4.2-1.41 ve 2 dir .

Hesaplar yapılırken, kapsüllerin birbirleri ile temasta ve akışın kararlı olduğu kabul edilmiştir. Basınç düşüşleri hesabında tek faz metoduna göre ortalama hızlar ve karışım yoğunluğu dikkate alınmıştır. Bu durumda Re sayısı;

$$Re = \frac{\rho_{kr} D V_{ort}}{\mu} \quad (3.48)$$

şeklinde ifade edilmiştir.  $V_{ort}=0.9V_{kp(G)}$  olarak kabul edilerek, değişik Re sayılarına göre sürtünme katsayısının değişimi verilmiştir. Deneyleerde iç çapı 0.25m olan boru kullanılmıştır. İki pompalama istasyonu arasındaki uzaklık 7500m dir. Kapsül hızı 2.03m/s ve akış türbülanslı iken ( $Re=5.2 \times 10^5$ ), sürtünme katsayısı 0.0185 ( $\lambda$ ) olarak bulunmuştur. Kapsül debileri  $0.01m^3/s$ 'den  $1m^3/s$ 'ye kadar değişmiştir.  $d/D$  oranı 0.8 ve 0.9 olarak alınmıştır. Yüzey sürtünmesi nedeniyle ve boru elemanlarında oluşan kayıplar hesaplanarak gerekli pompa gücü bulunmuştur. Kayıplar hesaplanırken boru hatlarında küresel kapsül akışlarında sadece türbülanslı akış şartlarının geçerli olduğu kabulü yapılarak, Wood'un sürtünme katsayısı formülü Eşitlik 3.49'daki hali ile kullanılmıştır:

$$\lambda = 4(a + b Re^{-c}) \quad (3.49)$$

$$a = 0.26 \left( \frac{e}{D} \right)^{0.225} + 0.133 \left( \frac{e}{D} \right) \quad (3.50)$$

$$b = 22 \left( \frac{e}{D} \right)^{0.44} \quad (3.51)$$

$$c = 1.62 \left( \frac{e}{D} \right)^{0.134} \quad (3.52)$$

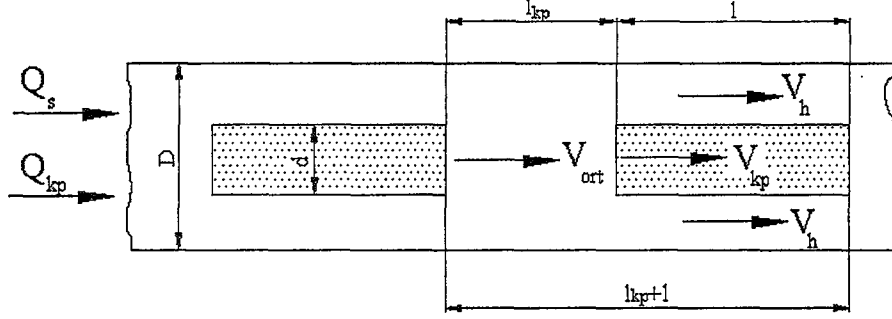
Yük kaybı:

$$(\Delta H)_{kr} = \frac{\lambda L V_{ort}^2}{2gD} (mSS) \quad (3.53)$$

ile hesaplanır.

### 3.3.2.2 Silindirik Kapsül Kullanılmış Çalışmalar

İlk olarak yatay bir boruda eşmerkezli silindirik kapsül treni akışı için kontrol hacmi oluşturularak (Şekil 3.4), sürüklenme faktörü açıklanmıştır. Ancak treni oluşturan kapsüllerin birbirleri ile temasta olduğu kabul edildiğinden ( $l_{kp}=0$ ), akış tek kapsüllü sistem gibi düşünülmüştür (Govier ve Aziz, 1972).



Şekil 3-5 Yatay bir boruda eşmerkezli silindirik kapsül treni akışı (Govier ve Aziz, 1972)

Tanımlanan kapsül debisi ve sıvı debisi sırası ile  $Q_{kp}$  ve  $Q_s$ 'dir. Süreklilik denklemi kullanılarak kapsül ve sıvının hızları şu şekilde yazılmıştır:

$$V_{kp} = \frac{4Q_{kp}}{\pi D^2} \quad (3.54)$$

$$V_s = \frac{4Q_s}{\pi D^2} \quad (3.55)$$

Kapsül ve sıvının beraber akışında sistemin ortalama hızı:

$$V_{ort} = \frac{4(Q_{kp} + Q_s)}{\pi D^2} = V_{kp} + V_s \quad (3.56)$$

olarak ifade edilmiştir.

Eşitlik 3.55 çap oranları cinsinden yazılırsa;

$$V_{ort} = V_{kp} k^2 \left( \frac{l}{l_{kp} + l} \right) + V_s \left( 1 - k^2 \frac{l}{l_{kp} + l} \right) \quad (3.57)$$

Kapsüller birbirleri ile temasta ise, sürüklenme faktörü (Hold-up Ratio):

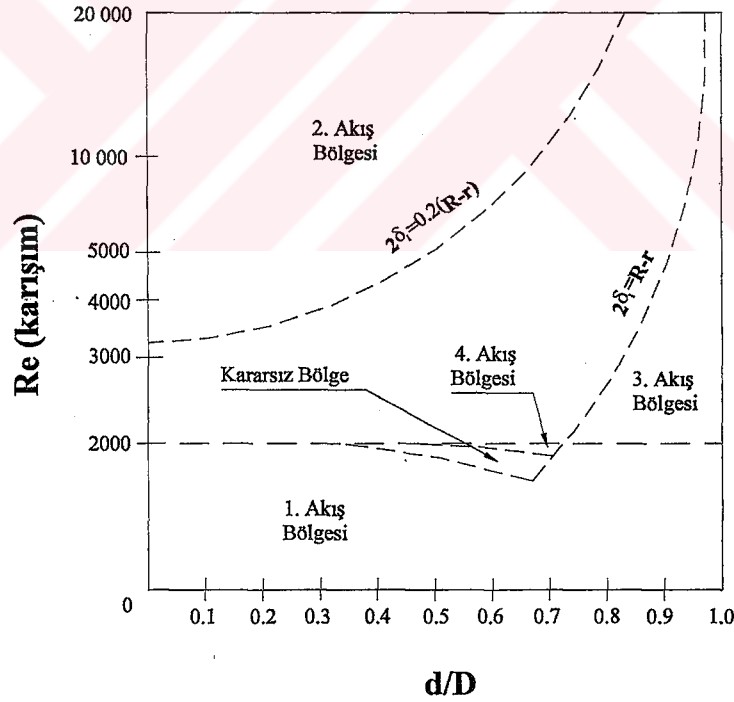
$$HR = \frac{V_{kp}}{V_s} = \frac{1 - k^2}{\frac{V_{ort}}{V_{kp}} - k^2} \quad (3.58)$$

olarak tespit edilmiştir. Hız oranı ise :

$$R_v = \frac{V_{kp}}{V_{ort}} \quad (3.59)$$

olarak alınmıştır.

Charles (1963), hem laminar hem de türbülanslı akışta taşıyıcı sıvı ile aynı yoğunluğa sahip uzun silindirik kapsülün yatay bir boru içinde, eşmerkezli akışına ait teorik bir analiz sunmuştur (Govier ve Aziz, 1972). Kapsül hızı ve kapsülün basınç düşüşü üzerinde analitik çözümler sağlanmıştır.  $d/D$  oranı ile karışımın  $Re$  sayısı arasında bir diyagram oluşturulmuş (Şekil 3.5), diyagram üzerinde kapsül taşıyıcı sıvı sisteminde mümkün olabilecek 4 akış bölgesi tanımlanmıştır.



Şekil 3-6 Eşmerkezli silindirik kapsül akışında oluşabilecek bölgeler (Charles, 1963)

1. Akış bölgesi (Model 1): Halka içinde ve kapsülsüz kısımlarda laminar akış
2. Akış bölgesi (Model 2): Halka içinde ve kapsülsüz kısımlarda türbülanslı akış

3. Akış bölgesi (Model 3): Halka içinde laminar akış, kapsülsüz kısımda türbülanslı akış

4. Akış bölgesi (Model 4): Halka içinde türbülanslı akış, kapsülsüz kısımda laminar akış

Model 1, Re sayısının 2000'den küçük değerleri ve tüm çap oranı değerleri için geçerlidir. Model 3 ise, yüksek Re ve yüksek k değerleri için geçerlidir. Laminar akışın olduğu boru ve silindir yüzeyleri arasında kalan halka için bir kalınlık tanımlanmış ( $\delta_l$ ) olup, bu kalınlık Eşitlik 3.59'da verilmiştir.

$$\frac{\delta_l}{D} = 31 \left( \frac{DV_{ort}}{\nu} \right)^{-\frac{7}{8}} \quad (3.60)$$

Sürtünme katsayısını tanımlamak için Blasius eşitliği kullanılırsa; pürüzlü yüzey için türbülanslı akışta deneysel sürtünme katsayısı:

$$f = 0.079 Re^{-0.25} \quad (3.61)$$

şeklindedir. Bu ifade  $3000 < Re < 100.000$  aralığında iyi sonuçlar vermektedir.

Şekil 3.5'de  $2\delta_l = R - r$  çizgisi laminar akış bölgesinin sınırını, halkadan geçen sıvının türbülanslı akışını ise  $2\delta_l = 0.2(R - r)$  çizgisi göstermektedir. Bu çizginin solunda kalan bölge için Model 2 uygulanabilir. Bu iki çizgi arasında kalan bölgede her iki kısım içinde geçerli olan laminar veya türbülanslı akış şartlarından biri yani Model 2 veya Model 3'ten biri kullanılır. Model 4, Re sayısının 2100'den daha düşük değerleri ve  $0.4 < k < 0.7$  aralığında iken küçük bir bölgede kullanılır. Bu bölgede gerçek hacme ait Re sayısı 2100'den daha az bir değer almasına rağmen bazen 2100 değerine kadar ulaşabilmektedir.

Model 1'deki yatay bir boruda laminar akış şartlarında birim boydaki basınç düşüşleri arasındaki oranı:

$$R_p = \frac{\left( \frac{\Delta P}{L} \right)_{kr}}{\left( \frac{\Delta P}{L} \right)_s} = \frac{1}{1 - k^4} \quad (3.62)$$

olmaktadır. Türbülanslı akım halinde ise (Model 2):



$$R_p = \left\{ \frac{0.82}{\left[ \frac{7}{4}k(1-k) + \frac{49}{60}(1-k)^2 + k^2 \right] (1-k)^{1/7}} \right\}^{1.75} \quad (3.63)$$

Kapsül olmayan kısımlarda akımın türbülanslı, kapsül ile boru yüzeyi arasında kalan halkada ise akımın laminar olması halinde (Model 3):

$$R_p = \frac{202}{(1-k^4) \left( \frac{DV_{ort}}{\nu} \right)^{0.75}} \quad (3.64)$$

şeklinde ifade edilmiştir.  $R_p$  akımın rejimine bağlıdır. Akımın Re sayısı ve çap oranına bağlı olarak Şekil 3.5'den belirlenmektedir.

Eşmerkezli olamayan kapsül ve taşıyıcı sıvının beraber hareketi sırasında oluşan basınç düşüşü için Govier ve Aziz (1972) aşağıdaki ifadeyi önermiştir.

$$\left( \frac{\Delta P}{L} \right)_{kr} = R_p \left( \frac{\Delta P}{L} \right)_s + f_{din} k^2 \frac{\rho_{kr} - 1}{\rho_{kr}} (1 - C_L) \cos \theta \quad (3.65)$$

$\rho_{kr}$  karışımın yoğunluğudur ve aşağıdaki ifade ile verilmiştir (Çeçen, 1976).

$$\rho_{kr} = k^2(s-1) + 1 \quad (3.66)$$

$(\Delta P/L)_s$  boru içinde sadece sıvı akışında birim boydaki basınç düşüşüdür.  $R_p$  değeri Re sayısı ve k oranına göre Şekil 3.5'den belirlenecektir. l/d oranı 6-12 arasında bulunan kapsüller için  $C_L$  aşağıdaki ifade ile hesaplanmaktadır:

$$C_L = 1 - \exp[0.02(V_{krt} - V_{ort})] \quad (3.67)$$

Burada  $V_{krt}$  kapsülün harekete başlamasına yol açan sınır hızı değeridir ve aşağıdaki ifadelerle hesaplanmıştır.

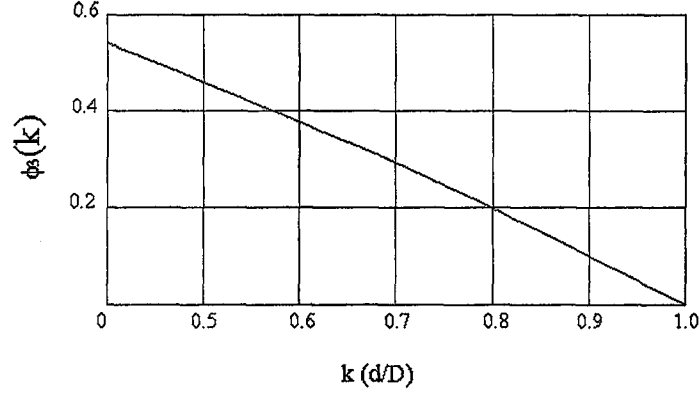
Laminar akış halinde:

$$V_{krt} = (1-k^2)\gamma(s-1)f_{st} \cos \theta \left[ \frac{(D-d)d\phi_3(k)}{24\mu} \right] \quad (3.68)$$

Türbülanslı akış halinde:

$$V_{krt} = (1 - k^2) \left[ g(s-1) f_{st} \cos \theta \left( \frac{(D-d)\rho}{\mu} \right) \frac{d\phi_3(k)}{0.12} \right]^{4/7} \quad (3.69)$$

$\phi_3(k)$ , çap oranı fonksiyonu ise Şekil 3.6'dan alınacaktır.



Şekil 3-7 Eşitlik 3.20 ve 3.21'deki  $\phi_3(k)$  fonksiyonu (Govier ve Aziz, 1972)

Halka içindeki akışkanın hızı ve kapsül hızı arasındaki ilişkiyi sağlamak için aşağıdaki eşitliklerden yararlanılmıştır. Krayer ve Ellis'in (1970) yaptığı ölçümler sonucunda, kapsül taşınımı sırasındaki Darcy-Weisbach sürtünme katsayısının, laminar akış halinde:

$$\lambda = \frac{38.4}{Re} \sim \frac{64}{Re} \quad (3.70)$$

Türbülanslı akış halinde:

$$\lambda = \frac{0.20}{Re^{0.25}} \sim \frac{0.316}{Re^{0.25}} \quad (3.71)$$

arasında değiştiği görülmüştür. Bu ifadelerdeki Re sayısı:

$$Re = \frac{(D-d)V_e \rho}{\mu} \quad (3.72)$$

şeklinde kurulmuş olup  $V_e$  halka içindeki akışkanın efektif hızıdır.  $V_e$  ve  $V_h$  yazılırsa:

$$V_e = V_h - aV_{kp} \quad (3.73)$$

$$V_h = \frac{V_{ort} - k^2 V_{kp}}{1 - k^2} \quad (3.74)$$

Laminar akımda;  $a=0.05+0.455k$ , türbülanslı akımda  $a=0.35$  olarak bulunmuştur. Yukarıdaki ifadelerin kullanılabilmesi için kapsül hızının bilinmesi gerekmektedir. Bu hesaplamalar yapılırken kapsüllerin birbirini çok sık aralıklarla takip ettiği ve kapsüllerin arasındaki uzaklığın basınç düşüşlerini etkilemediği kabul edilmiştir.

Ellis ve Kruyer (1974), kapsül trenine ait deneysel çalışmasında boru çapı 16mm ve 102mm arasındadır. Çalışma yapılan silindirik kapsüllerin uzunluğu 0.3m ve 0.6m olup tren 4 kapsülden ibarettir. 0.8 ve 0.95 çap oranlarında çalışılmıştır.

Silindirik kapsüllerde ön kısmın yukarı kalkma eğilimlerinin olması kapsül hızını etkilemekte ve kayıplar artmaktadır. Bu çalışmada, silindirik kapsüllere ait basınç düşüşlerinin azalması için, kapsülün etrafına çevresel bir bant geçirilmiştir. Böylece kapsül eksen ve boru eksen arasındaki açı azalmış, halka içinde kalan akışkanın kapsüle uyguladığı basınç artmış, kesme kuvvetleri küçülmüş ve kayıplar azalmıştır. Kapsül akışının oluşturduğu basınç düşüşünü azaltmak için bu çalışmada kullanılmış bir başka yöntem de kapsüllerin içinde hava boşluğu oluşmasının sağlanmasıdır. Bu sayede, kapsül yoğunluğu ve buna bağlı olarak basınç düşüşü de azalmaktadır. Silindirik kapsüllerde yoğunluk arttığı zaman, hız oranı düşmüştür. Bu durum kısmen düşük hızlarda meydana gelmektedir.

### 3.3.2.3 Değişik Şekillerde Kapsül Kullanılmış Çalışmalar

Vlasak (1999), deneysel çalışmasında yatay bir boru içinde anormal şekilli (yüzeyine helisel kanallar açılmış içleri boş, yarı sert yada yumuşak silindirik kapsüller) kapsül treninin akış davranışını incelemiştir. Kapsül treni akışlarında hız oranı ve basınç düşüşüne etki edecek parametreler belirlenerek basınç ve hız ölçümleri deneysel olarak bulunmuştur. Kapsüllerin içi boş olup, değişik yoğunlukta sıvılar ile doldurulmuştur. Yarı sert kapsüllerin boru içindeki pozisyonu (yerleşimi) ve şekil değişimi kapsül üzerine etkiyen enine hidrodinamik kuvvetlerin dağılımı ve etkisini açıklamak için yararlı olmuştur.

Basınç ölçümleri için fark basınç transmitteri kullanılmıştır. Ortalama akış hızı, kapsül-boru çap oranları, görünür yoğunluk ve hacimsel konsantrasyonun, basınç düşüşü, hız oranı ve kapsül pozisyonuna etkilerini araştırmıştır.

Ölçümler iç çapı 50mm olan yatay düz pleksiglas bir boruda yapılmıştır. Taşıyıcı akışkan olarak su kullanılmıştır. 16.5m'lik test bölgesinde, basınç düşüşü ölçümleri 2m'lik kısımda yapılmıştır. Kapsüller sert ve yarı sert malzemelerden imal edilerek içleri farklı yoğunluklardaki (1.15-1.25-2.15) sıvılar ile doldurulmuştur. Ortalama hız aralığı 0.5-3m/s ve

çalışma yapılan Re sayısı aralığı  $2.5 \times 10^4 < Re < 1.5 \times 10^5$  olarak belirlenmiştir. Her bir kapsül treni 8-10 adet kapsül içermiştir.  $d/D$  oranları 0.56-0.76,  $l/d$  oranı 4, 5 ve 6 olmuştur.

Tek kapsülün hız oranı yoğunluktaki artış ile birlikte azalmıştır. Akış hızı arttığında hız oranı da artmıştır. Kapsül treninin akış mekanizması ise bir tek kapsülün akış mekanizmasına benzemektedir. Ancak, kapsül treninin ulaştığı hız oranı, tek kapsülün hız oranına göre biraz daha küçüktür. Bunun nedeni, treni oluşturan kapsüllerin birbirleri ile karşılıklı etkileşim içinde olmalarıdır. Bu durum özellikle, daha yüksek kapsül konsantrasyonlarında ve yoğunluğu fazla olan kapsüllerde görülmektedir.

Ortalama hızın hız oranı üzerindeki etkisi ortalama hızın artması ile birlikte düşmüştür. Bu durum özellikle büyük çap oranlarında görülmektedir. Treni oluşturan kapsüllerin yoğunluğu arttıkça hız oranında azalma meydana gelmiştir.

Kapsül treninin boru yüzeyinden ayrılması ve temas alanının bulunmaması hız oranının birden büyük olması ile sağlanmaktadır. Genel olarak  $R_v < 1$  iken çap oranının artması ile birlikte kapsül hızında arttığı,  $R_v > 1$  iken ise kapsül hızının boru çapından bağımsız olduğu görülmüştür. Hız oranı birden büyük iken, kapsül boru yüzeyinden ayrılır ve taşıyıcı sıvı tarafından asılı durumda taşınmaya başlar. Bu şartlar altında, küçük çap oranına sahip kapsüller büyük çap oranına sahip kapsüllere kıyasla daha hızlı hareket etmişlerdir.

Buckingham'ın boyut analizi temel alınarak bir sıvı yardımıyla kapsül akışı, sisteme ait iki hidrodinamik karakter arasındaki iki fonksiyonel ilişki ile tanımlanmıştır. Bu karakterlerden biri hız oranı diğeri ise boyutsuz basınç düşüşü ifadesidir:

$$\Psi = \frac{i_{kr} D}{\rho V_{ort}^2} \quad (3.75)$$

Buradaki  $i_{kr}$  kapsül-sıvı karışım akışında birim boydaki basınç düşüşüdür.

Sisteme ait bağımsız değişken parametreleri ise; kapsül çapı  $d$ , kapsül uzunluğu (kapsül silindirik ise), kapsül şekil faktörü (B), kapsül yoğunluğu, boru çapı  $D$ , boru eğimi, kapsül yüzey pürüzlülüğü, boru yüzey pürüzlülüğü, taşıyıcı sıvının sürtünmeyi azaltıcı etkisini veren yağlama faktörü (c), taşıyıcı sıvının viskozitesi, kapsül ve taşıyıcı sıvının beraber akışında ortalama hız  $V_{ort}$ , kapsül hızı  $V_k$  ve dış kuvvetlerdir. Tek katı kapsül içeren sistemin davranışını bu parametreler ile belirlemek mümkündür. Eğer kapsül yarı sert ise değişkenlere, kapsülün sertlik faktörünün de (KS) eklenmesi gerekmektedir.

Kapsül trenini ise iki parametre tanımlar bunlar trendeki kapsül sayısı ( $m$ ) ve kapsüller arası uzaklıktır  $l_{kp}$ . Genel olarak sürtünme katsayısı şu şekilde ifade edilmiştir.

$$f = f\left(c, \frac{e_b}{D}, \frac{e_{kp}}{d}\right) \quad (3.76)$$

Boru-sıvı-kapsül sisteminin sürtünme faktörüne, taşıyıcı sıvının özellikleri, boru ve kapsülün yüzey pürüzlülüğü ve malzemesi etkili olur. Kapsül treni için hız oranını tanımlayan boyutsuz parametreler ise aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\frac{V_{kp}}{V_{ort}} = f\left(\frac{d}{D}, \frac{l}{d}, s-1, Re, Fr, f, \theta, B, KS, \frac{l_{kp}}{l}, m\right) \quad (3.77)$$

$d/D$  ve  $l/d$  sırası ile çap ve uzunluk oranlarıdır. Treni oluşturan kapsüller küre ise  $l/d$  parametresi oluşmayacaktır.  $s-1$  görünür yoğunluktur.  $l_{kp}/l$  ortalama kapsül aralığıdır. Taşıyıcı sıvının  $Re$  sayısı ve kapsülün Froude sayısı sırası ile:

$$Re = \frac{V_{ort} D \rho}{\mu} \quad (3.78)$$

$$Fr = \frac{V_{kp}^2}{gd} \quad (3.79)$$

şeklindedir. Boyutsuz parametreler, boyutsuz basınç düşüşü için yazılacak olursa:

$$\Psi = \frac{i_{kr} D}{\rho V_{ort}^2} = f\left(\frac{d}{D}, \frac{l}{d}, s-1, Re, Fr, f, \theta, B, KS, \frac{l_{kp}}{l}, m\right) \quad (3.80)$$

Deneysel çalışmalarda bu parametrelerin bazıları hesaplamalara katılmaz. Eğer boru yataysa  $\theta=0$ , kapsüller sert ve içi dolu ise  $KS=0$ , küresel ise  $B=0$  alınacaktır. Bazı etkenler ise deneyler sırasında hep sabit kalır. Boru çapı ve kapsül malzemesi değişmiyorsa sürtünme faktörü, taşıyıcı akışkan ve kapsül malzemesi değişmiyor ise yoğunluklar ve taşıyıcı sıvının viskozitesi sabit kalacak parametrelerdir.

Kapsül treni akışında basınç düşüşüne etki edecek önemli bir değişken ise kapsülün hacimsel konsantrasyonudur. Kapsül konsantrasyonu; çap oranına, görünür yoğunluğa, kapsül ve sıvı hızlarına bağlı olarak değişiklik gösterecektir.

### 3.4 Genel Bakış

- 1) Çamur akışları ile yapılmış çalışmalar (katı madde yoğunluğunun sudan düşük ya da fazla olduğu durumlarda) kapsül akışları hakkında bilgi vermez. Çamur akışlarında kritik hızın altına inildiği durumlarda hareketli yatak akımı oluşur. Bu şartlarda basınç düşüşü artar. Çamur akışlarında çalışma yapılan hızlar ilk andan itibaren kritik hızın üstünde seçilmeli ve bu hızın altına düşürülmemelidir. Düşük hızlarda hareketli yatak akışının meydana gelmesi çamur akışlarını kapsül akışlarından ayıran en belirgin özelliktir.
- 2) Polisitiren çamuru ile yapılmış deneylerde yapışma olmadığı için kar ya da buz çamuru ile yapılmış olan deneyleri tam olarak temsil etmez.
- 3) Kapsüller ile yapılan tüm çalışmalarda (gerek tek kapsül gerekse kapsül treni olsun) kapsüllerin yoğunlukları taşıyıcı sıvıdan büyük seçilmiştir. Bu çalışmalar yoğunluğu taşıyıcı sıvıdan daha az olan kapsül akışları hakkında yeterli bilgiyi vermez.
- 4) Silindirik kapsüller ile yapılmış çalışmalar ile ulaşılan sonuçlar, küresel kapsül akışları için kullanılamaz. Çünkü silindirik kapsülün hareket mekanizması, küresel kapsülden farklıdır. Küresel kapsülün geometrisi nedeniyle kalkış hızları daha küçüktür, çabuk ivmelenirler. Silindirik kapsüllerin boru yüzeyi ile temas alanı fazla olduğundan, harekete başlamaları için daha yüksek hızlar gerekir. Aynı miktar katının naklinde silindirik kapsül için daha fazla güç gerekmektedir. Küresel kapsüllerin ilk hareketinden sonra nakil hızları daha düşüktür çünkü yüzey sürtünmesi silindirik kapsüle oranla daha azdır. Silindirik kapsüllerde işletme hızı belli değerler arasında olmalıdır. Düşük veya çok yüksek hızlarda silindirik kapsülün uç kısımlarında kalkma olur. Bu durumda basınç düşüşleri artar. Silindirik kapsüllerin uzunluğu ve uç şeklinin basınç düşüşlerine etkisi vardır.
- 5) Tek kapsül hareket mekanizması (katı madde yoğunluğunun sudan az yada fazla olduğu durumlarda) kapsül treni akışlarını temsil etmez. Kapsül treni akışı, treni oluşturan her kapsülün bireysel davranışı ve birinin diğeri üzerindeki hidrodinamik etkisinin bileşkesidir. Kapsül treni akışında, kapsül konsantrasyonunun basınç düşüşü üzerinde önemli bir etkisi vardır.
- 6) Dikey borular içindeki kapsül hareketleri yatay borular içindeki hareketten farklıdır. Dikey borulardaki küresel kapsül akışlarında sadece öteleme hareketi için bir enerji kaybı oluşmaktadır. Oysaki, yatay borular içindeki küresel kapsül akışlarında hem öteleme hem de dönme hareketi için bir enerji kaybı oluşur. Kesme gerilmeleri fazladır.

Mevcut çalışmalar, yoğunluğu sudan az olan küresel kapsül treni akışları için yeterli bilgiyi vermemektedir. Akış davranışı ve akım parametreleri farklılık gösterecektir. Dolayısıyla mevcut çalışmalarla ulaşılmış sonuçlar, deney sonuçlarını simüle etmeyecektir.

### 3.5 Soğutma Sistemlerinde Buz Kapsüllerinin Kullanımı

Bölgesel soğutma sistemlerinde buz kullanımına yönelik yapılmış, teorik ve deneysel çalışmalarda sadece çamur akışlarının özellikleri ve buna bağlı akış parametreleri araştırılmış, basınç düşüşleri ve dalgalanmalarına ait bilgiler rapor edilmiştir. Buz-su çamur akışlarında sürtünmeyi azaltmak için buz konsantrasyonunun artırılması gerektiği ifade edilmiştir. Ancak bu alanda yapılmış teorik veya deneysel çalışmaların hiçbirinde boru çapına çok yakın çaplarda küresel kapsül şekli verilmiş buzların basınç düşüşlerine etkisi ele alınmamıştır.

Buz-su çamuru karışım akışlarında düşük hızlarla çalışıldığında asılı taneler borunun üst kısmına toplanmakta, boru yüzeyi ile temas alanı artarak ilerlemekte, sürtünme arttığından basınç düşüşü de artmaktadır.

Küresel kapsül şekli verilmiş buzların borulardaki akışı sırasında, buz kapsüllerinin boru yüzeyi ile temas alanı noktasal olacak, sürtünme azalacak ve buna bağlı olarak karışımın basınç düşüşü azalacaktır.

Soğutma sistemlerinin boru hattı dizaynı küresel buz kapsüllerinin kullanımına elverişli olarak yapıldığında, bu tip sistemler buz-su çamurunun kullanıldığı sistemlere kıyasla daha fazla soğutma kapasitesine sahip olacaklardır. Çünkü, statik buz konsantrasyonu (kapsüller aralıksız dizilmişse)  $d/D$  oranı 0.8 seçildiği takdirde 0.43 olacaktır ve buz kapsülleri boru hattı boyunca daha uzun süre erimeden kalabilecektir.

Buz-su çamurları ile yapılmış çalışmalar göstermiştir ki, yüksek konsantrasyonlar ve akış hızlarında kayma hızlarında da bir artış olmakta ve bu durum tanelerin ayrılıp dağılmasını önlemektedir. Bu şekilde sistemde oluşan basınç düşüşlerinin sadece su akışında oluşan basınç düşüşüne yaklaştığı tespit edilmiştir. Ulaşılan bu sonuç, bölgesel soğutma ağlarında küresel buz kapsülleri kullanılmasını destekleyici yöndedir.

Buz-su çamurunun kullanıldığı çalışmalarda, yüksek tane konsantrasyonlarında ve düşük hızlarda buz tanelerinin yapışarak boru üst yüzeyi boyunca hareket eden bir kütleyle döndüğü gözlenmiştir. Bu durumda basınç düşüşleri artmıştır. Yine bu şekildeki akım şartlarında buz tanelerinin boru ekleme elemanlarında tıkanmalara yol açtığı rapor edilmiştir.

Küresel buz kapsüllerinin (veya ince plastik kılıf içindeki küresel buz kapsüllerinin) şekil faktörü belirlidir ve boru içinde akım etkisi ile oluşan basınç değişimlerine dirençlidir. Dolayısıyla boru geometrisi ve akım şartlarındaki değişimler boru içindeki buz kapsüllerinin akış karakteristiğini etkilemez. Tane dağılımı veya birikmesi oluşmayacağından, boru ekleme elemanlarında tıkanma problemleri ile karşılaşılacaktır.

Buz-su çamuru değişik akış hızlarında farklı davranış göstermektedir. Akış hızı belli bir değerin altına düştüğünde ( $<1\text{m/s}$ ), buz taneleri dağılma eğilimine girer, boru yüzeyi ile buz tanelerinin temas alanı artar (katı-katı sürtünmesi). Oysa küresel buz kapsülü ile boru yüzeyi gibi iki sert yüzey arasında sıkışan akışkan buz kapsülünün boru tabanı üzerinde kaymasını sağlayacaktır (katı-sıvı sürtünmesi). Kapsül ile boru cidarı arasında kalan sıvı tabakası hidrodinamik yağlama etkisi gösterecektir ve sürtünme kayıpları azalacaktır.

Görülmektedir ki, bölgesel soğutma sistemlerinde küresel buz kapsüllerinin etkin bir biçimde kullanılması birçok avantajı da beraberinde getirecektir.

Ancak önceki çalışmalarda elde edilen akış özellikleri ve akım parametreleri çamur akışları için elde edildiği için, küresel buz kapsüllerinin kullanılacağı bölgesel soğutma sistemlerinin dizaynı için kullanılamaz. Bu nedenle, pratikteki şartlara yakın şartlarda laboratuvar deneyleri yaparak, yoğunluğu sudan az olan küresel kapsülün iki fazlı akış özellikleri ve akış parametreleri hakkında bilgi toplamak zorunludur.

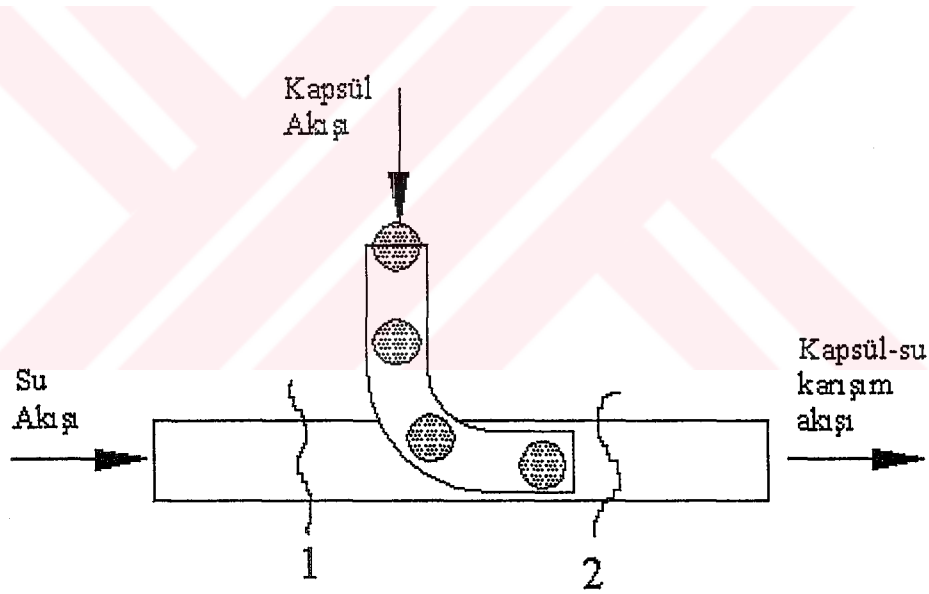


#### 4. ÖN DENEYLER

Deney tesisatı kurulmadan önce, kapsüllerin boru hattına geçişinin ne şekilde olacağını, pompa çıkışındaki basıncın boru hattı boyunca oluşacak kayıpları karşılayıp karşılamayacağını görmek için kapsül-su karışım akışına benzer özellikte 3 aşamalı 2 ön deney gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, nelerin araştırmaya açık oluşu, nelerin uygulanabilir ya da revize edilmesi gerektiği konusunda bilgiler vermiştir.

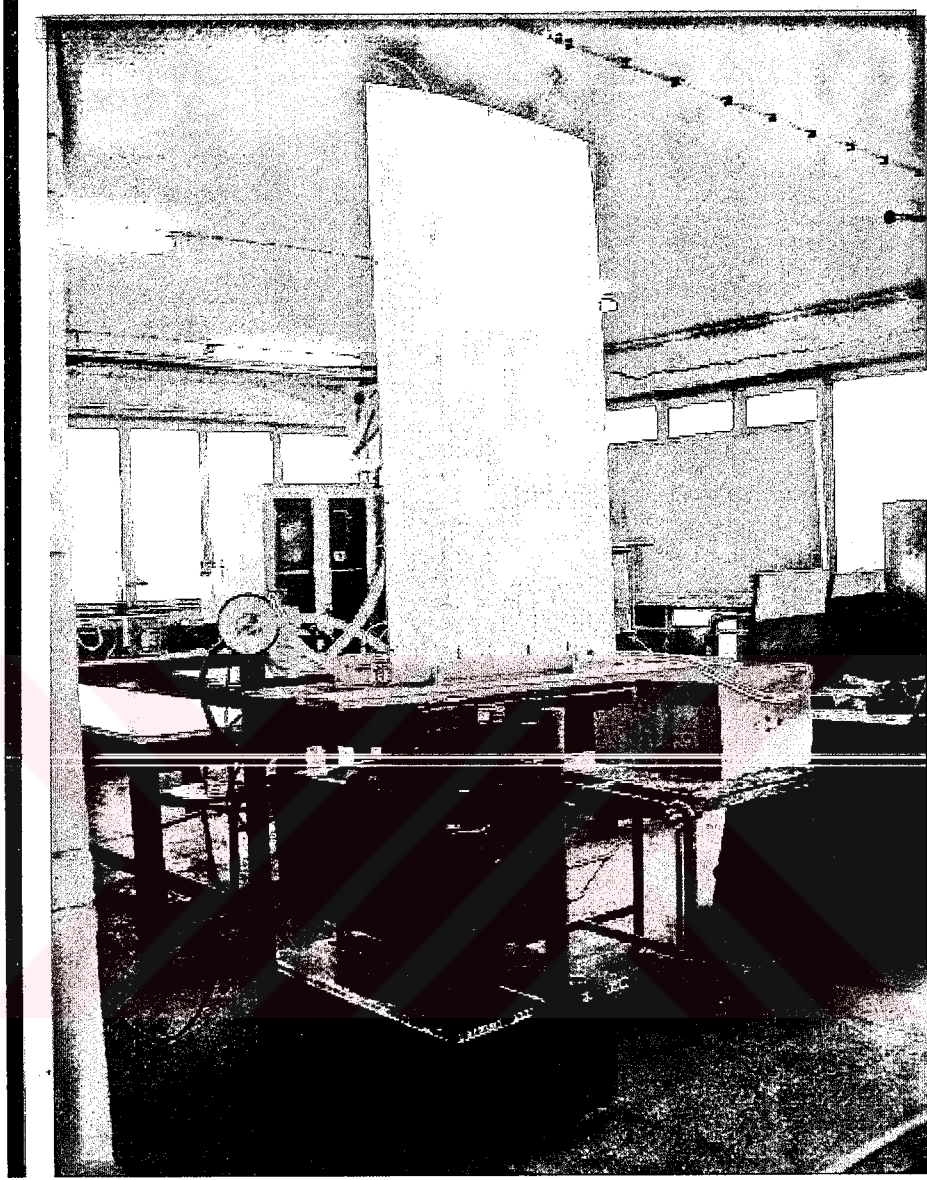
##### 4.1 Birinci Ön Deney

Ölçüm bölgesine kapsül geçişi işleminin problemsiz bir şekilde ve minimum kayıpla yapılabilmesi için kapsüllerin sisteme dahil olduğu boru konstrüksiyonunun Şekil 4.1'deki gibi olması gerektiği düşünülerek, bu bölgedeki boru çaplarının 2 kesitinde düşük basınç sağlayacak oranlarda olmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 4-1 Düşük basınç bölgesi boru konstrüksiyonu

Oluşan basınç düşüşü ve akım hızının etkisi ile kapsüllerin sisteme kolaylıkla dahil olması amaçlanmıştır. Ön deneyler için hazırlanan tesisatta, belli noktalara yerleştirilmiş piyezometre borularındaki su yükseklikleri okunarak bu noktadaki basınçlar bulunmuştur.



Şekil 4-2 Birinci ön deney tesisatı

Tesisatta boru girişindeki basınç (Şekil 4.1) 210mmss (1), borunun iç çapı 26mm olup sistemde dolaşan debi miktarı  $0.000325\text{m}^3/\text{s}$  olarak bulunmuştur. Düşük basınç bölgesi oluşturmak için yeterli olan basınç 100mmss (2) olarak belirlenmiştir. Süreklilik ve Bernoulli denklemleri kullanılarak boru giriş kesitindeki hız 0.6m/s ve basınç düşüşü olan bölgedeki hız 1.6m/s olarak bulunmuştur.

Elde edilen hız değerleri ile kapsül besleme işleminin yapılacağı boru çapları ve bir sonraki ön deneyde kullanılacak kapsülün çapı belirlenmiştir. Tesisatta vakum bölgesi oluşumu için Şekil 4.1'deki gibi bir boru konstrüksiyonunda yatay boru 26mm iken kapsüllerin beslendiği boru çapının 20mm olması gerektiği görülmüştür.

Düşük basınç bölgesi oluşumu için gerekli olan boru çapı oranları belirlendikten sonra, prototip deney tesisatı için polipropilen borular ile bir model oluşturulmuştur (Şekil 4.2 ve Şekil 4.3). Bu modelde, yatay ana boruya yerleştirilen kapsül girişi borusunun yerine uç kısmına yuvarlak profil verilen ahşap bir kapsül yerleştirilmiştir.

Yatay ana boru iç çapı 26mm iken, kapsül çapı 20mm olarak hazırlanmıştır. Borunun giriş ve çıkış kısımlarına içten dışlar açılarak ve bu kısımlara nipel yerleştirilerek, hortumlarla sisteme bağlanmıştır. Santrifüj bir pompa tarafından beslenen tesisat kapalı devre olarak çalıştırılmıştır. Sistemden geçen su miktarı ayarı, debi ayar vanası ile yapılmıştır.

Basınç değişimlerini gözlemek için, yatay boruda belirli mesafelerde açılmış prizlere piyezometrik borular yerleştirilerek her noktadaki piyezometrik yük değerlerinin okunması sağlanmıştır. Değişik debilere tekabül eden piyezometre borularındaki su seviyeleri ölçülerek gerekli hesaplamalar yapılmıştır.

Yapılan ölçümler ve hesaplanan değerler Çizelge 4.1'de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde 2.ölçüm noktasında basınç düşüşü olduğu görülmektedir. Basınç oranları dikkate alındığında, ulaşılan sonuçların ana tesisatta ortaya çıkan enerji kayıplarını karşılayacağı, yapılan hesaplarla da tespit edilmiştir.

Ölçüm sonuçlarına göre tespit edilen basınç düşüşü 0.53mss ve sistemde dolaşan debi miktarı  $0.000325\text{m}^3/\text{s}$ 'dir. Kapsül ve boru cidarı arasında kalan halkanın alanı hesaplanarak halka içindeki hız değerine ulaşılmıştır. Elde edilen bilgilerden deneysel ani genişleme kayıp katsayısı bulunmuştur. Teorik ani genişleme kayıp katsayısı ise boru ve kapsül çapları bilindiğinden tablodan alınmıştır.

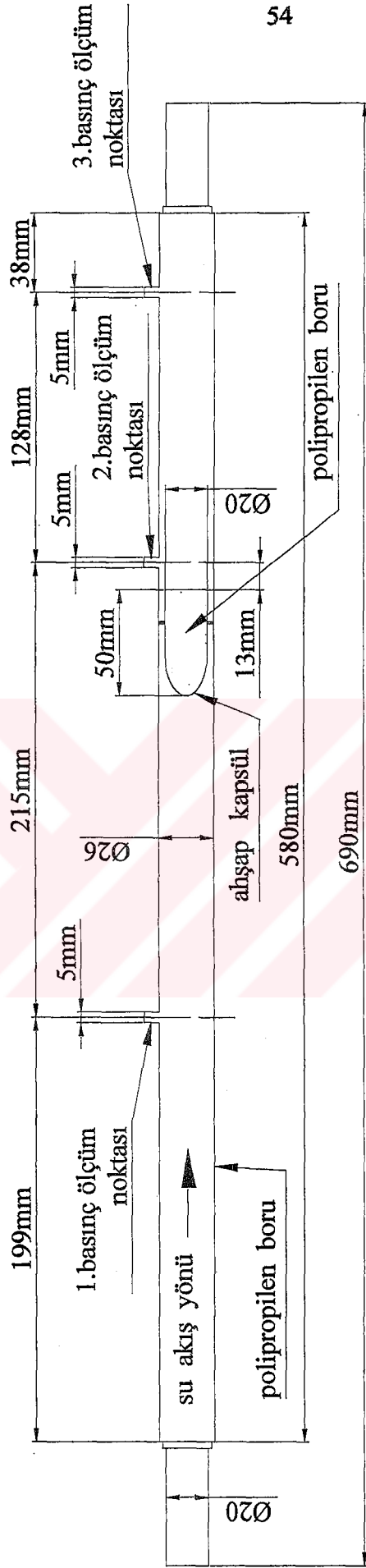
Sonuçta deneysel olarak elde edilen ani genişleme kayıp katsayısı ile aralarında bir oran kurulmuştur.  $K_{\text{DAG}}/K_{\text{TAG}}=0.41$  olarak bulunan bu oran gerçek tesisata ait boru çaplarına uyarlandığında, deneysel ani genişleme kayıp katsayısına bağlı enerji kaybını bulmamızı sağlamıştır.

Bernoulli ve süreklilik denklemleri uygulanarak gerekli hesaplamalar yapıldığında pompa çıkışındaki basıncın hem kayıpları karşıladığı hem de basınç düşüşü ölçüm bölgesi için yeterli

bir basınç olduğu görülmüştür.

Pompa çıkış basıncı (4.45mss), pompa emme hattındaki su hızı (2.5m/s) ve tesisatta dolaşan debi bilinmektedir ( $0.079\text{m}^3/\text{s}$ ). Bernoulli denklemi uygulanarak, kapsül besleme borusu ile içine yerleştirileceği yatay boru arasındaki su hızı 9.58m/s bulunmuş ve süreklilik denklemi kullanılarak halka alanı hesaplanmıştır ( $0.00825\text{m}^2$ ).





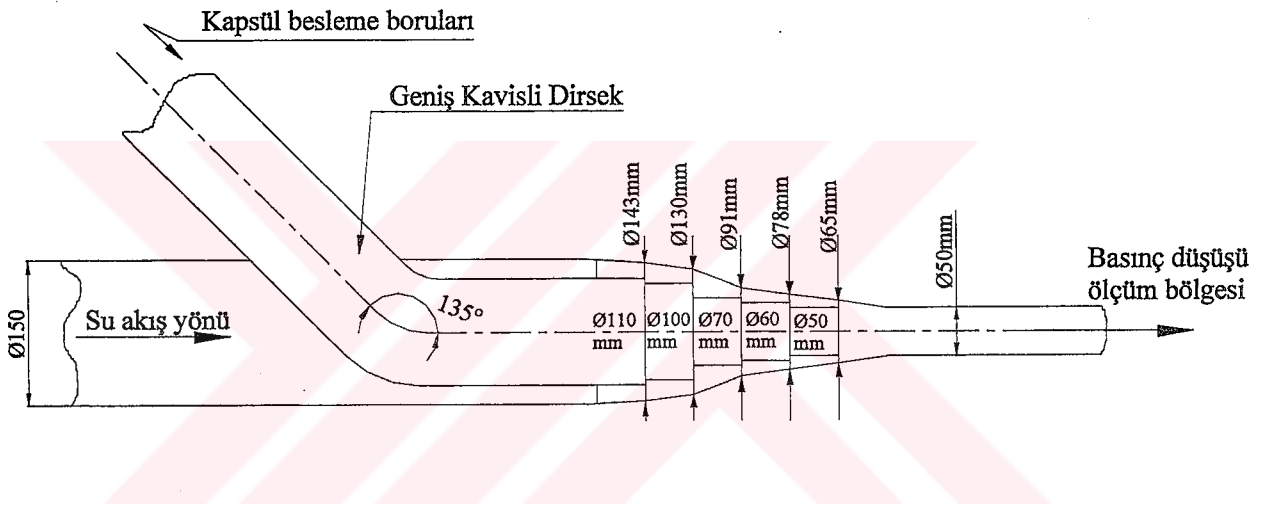
Şekil 4-3 Birinci ön deney tesisatı boru kesiti

Çizelge 4-1 Birinci ön deneye ait ölçüm sonuçları

Ölçüm No	$h_1$ (mmSS)	$h_2$ (mmSS)	$h_3$ (mmSS)	$H_1-h_2$ (mmSS)	$h_3-h_2$ (mmSS)	t (s)	Q ( $m^3/s$ )	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$V_3$ (m/s)
1	1200	430	670	770	240	13	0,000577	1,086	4,034	3,4
2	1170	420	660	750	240	13,582	0,000552	1,04	3,97	3,329
3	1070	370	590	700	220	14,194	0,000528	0,995	3,836	3,225
4	920	290	480	630	190	15,153	0,000494	0,932	3,636	3,08
5	780	210	390	570	180	15,809	0,000474	0,893	3,46	2,9
6	670	150	310	520	160	17,468	0,000429	0,8	3,292	2,77
7	480	50	180	430	130	19,528	0,000384	0,723	2,99	2,53

Sonuca göre, bölgede düşük basınç sağlanabilmesi için kapsüller iç çapı 100mm olan bir boru ile sisteme bırakılıyorsa, bu borunun yerleştirileceği yatay borunun iç çapının ~143mm olması gerektiği tespit edilmiştir. Çalışma yapılacak boru çapları bilindiğinden gerçek tesisata ait teorik ani genişleme kayıp katsayısı kolaylıkla bulunmuştur.

Daha önce hesaplanan ani genişleme katsayıları oranı kullanılarak gerçek tesisattaki deneysel ani genişleme kayıp katsayısına ulaşılmıştır. Buradan enerji kayıpları hesaplandığında, pompa çıkışındaki basıncın kayıpları karşılamak için yeterli olduğu görülmüştür. Belirlenen çap oranı çalışma yapılacak boru çaplarına göre düzenlendiğinde kapsül besleme bölgesi için ilk aşamada düşünülen boru konstrüksiyonu Şekil 4.4'deki gibi olmuştur.



Şekil 4-4 Ön deneylere göre belirlenmiş düşük basınç bölgesi boru ölçüleri

## 4.2 İkinci Ön Deney

Birinci ön deney ile oluşturulmak istenen düşük basınç bölgesine ait boru çapları oranı dikkate alınarak Şekil 4.5'te görülen tesisat özel olarak hazırlanmıştır. Deneylerde, gerçeğe uygun olması için, yoğunluğu sudan düşük ( $0.96\text{gr/cm}^3$ ) polietilen malzemedeki boncuklar kullanılmıştır.

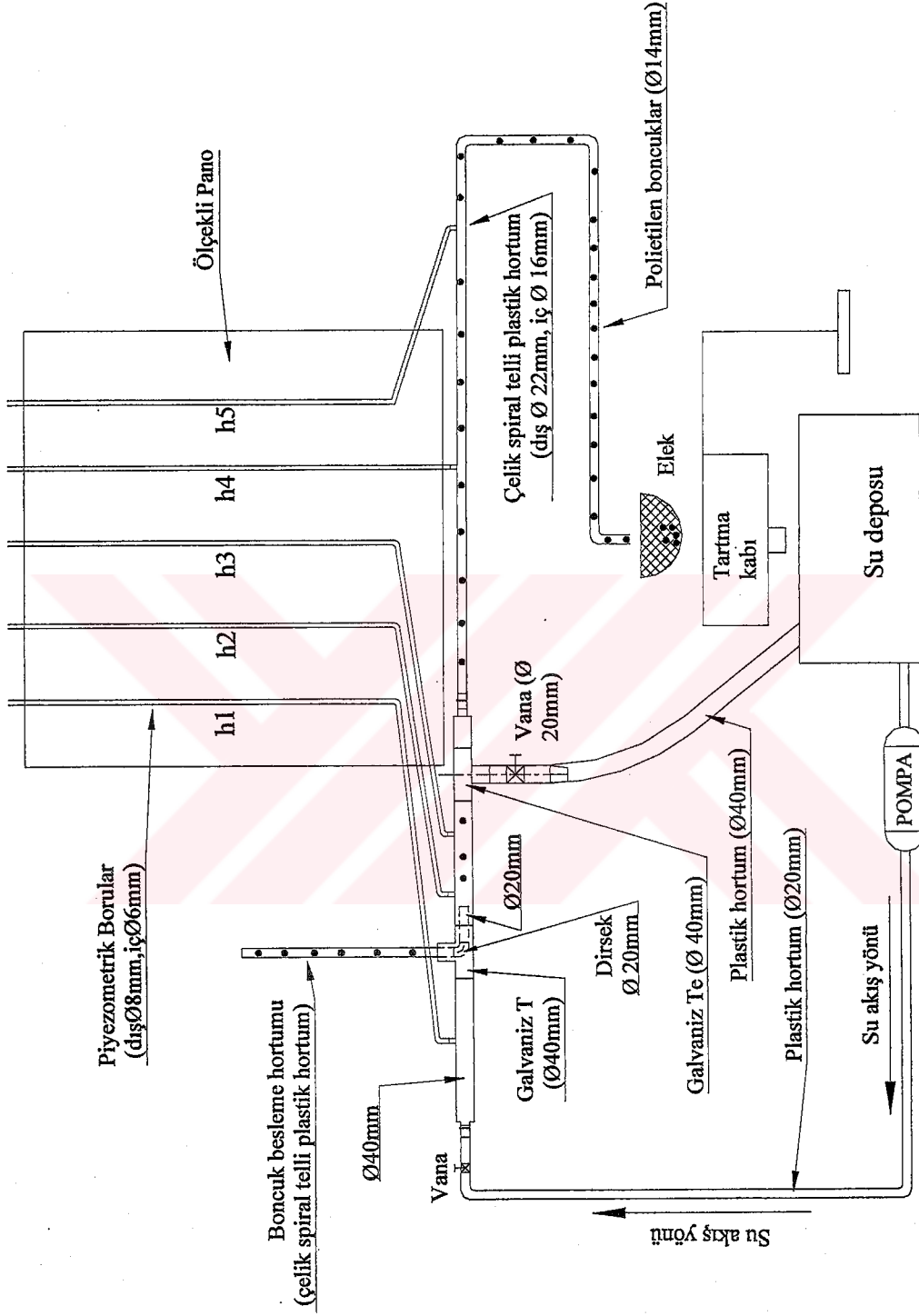
Düşük basınç bölgesi oluşturularak boncukların sisteme emilişi test edilmiştir. Kapsül-su akışının bir benzeri sağlamak için, boncuk çapı 14mm ve içinden geçeceği hortumun iç çapı 16mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4-5 İkinci ön deney tesisatı

Bu deneyde boncuk besleme işlemi el ile yapılmıştır. Boncukların tesisata girdiği noktadan sonra yerleştirilen vana ile istenilen oranlarda basınç düşüşü sağlanmıştır. Bu işlemler yapılırken farklı  $Q_A$  debilerinde su tahliye hortumundan depoya verilmiştir (Şekil 4.7). Tüm debiler ağırlık tartma yöntemine göre hesaplanmıştır. Tahliye işlemi yapılırken, boncukların tahliye hortumuna geçmemesi için  $T_e$  bağlantısının içine tel süzgeç yerleştirilmiştir.





Şekil 4-6 İkinci ön deney tesisatı şematik görünüşü

#### 4.2.1 Su Akışı Sırasında Belli Noktalardaki Statik Basınçların Ölçümü

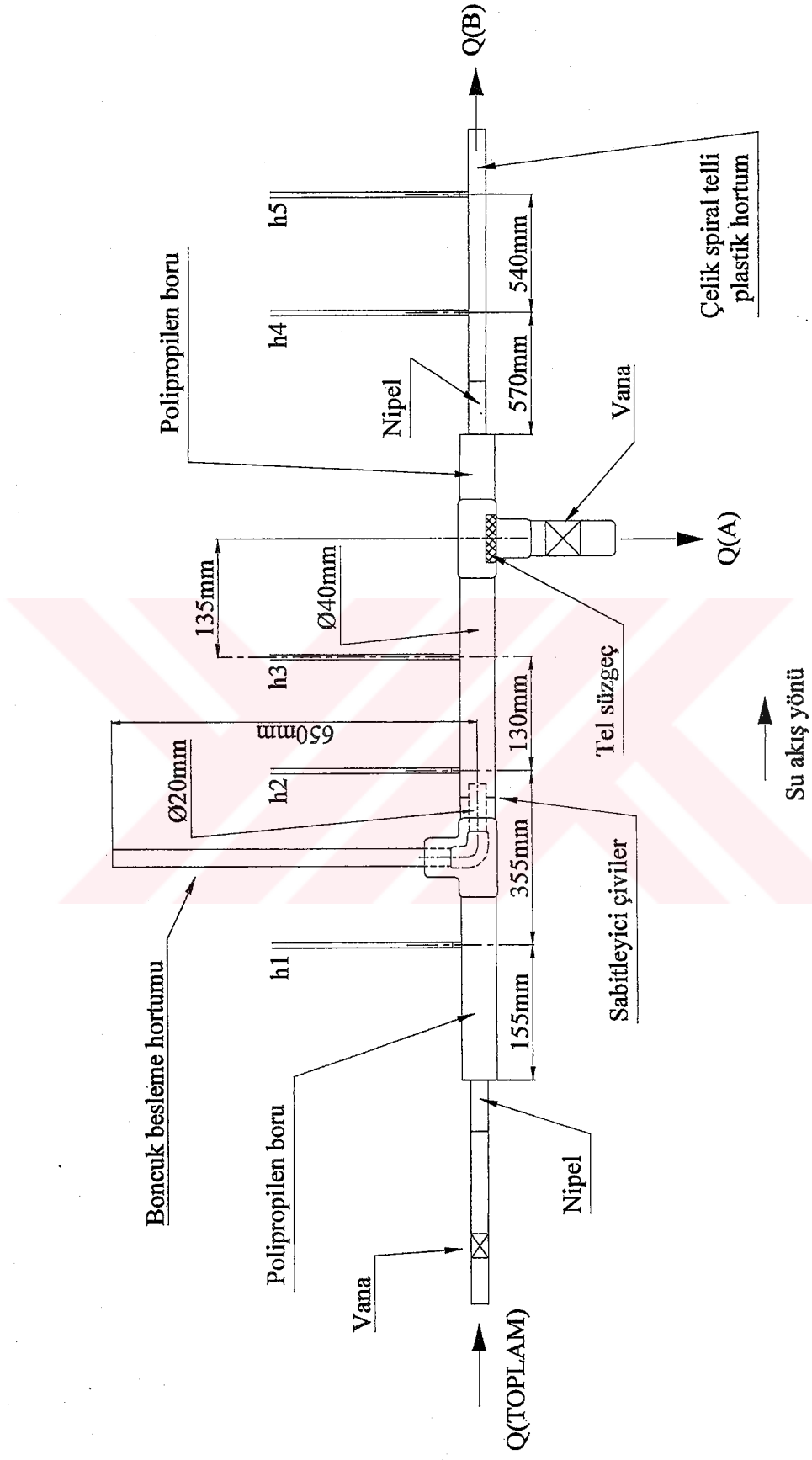
- 1) Tesisatın su giriş ve su çıkış noktaları kapatılarak, boncukların verildiği hortumdan statik basınç ölçümü yapılacak boru hattının içine su takviyesi yapılmıştır.
- 2) Piyezometre borularında ve boncukların verildiği hortumda belirli bir su yüksekliği sağlanmıştır. Yükseklik değerleri birleştirildiğinde ortaya çıkan yatay eksen referans çizgisi olarak kabul edilmiştir.
- 3) Ölçümlerin doğru olabilmesi için  $Q_A$  debisindeki suyun alınmasını sağlayan vanaya bağlı plastik hortum iptal edilmiştir. Suyun serbest düşmesi gerektiğinden vananın altına, ucuna hortum bağlantısı yapılarak depoya verilmiş huni yerleştirilmiştir.
- 4) Tesisatın su giriş ve çıkış noktaları tekrar açılarak su girişine serbest bırakılmıştır.
- 5) Tesisat çalıştırıldığında pompa ile basılan su miktarı vana ile ayarlanmıştır. Boncukların verildiği hortumda okunan su yüksekliğinin referans çizgisinde kalmasına dikkat edilerek, her seferinde  $Q_A$  debisi ile çekilen su miktarı değiştirilmiştir. Piyezometre borularında okunan değerler daha önce belirlenen referans çizgisi sıfır kabul edilerek tespit edilmiştir. Deneyle ilgili ölçüm sonuçları Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'te verilmiştir. Şekil 4.8'de ölçüm sonuçlarına bağlı grafik görülmektedir.

Çizelge 4-2 İkinci ön deney ait ölçüm sonuçları (1.Grup)

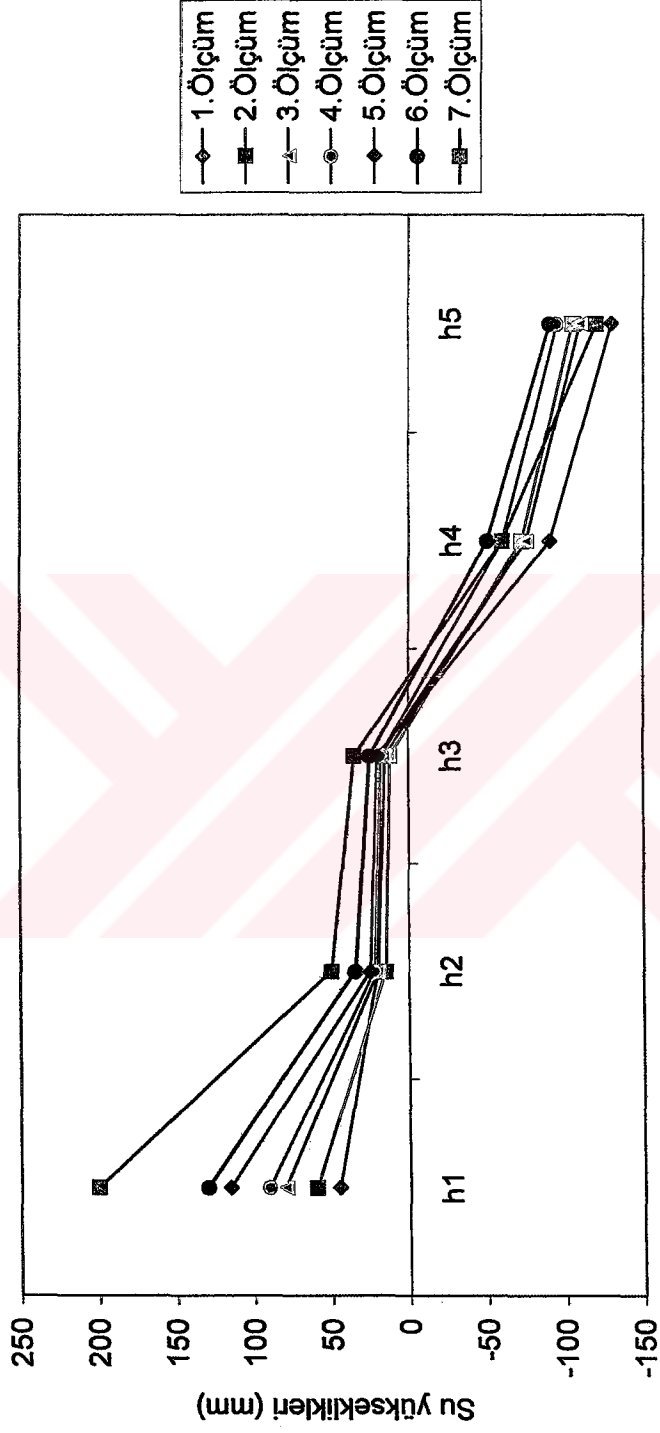
Ölçüm No	$Q_{(top)}$ ( $m^3/s$ )	$Q_{(A)}$ ( $m^3/s$ )	$Q_{(B)}$ ( $m^3/s$ )	$h_1$ (mmSS)(mmSS)	$h_2$ (mmSS)(mmSS)	$h_3$ (mmSS)(mmSS)	$h_4$ (mmSS)(mmSS)	$h_5$ (mmSS)(mmSS)	$t$ (s)	$t_{(A+B)}$ (s)	$h_1-h_2$ (mmSS)	$h_2-h_3$ (mmSS)	$h_3-h_4$ (mmSS)	$h_4-h_5$ (mmSS)
1	0,00019737	0,00003070	0,00016667	30	10	5	-60	-90	45	38	20	5	65	30
2	0,00023438	0,00007133	0,00016304	35	8	7	-55	-85	46	32	27	1	62	30
3	0,00020270	0,00003604	0,00016667	40	10	8	-55	-85	45	37	30	2	63	30
4	0,00026786	0,00005357	0,00021429	47	12	7	-97	-135	35	28	35	5	104	38
5	0,00025000	0,00007558	0,00017442	50	13	8	-60	-90	43	30	37	5	68	30
6	0,00028846	0,00011801	0,00017045	55	15	10	-55	-85	44	26	40	5	65	30
7	0,00027778	0,00009921	0,00017857	60	15	14	-50	-80	42	27	45	1	64	30
8	0,00032609	0,00015563	0,00017045	70	20	15	-50	-80	44	23	50	5	65	30
9	0,00035714	0,00018272	0,00017442	80	20	15	-40	-75	43	21	60	5	55	35
10	0,00037500	0,00016071	0,00021429	80	20	15	-90	-120	35	20	60	5	105	30
11	0,00044118	0,00025825	0,00018293	110	30	20	-40	-75	41	17	80	10	60	35
12	0,00050000	0,00026563	0,00023438	-120	30	25	-55	-100	32	15	90	5	80	45
13	0,00053571	0,00032143	0,00021429	130	35	30	-50	-85	35	14	95	5	80	35
14	0,00057692	0,00036859	0,00020633	160	40	35	-40	-90	36	13	120	5	75	50

Çizelge 4-3 İkinci ön deney ait ölçüm sonuçları (2. Grup)

Ölçüm No	$Q_{(top)}$ ( $m^3/s$ )	$Q_{(A)}$ ( $m^3/s$ )	$Q_{(B)}$ ( $m^3/s$ )	$h_1$ (mmSS)	$h_2$ (mmSS)	$h_3$ (mmSS)	$h_4$ (mmSS)	$h_5$ (mmSS)	$t_{(B)}$ (s)	$t_{(A+B)}$ (s)	$h_1-h_2$ (mmSS)	$h_2-h_3$ (mmSS)	$h_3-h_4$ (mmSS)	$h_4-h_5$ (mmSS)
1	0,00027778	0,00008041	0,00019737	45	20	18	-75	-110	38	27	25	2	93	35
2	0,00030000	0,00010769	0,00019231	60	15	12	-72	-105	39	25	45	3	84	33
3	0,00034091	0,00013821	0,00020270	80	20	15	-75	-110	37	22	60	5	90	35
4	0,00037500	0,00017763	0,00019737	90	22	18	-60	-95	38	20	68	4	78	35
5	0,00044118	0,00020680	0,00023438	115	25	20	-90	-130	32	17	90	5	110	40
6	0,00046875	0,00026605	0,00020270	130	35	25	-50	-90	37	16	95	10	75	40
7	0,00062500	0,00037500	0,00025000	200	50	35	-60	-120	30	12	150	15	95	60



Şekil 4-7 İkinci ön deneyde düşük basınç bölgesi



Şekil 4-8 Piyezometre borularında okunan su yükseklikleri (İkinci ön deney-2. Grup)

#### 4.2.2 Ön Deney Sonuçları

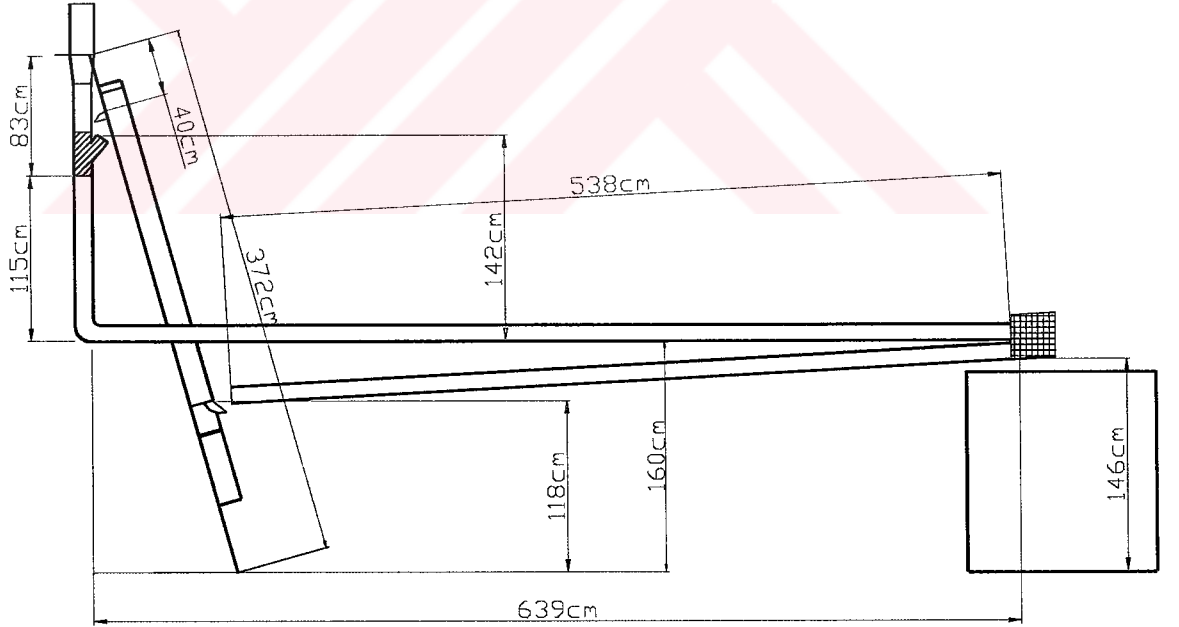
- 1) Ön deneylerden elde edilen sonuçlara göre deney tesisatı düşük basınç bölgesi konstrüksiyonunun 5 değişik boru çapı için Şekil 4.4'deki gibi olması gerekmektedir. Kapsüllerin boruya takılmaması için boru bağlantısının geniş kavisli bir dirsek ile yapılmasına karar verilmiştir. Ancak çalışma yapılacak boru çapları değiştiğinde böyle bir konstrüksiyonun rahatlıkla sökülerek yeni boru çaplarına göre yeniden montajının yapılabilmesi gereklidir. Bu şekildeki kapsül besleme sisteminin uygulamalar sırasında pratik olmayacağı kesindir. Bu nedenle gerçek deney tesisatında kapsül besleme işleminin yapılacağı boru konstrüksiyonunun sabit olması ve kapsüllerin belli bir yükseklikten bırakılarak ölçüm bölgesine dahil edilmesi kararlaştırılmıştır.
- 2) Kapsüllerin sisteme belli aralıklarla girişi ve besleme noktasına rahat aktarımı için bir elevatör kullanılması kararlaştırılmıştır.
- 3) Eğer tesisatta içine tel süzgeç yerleştirilmiş bir boru bağlantısı kullanılacaksa, bu tel süzgecin boru iç cidarının tamamını sarması kararlaştırılmıştır.
- 4) İkinci ön deney ölçüm sonuçları, boru konstrüksiyonunda ulaşılan hızların normal şartlar altında venturimetre kesitinde ulaşılan hızlardan daha fazla olduğunu göstermiştir. Bu şekilde basınç düşüşü oluşumu ile ilgili daha ileri seviyede çalışmalar yapılmalıdır.

## 5. DENEY TESİSATI

Uygulamadaki boru hattı sistemlerinin dizaynından önce, benzer akım şartları altında laboratuvar deneyleri yaparak bu tip akışların özellikleri ve sistem parametreleri hakkında bilgi edinilmelidir. Bu amaçla  $\sim 17\text{m}^2$ 'lik alan üzerinde kapsül boru hattı sistemlerinin modeline uygun prototip bir deney tesisatı kurulmuştur. Deney tesisatı tasarım aşamasında iken ileriye dönük düşünülmüştür. Sistemi oluşturan tüm parçalar ve cihazlar değişik akış şartlarına uyum sağlayabilecek özellikte seçilmiş olup, gerektiğinde sistemin boru hattı geometrisinde de değişiklik yapılabilir. Deney tesisatına ait bilgiler akış sistemi ve ölçüm sistemi olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir.

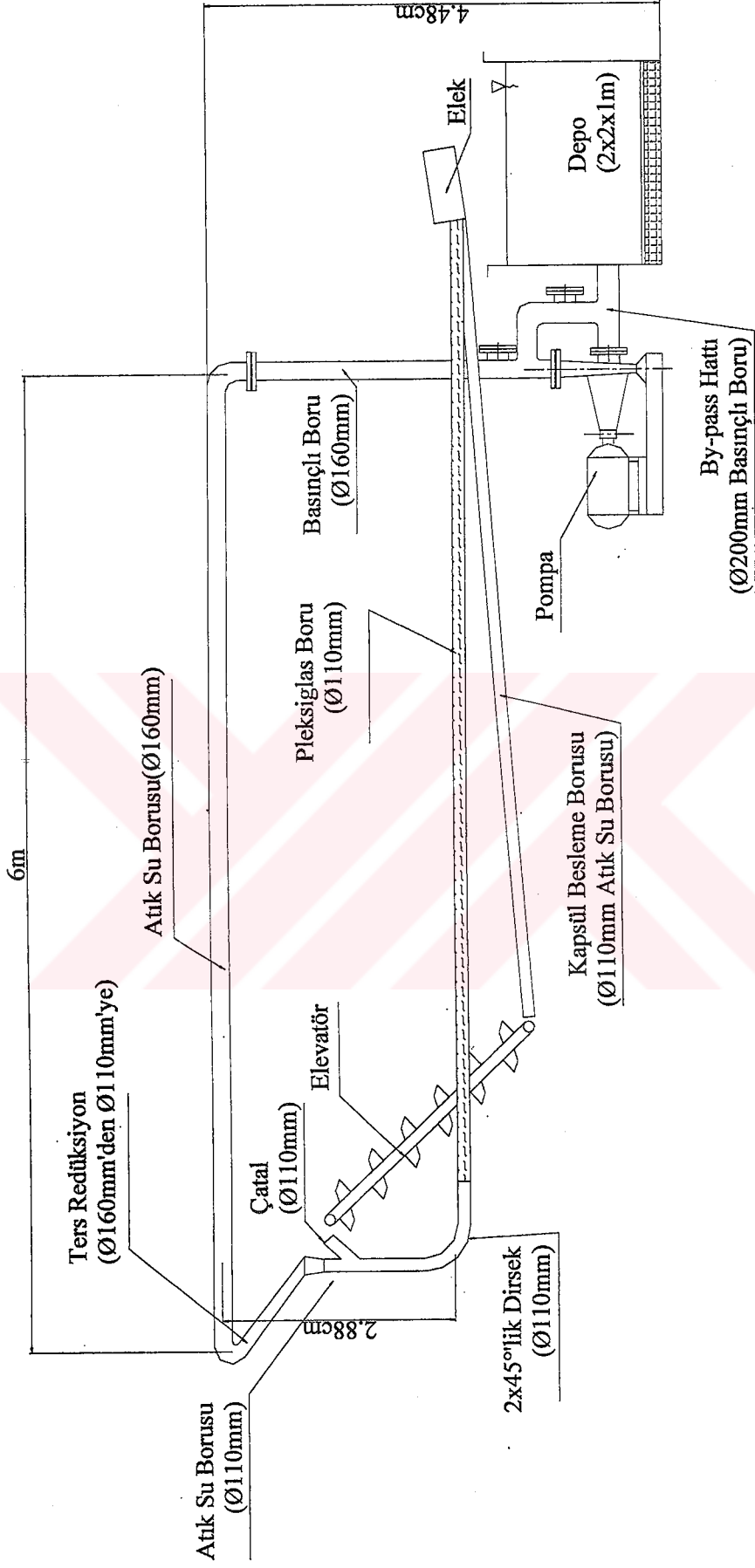
### 5.1 Akış Sistemi

Deney tesisatına ait parçaların yerleşimi, boru hattı geometrisi ve çevrim yönü aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Açık sistem olan tesisatta mekanik kısmı oluşturan parçaların özellikleri ve kullanım amaçları aşağıda özetlenmiştir.

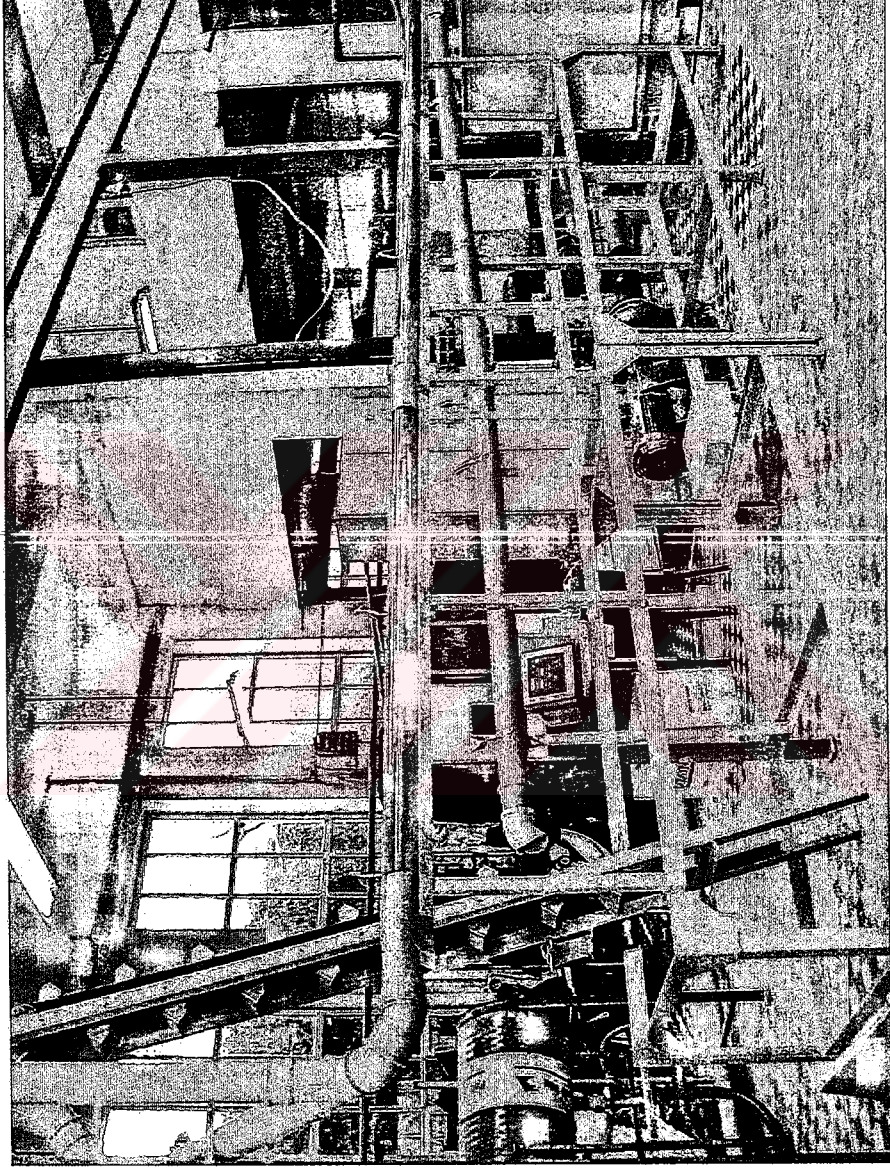


Şekil 5-1 Deney tesisatına ait ana ölçüler





Şekil 5-2 Deneysel tesisatın şematik resmi



Şekil 5-3 Deney tesisatı

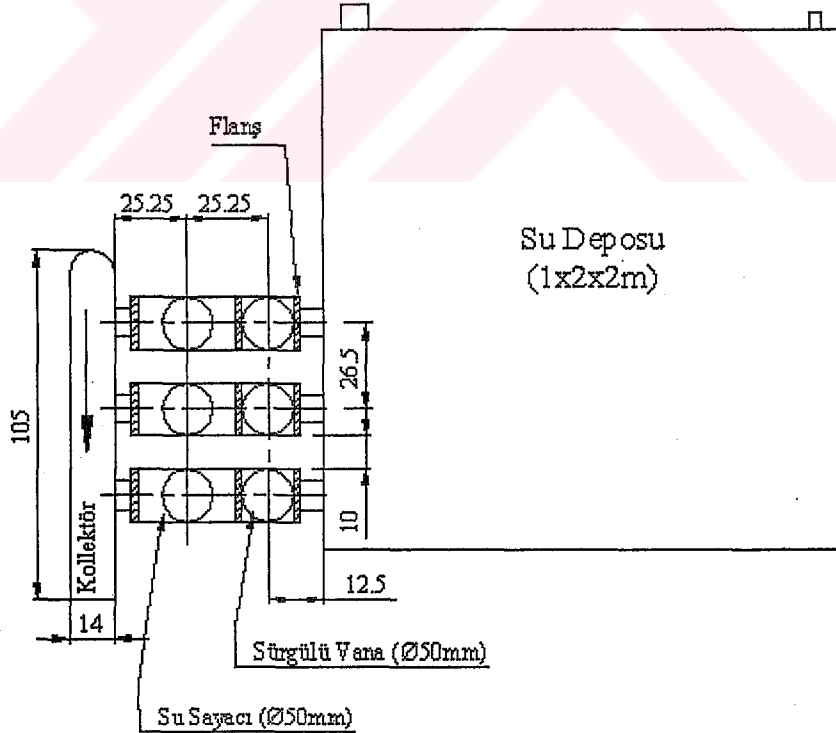
### 5.1.1 Depo

3mm kalınlığında siyah saçıtan yapılan deponun su alma kapasitesi 4 ton olup, sistemde dolaşacak maksimum debi miktarı ve pompa emme ağız çapına göre boyutları belirlenmiştir (1x2x2m). Deneyler sırasında ölçüm bölgesi boru hattının tam dolu olması gerekmektedir.

Deponun taban kısmında bir adet kör tapa, yan duvarında ise bir adet taşma borusu ile tahliye vanası bulunmaktadır. Diğer yüzüne tabandan 3mm yukarıda 3 adet 50mm çapında delikler açılmış ve bu deliklere vana bağlantıları için yine 50mm çapında 50mm uzunluğunda 3 adet demir boru kaynak edilmiştir. Depo tam dolu halde iken, şekil deformasyonunu önlemek amacı ile üst kısmına 5x5cm'lik köşebent geçirilmiştir.

### 5.1.2 Vanalar ve Su Sayaçları

Depo çıkışına paralel olarak yerleştirilmiş 3 adet vana ve bu vanalara bağlı su sayaçları sistemin debi ölçüm bölgesinin birer elemanıdır. Şekil 5.4'te vana ve su sayaçlarının bağlantı resmi şematik olarak verilmiştir. Anma çapı 50mm (PN 10) olan sürgülü vanalar ile depodan alınan suyun su sayaçlarına geçişi kontrol altında tutulmuştur.



Şekil 5-4 Vana ve su sayaçlarının depoya bağlantısı

By-pass hattında sabit debi sirkülasyonu gerçekleştiğinden, pompa sadece basınç düşüşü ölçüm bölgesi içinden geçen debi miktarını basmaktadır. Bu bölgede çalışılacak maksimum hız 3m/s ise, ulaşılabilecek debi miktarı (boru iç çapı 100mm alındığında)  $85\text{m}^3/\text{h}$ 'tir.

Boru içinden geçen miktarın yaklaşık %30'unun kapsül olduğu düşünüldüğünde sistemde dolaşan toplam debi miktarı  $57\text{m}^3/\text{h}$ 'e düşmektedir. Aşağıda özellikleri verilen ve maksimum debisi  $30\text{m}^3/\text{h}$  olan üç adet su sayacından gerektiğinde biri ya da ikisi birden devre dışı bırakılarak, değişik hızlarda debi ölçümünün yapılması mümkündür.

#### **Su sayacına ait teknik özellikler:**

Anma Debisi ( $Q_n$ ),  $15\text{m}^3/\text{h}$

Maksimum Debi ( $Q_{\max}$ ),  $30\text{m}^3/\text{h}$

Minimum Debi ( $Q_{\min}$ ),  $0.45\text{m}^3/\text{h}$

İntikal Debisi ( $Q_t$ ),  $3\text{m}^3/\text{h}$

Maksimum İşletme Basıncı (P), 10 bar

Maksimum Basınç Farkı ( $\Delta P$ ), 1 bar

Kayıt Kapasitesi,  $100.000\text{m}^3$

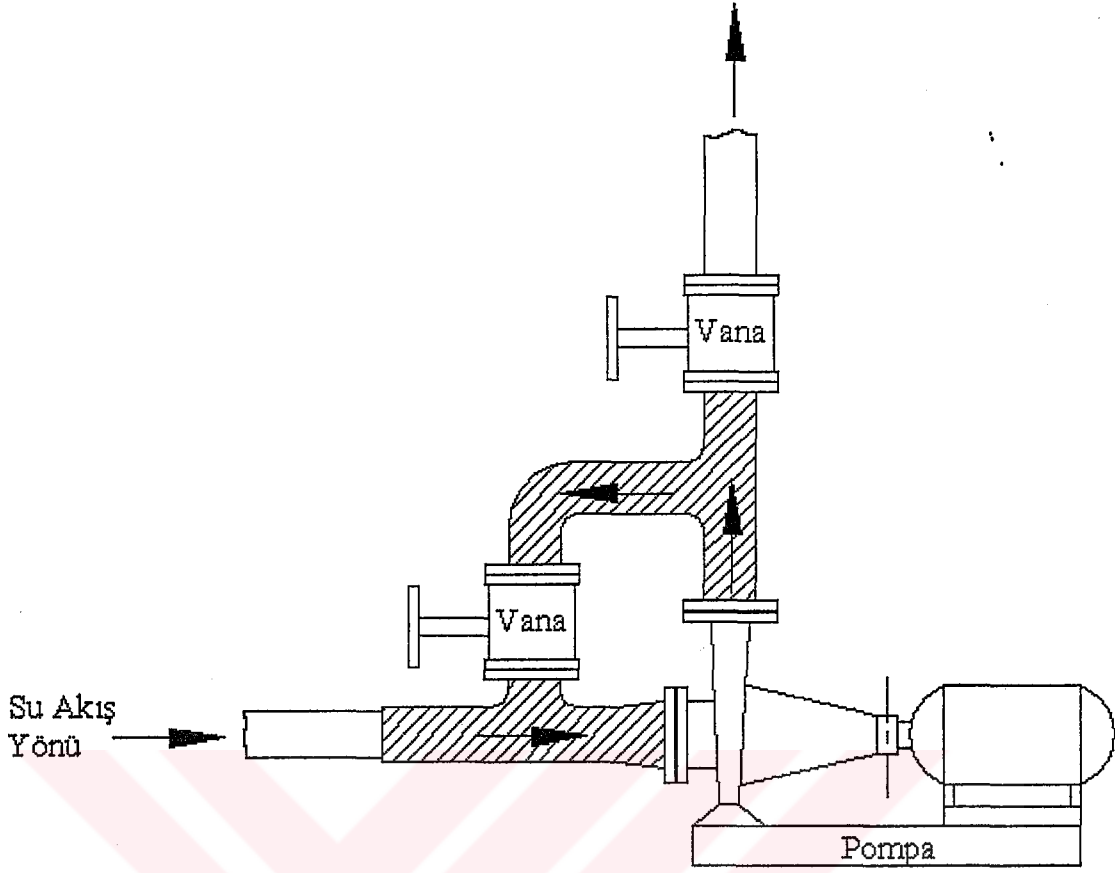
Su sayaçlarının çıkışına 1.5m uzunluğunda ve 14cm çapında bir kollektör kaynak edilerek toplanan suyun pompa emiş borusuna direk geçişi sağlanmıştır. Kollektör çıkışının pompa emme borusu ile bağlantısı özel sızdırmaz bir bant kullanılarak yapılmıştır.

#### **5.1.3 By-pass Hattı**

Pompa çıkışından itibaren sistemde dolaşacak debi miktarının kontrol altında tutulması by-pass hattı ile sağlanmıştır. Özel olarak dizayn edilen, imalatında basınçlı boru kullanılan ve bağlantısı flanşlarla yapılan hattın şematik resmi Şekil 5.5 ve Şekil 5.7'de verilmiştir.

Anma çapı 150mm olan iki adet sürgülü vanadan biri ile by-pass hattındaki debi miktarı diğeri ile de ölçüm bölgesindeki debi miktarı ayarlanmaktadır.

Pompa basma hattı üzerinde bulunan vanaya 2.6m uzunluğunda 160mm çapında basınçlı boru ilavesi yapılarak pompa çıkışındaki basınçlı suyun darbe etkileri önlenmiştir.



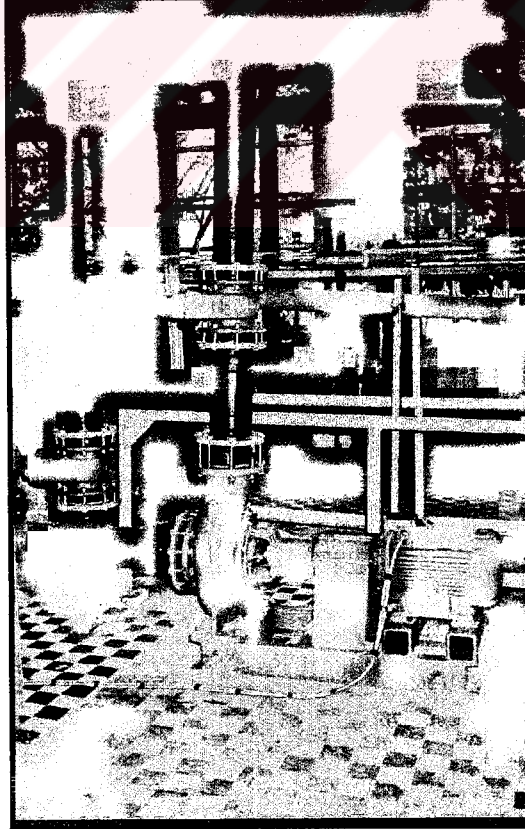
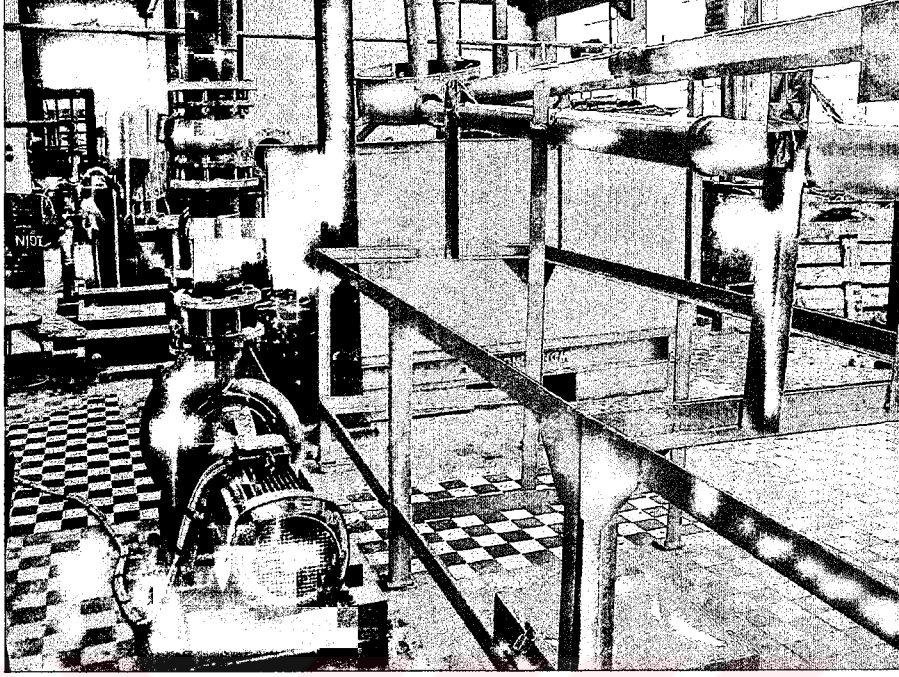
Şekil 5-5 By-pass hattı

#### 5.1.4 Pompa

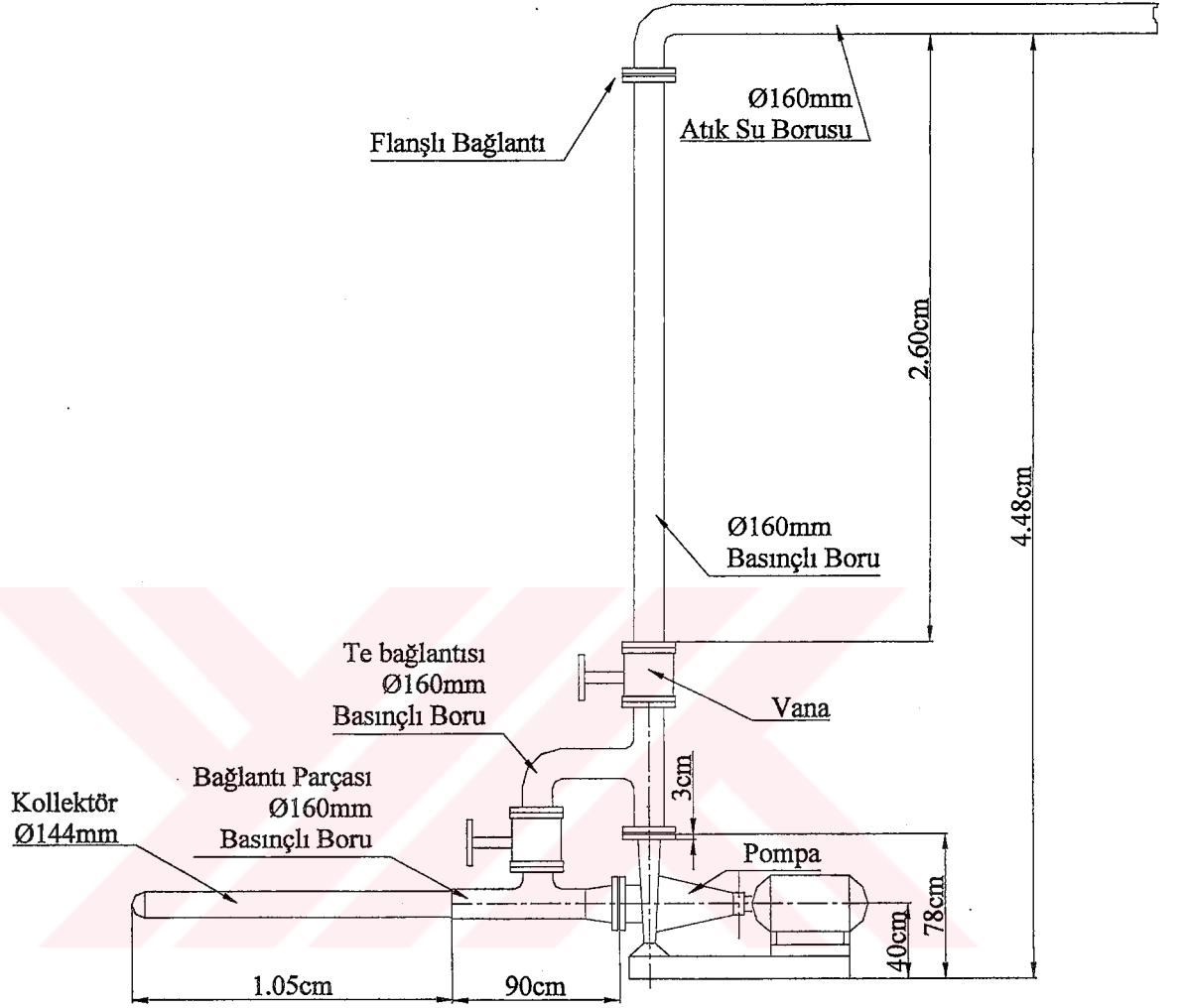
Sistemde bir adet yatay milli salyangoz tipli pompa mevcuttur (Şekil 5.6). Motor gücü 7.5Kw, manometrik basma yüksekliği 7m, devir sayısı 1000d/d, verimi %82.6 olan bu pompanın emme ağzı çapı 200mm, basma ağzı çapı 150mm'dir.

Çalışılacak maksimum hızlar ve Re sayısı değerleri dikkate alınarak belirlenen pompa dakikada 4740 litre su basma kapasitesine sahiptir.

Pompaya yol verme işlemi sırasında, by-pass hattındaki vanalar tam kapatılmış, depo çıkışındaki vanalar tam açık konuma getirilerek suyun pompa basma ağzına kadar dolması sağlanmıştır. Pompaya yol verildikten kısa bir süre sonra by-pass hattındaki vanalar kademeli olarak açılmıştır.



Şekil 5-6 Pompa ve by-pass hattı



Şekil 5-7 By-pass hattı, pompa ve basınçlı boru bağlantıları

### 5.1.5 Boru Hattı

Sistemin tümünde 3 değişik tipte boru kullanılmıştır. Çizelge 5.1'de kullanılan borular ve kullanım bölgeleri verilmektedir.

Çizelge 5-1 Deney tesisatında kullanılan boru tipleri ve kullanım bölgeleri

Boru Tipi	Boru Dış Çapı (mm)	Kullanıldığı Bölge	Bağlantı Şekli	Toplam Metraj (m)
Basıncılı Boru (Polietilen)	φ200-φ160	By-pass ve pompa basma hattı bölgesi	Flanşlı	~3.5
Atık Su Borusu (Polietilen)	φ110	Kapsül besleme ve hava tahliye bölgesi	Contalı Geçme	~17
Pleksiglas Boru	φ110	Basınç düşüşü ölçüm bölgesi	Özel Sızdırmaz Bant	~6

### 5.1.6 Basınç Düşüşü Ölçüm Bölgesi

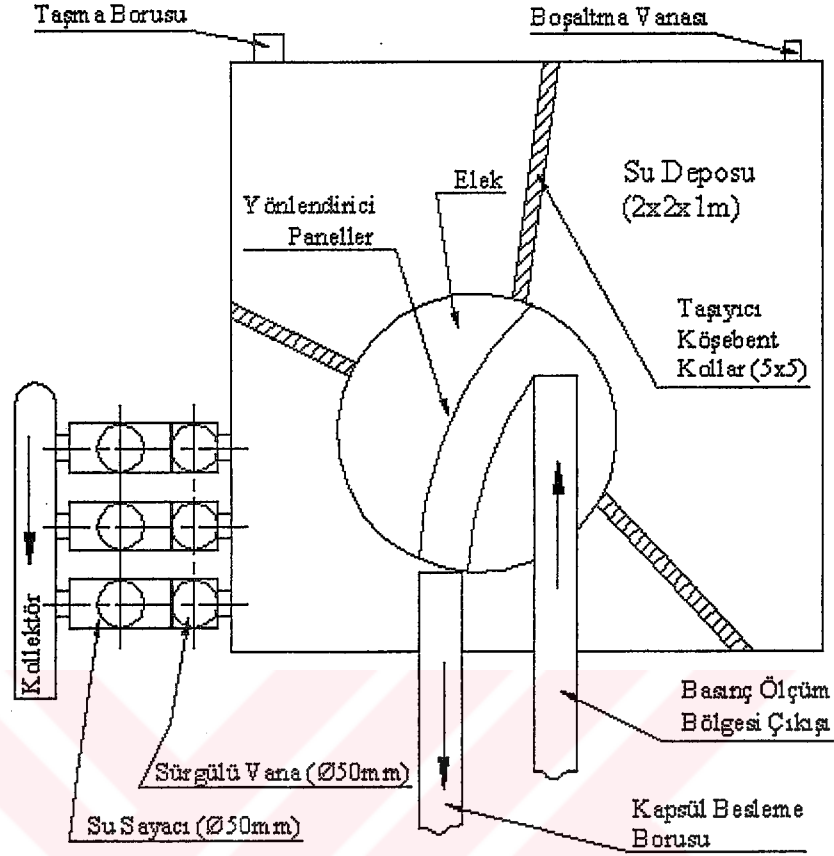
Pleksiglas boruların bir boyu iki metre olup ölçüm bölgesinde 3 boy pleksiglas boru kullanılmıştır. Özel sızdırmaz bant ile birbirlerine bağlanan boruların et kalınlığı 5mm'dir.

Basınç düşüşüne ait bilgiler için ve sistemin ne kadar sürede rejime girdiğini incelemek amacıyla ölçüm bölgesi uzun düşünülmüş, 6m uzunluğundaki bu hattın belirlenen 7 noktasına basınç problemleri yerleştirilmiştir. Bu işlem için önce boru üzerinde delinen noktalara M6'lık kılavuz ile dış açılmıştır. Daha sonra iç çapı 6mm, dış çapı 8mm olan pirinç boruya M8'lik pafta ile dış açılarak pleksiglas borulara vidalı bağlantısı yapılmıştır. Pirinç borunun pleksiglas boruya geçen dişli kısmına teflon sarılarak sızdırmazlık sağlanmıştır.

Pleksiglas boruların şeffaf oluşu, kapsül hareketlerinin rahat gözlenmesini sağlamıştır. Kapsüllü akışta fotoğraf çekimleri yapılmıştır.

Ölçüm bölgesi sonunda pleksiglas borunun ucu atmosfere açılmakta kapsül-su karışımı depo üstündeki eleğe dökülmektedir.





Şekil 5-8 Depo, su sayaçları, vanalar ve kollektör bağlantılarının üstten görünüşü

### 5.1.7 Elek

Depo üzerine yerleştirilen 72cm çapa, 22cm derinliğe sahip elek ölçüm bölgesinden çıkan kapsül-su ikilisinin ayrıldığı noktadır. Su eleğin tabanındaki tel kafesten depoya dökülmektedir. Kapsüller ise bir ucu eleğe, diğer ucu elevatöre uzanan boru hattı (kapsül besleme borusu) içinden geçerek tekrar sisteme dahil olmaktadır. Belli bir yükseklikten bırakılan kapsülün besleme borusunun tamamını ne kadar sürede geçtiği yapılan ön bir deney ile belirlenmiş, sadece potansiyel enerjisiyle ivmelenen kapsülün yeterli hızlara ulaşmadığı görülmüştür. Bu nedenle, eleğe eğim verilerek ve iç kısmına özel olarak hazırlanmış yönlendirici paneller yerleştirilerek (Şekil 5.8), ölçüm bölgesinden çıkan kapsüllerin durmaksızın kapsül besleme borusuna geçişi sağlanmıştır. Böylece kapsüllerin ölçüm bölgesinde kazandığı kinetik enerji kaybolmamaktadır ve kapsül hızında bir düşme olmadan  $\phi 110$ mm çapında, eğimli olarak döşenmiş atık su borusu içinden geçerek elevatöre ulaşmaktadır.

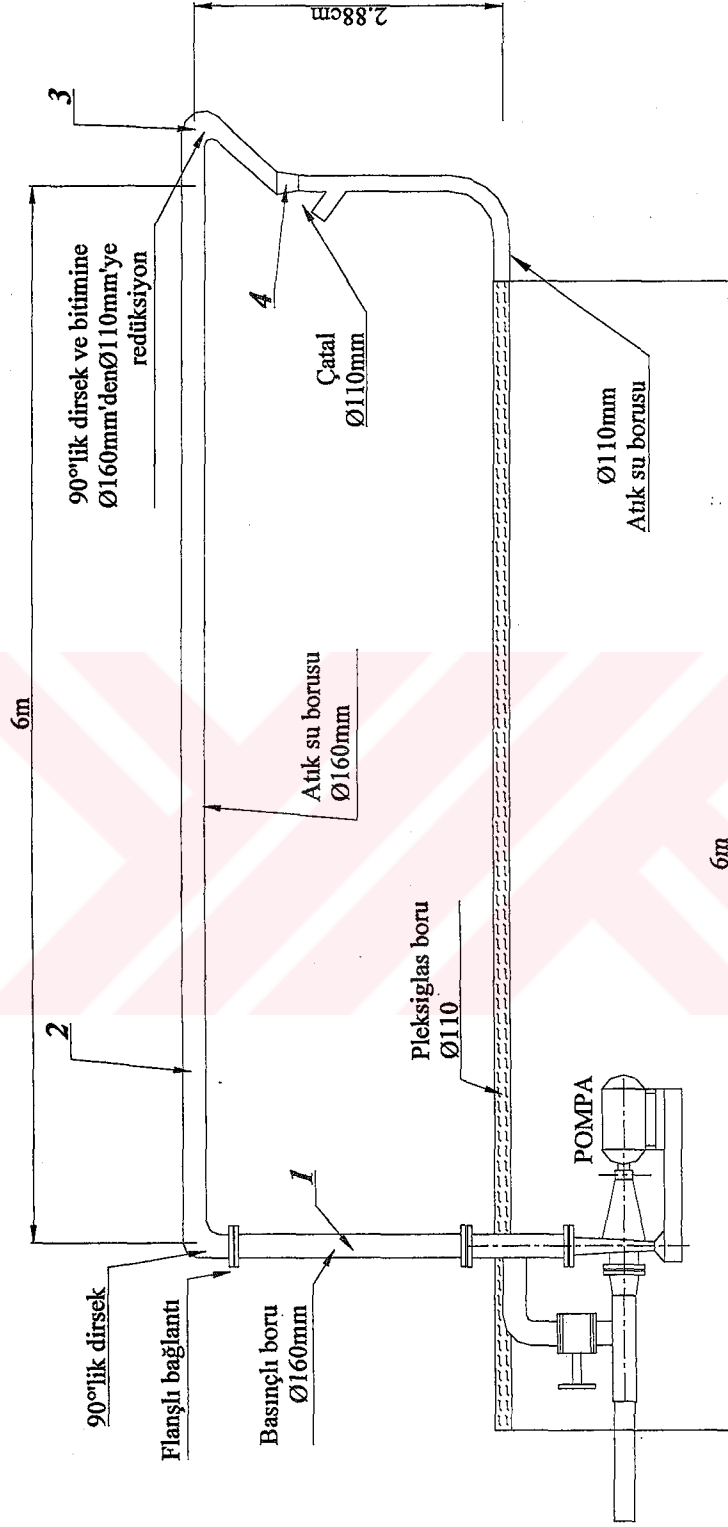
### 5.1.8 Elevatör

Depodan emilerek sisteme basılan su, pompa basma ağzına bağlı basınçlı boru hattını (1) geçince yerden 4.48m yüksekliğe döşenmiş atık su boru hattına (2) ulaşmaktadır. Bu hattın bitiminde 90°'lik dirsek (3) ve dirsekten sonra galvaniz saçtan özel olarak hazırlanmış bir redüksiyon (boru çapını 160mm'den 110mm'ye düşüren) bulunmaktadır. Kinetik enerjiye sahip su belli bir yükseklikten bırakıldığında potansiyel enerjisi artmakta, redüksiyondan geçerken ise hızı daha da artmaktadır. Yüksek hıza sahip su, elevatörün kepçesinden redüksiyon bitimine yerleştirilmiş 110-110mm çapında çatala (4) giren kapsüller ile karşılaşmakta ve kapsülleri ölçüm bölgesine sürüklemektedir (Şekil 5.9).

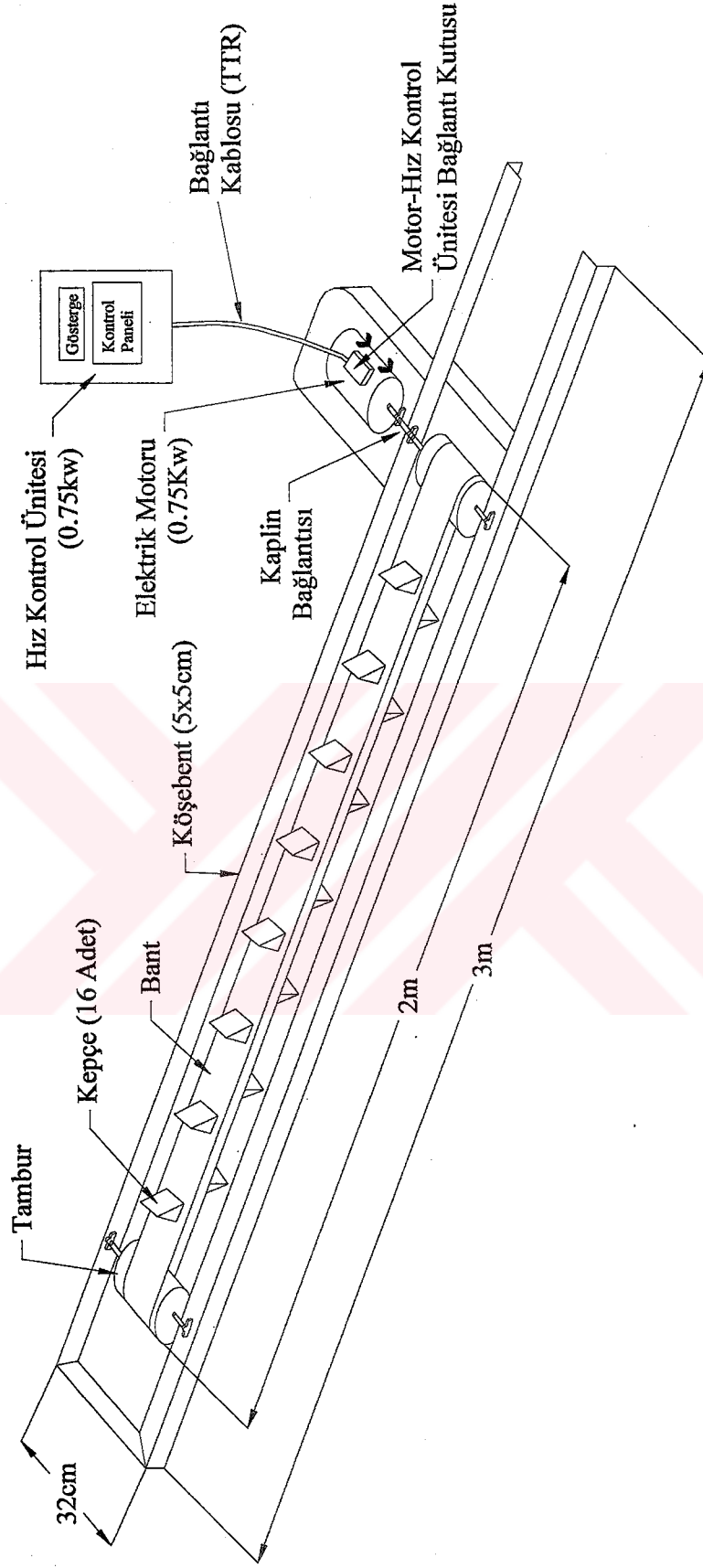
Kapsüllerin belli bir yükseklikten sisteme dahil edilebilmesi için, tambur çapı 11cm, tambur genişliği 15cm, bant uzunluğu 2m, bant genişliği 13cm, toplam uzunluğu 3m, toplam genişliği 28cm ve üzerine monte edilmiş kova sayısı 16 adet olan özel bir elevatör hazırlanmıştır (Şekil 5.10). Değişen akım şartları ve buna bağlı olarak oluşan değişik basınç düşüşleri dikkate alındığında kapsülün sisteme giriş yüksekliği de değişiklik gösterecektir. Bu nedenle, elevatör eğim açısı değişebilen, uzunluğu 3.72m olan bir kızak içine yerleştirilmiş, kızakın içindeki ileri geri hareketi de sağlanmıştır.

Sistemde dolaşacak katı-sıvı karışımı homojen bir karışım olarak düşünülerek (Govier ve Aziz, 1972) maksimum basınç düşüşü hesabı yapılmış ve 0.6mss olarak belirlenmiştir. Kapsüllerin ölçüm bölgesine problemsiz bir şekilde beslenebilmesi için kapsüllerin gireceği çatal ölçüm bölgesinden ~1m yukarıya monte edilmiştir. Elevatörün kızak içindeki yerleşimi bu yükseklik dikkate alınarak yapılmıştır.

İlk olarak elevatör hareketini sağlayacak doğru akım elektrik motorunun gücü 0.25Kw olarak belirlenmiştir. Ancak kapsül besleme testlerinde tam kapasite dolan elevatörün hareketi için motor veriminin düştüğü ve elevatöre yeterli dönme momentinin iletilmediği tespit edilmiştir. Bunun üzerine motor gücü 0.75Kw'a yükseltilmiştir. Elektrik motoruna bağlanacak sürücünün gücü 0.75Kw olup, elevatörün hızı sıfırdan maksimum d/d'ya kadar kontrol altında tutulmuştur. Böylelikle sistemde dolaşacak kapsül konsantrasyonu da ayarlanmıştır.



Şekil 5-9 Pompa basma hattı ve kapsül besleme bölgesi



Şekil 5-10 Elevatör ve hız kontrol ünitesi

Sistem çalışır halde iken elevatöre bağlı elektrik motorunun oluşturduğu titreşimlerin ölçümleri etkileyebileceği düşünülerek, elevatörü taşıyan kazağın ayakları taşıyıcı konstrüksiyona değil zemine bağlanmıştır.

### 5.1.9 Boru Hattını Taşıyan Konstrüksiyon

2.5m uzunluğunda, 1m genişliğinde ve 0.91m yüksekliğinde iki çelik masa profili üzerine taşıyıcı ayaklar kaynak edilerek boruların sağlam bir konstrüksiyon üzerine yerleşmesi sağlanmıştır. Taşıyıcı ayaklar 5x5'lik köşebent veya profillerden kesilerek hazırlanmıştır.

### 5.1.10 Kapsüller

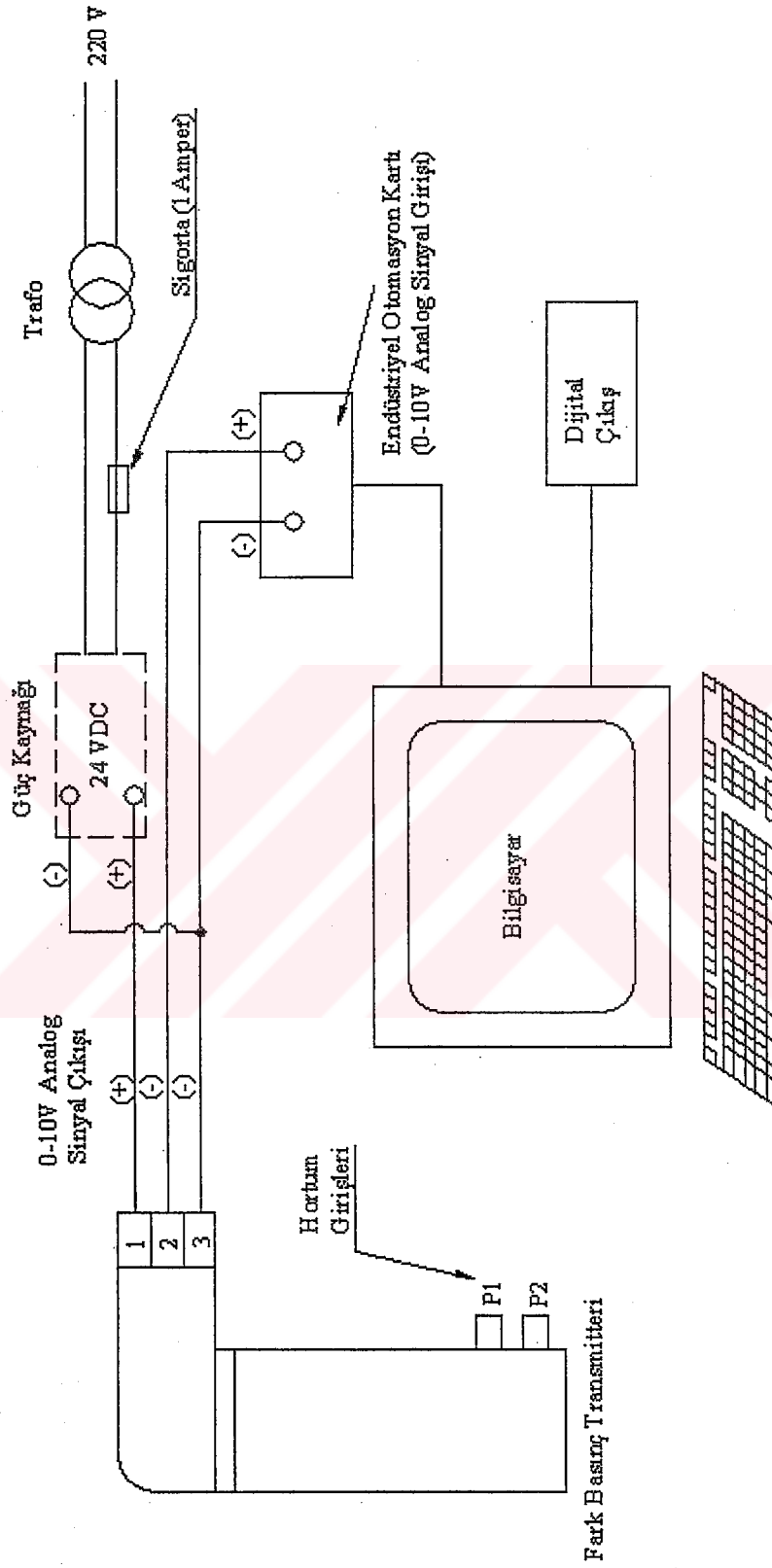
Deneylerde kapsül olarak kullanılmak üzere piyasa araştırması sonucu belirlenen plastik toplar istenilen ebatta ve sayıda değildi. Ayrıca aralarında yüzey pürüzlülüğü ve yoğunluk özellikleri bakımından bir uyum yoktu.

Bu nedenle özel kalıplar hazırlanarak değişik çaplarda polipropilen malzemeden kapsüller hazırlanmıştır. Bu işlem için yaklaşık olarak 150kg polipropilen kullanılmıştır. Sonuçta, deneylerde kullanılacak kapsüller yüzey pürüzlülüğü ve yoğunluk açısından tek tip olmuştur.

Deneylerde  $d/D$  oranı 0.8 olarak belirlenmiş, iç çapı 100mm olan borularda 80mm çapındaki küresel kapsüller kullanılmıştır.

## 5.2 Ölçüm Sistemi ve Ölçüm Cihazlarının Kalibrasyonu

Yoğunluğu taşıyıcı sıvıdan daha az olan kapsüllerin boru içindeki akışında kapsül-taşıyıcı sıvı hız oranlarının ve karışım akışına ait basınç düşüşlerinin tam olarak belirlenmesi, kapsül boru hattı sistemlerinin dizaynında (boru geometrisi, pompa gücü, kapsül-boru çap oranları gibi) belirleyici rol oynamaktadır. Bu nedenle hız oranları ve basınç düşüşlerine ait ölçümlerin hassasiyet derecesi önemlidir. Basınç düşüşü ölçüm bölgesinin temel elemanları, 1 adet fark basınç transmitteri, 1 adet endüstriyel otomasyon kartı (I/O kart) (ADVANTECH-818HG) ve kartın takılı olduğu bir bilgisayardan oluşmaktadır (Şekil 5.11). Kapsül hızı ve konsantrasyon ölçümü için ise ikisi basınç düşüşü ölçüm bölgesi üzerinde biri elevatöre monte edilmiş 3 adet fiber optik sensör bulunmaktadır. Su sıcaklığı J tipi bir termokupl vasıtası ile ölçülmüştür. Bu cihazların teknik özelliklerine kısaca değinilecektir.



Şekil 5-11 Ölçüm sistemindeki elektronik devre hattı

### 5.2.1 Fark Basınç Transmitteri

Hem sıvı hemde gaz akışkanlar için kullanılabilen (HUBA-692.900001121) fark basınç transmitteri 0-1mss arasındaki basınç değişimini ( $\Delta P$ ), %0.5'lik bir hassasiyetle ölçebilmektedir. Transmitterdeki tek giriş noktası ile ölçülebilen maksimum basınç 6mss olup, sıcaklık hassasiyeti ise %0.05 gibi çok düşük bir değerdir.

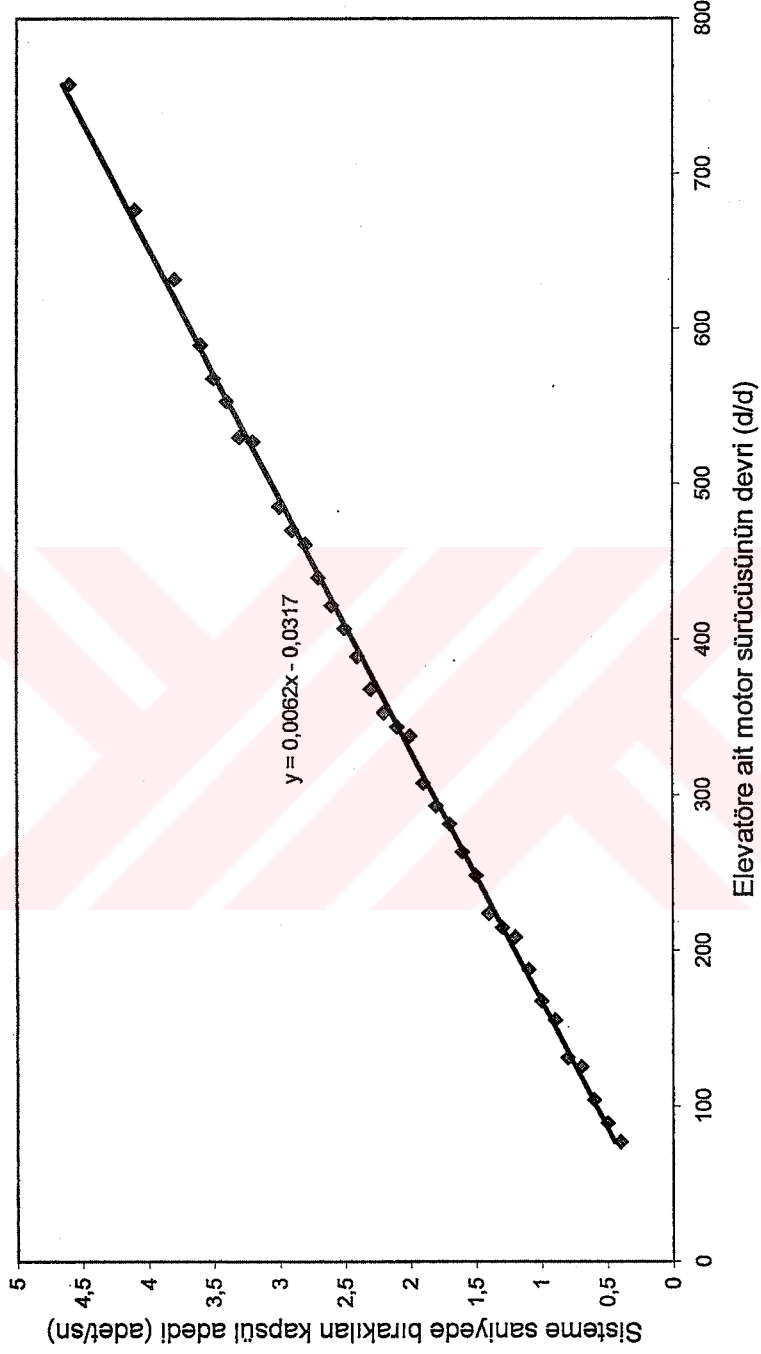
Transmitterin, sadece voltaj girişi kabul eden endüstriyel kart ile uyumlu olması için, analog sinyallerin voltaj çıkışlı olmasına (0-10V) dikkat edilmiştir. İçinde 1A sigorta bulunan 24V'luk bir güç kaynağı özel olarak hazırlanmıştır.

Basınç farkının belirlenmesi istenen bölgedeki basınç problemlerine bağlanan şeffaf hortumların diğer uçları transmitter girişine bağlanmıştır.

### 5.2.2 Fiber Optik Sensörler

Kapsüllerin akım sırasında ulaştığı gerçek hız değerlerinin sadece kronometre kullanılarak belirlenmesi yeterli değildir. Bu nedenle basınç düşüşü ölçüm bölgesi üzerinde 0.1m aralıkla belirlenen iki noktaya cisimden yansımali sensörler (BALLUFF-BOS15K-S-E1) yerleştirilmiştir. Sensörlerin sürekli olarak ürettiği ışık kaynağı cisim geçerken, cisme çarpmakta ve tekrar sensöre yansımaktadır. Geri yansıyan ışık sensör tarafından cisim olarak algılanmakta ve 12 volt'luk puls sinyaline dönüştürülmektedir. Sensörlerin I/O kart ile güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak için özel bir devre hazırlanarak 12 volt'luk çıkış sinyalleri 5 volta düşürülmüştür. Kart üzerinden bilgisayar programına aktarılan sinyaller özel bir yazılım ile değerlendirilerek kapsül gerçek hızları, statik ve dinamik konsantrasyonu oluşturacak kapsül sayıları hesaplanmıştır.

Sistemdeki üçüncü sensör (BALLUFF-BOS18K-UU-1PCE4C) bir sayıcıya bağlanarak, elevatör üzerinde keşçeleri görebilecek bir bölgeye yerleştirilmiştir. Böylece elevatör dönme hızına bağlı olarak, sisteme aktarılan saniyedeki kapsül adedi tespit edilmiştir. Elevatör motoru sürücüsünün değişik devirlerine tekabül eden kapsül sayısı (adet/saniye) belirlenerek, sürücünün kalibrasyonu yapılmıştır (Şekil 5.12). Elevatör üzerindeki sensör ile ölçüm bölgesi üzerindeki sensörlerden biri sayıcıya paralel bağlanmış olup, gerektiğinde basınç düşüşü ölçüm bölgesinden geçen kapsül adedinin de sayımı yapılabilmektedir.



Şekil 5-12 Elevatör motoru sürücüsünün kalibrasyon eğrisi



### 5.2.3 Termokupl

Ölçüm hattının başına yerleştirilen ve boru içindeki karışım ile teması sağlanan J tipi termokupl vasıtası ile akışkan sıcaklığı göstergeden okunmuştur. Deneyler sırasında su sıcaklığında 1-2 °C'lik artışlar gözlenmiştir. Hesaplamalarda suyun 20 °C'deki kinematik viskozitesi kullanılmıştır.

### 5.2.4 Endüstriyel Otomasyon Kartı

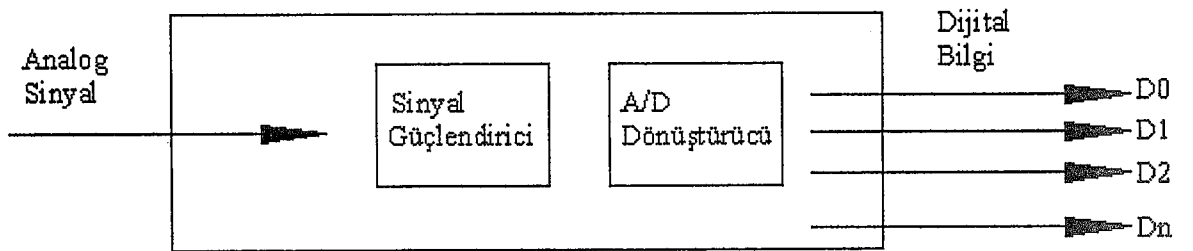
Son yıllarda, PC tabanlı veri toplama ve kontrol sistemleri endüstride ve laboratuvar uygulamalarında (kontrol etmek, ayarlamak, veri toplamak, otomatik olarak test etmek gibi) yaygın bir biçimde kullanılmaktadır.

Bilgisayara yerleştirilen, endüstriyel otomasyon kartı ile transmitterden alınan analog voltaj (yada akım) seviyesi dijital bilgiye çevrilmektedir. Bu dönüşüm bilgisayardan işlemlere veya toplu sinyallere geçişin mümkün olabilmesi için gerekli olmaktadır.

İçinde sinyal biçimlendirme devreleri bulunan kart, transmitterden alınan sinyallerin kalitesini de iyileştirmektedir. Çünkü, bu tip kartların en önemli özelliği içinde bir sinyal güçlendirici (amplifikatör) bulunmasıdır. Böylece çok düşük seviyelerdeki giriş sinyallerini bile okumak mümkün olabilmektedir (Şekil 5.13).

Sinyal kuvvetlendirme işlemi, transmitterden alınan sinyallerin PC bilgi toplama kartı tarafından dijital sinyale dönüştürülmesinden önce gerçekleşir.

Basınç ölçümlerine ait dijital bilgilerin bilgisayar ortamına aktarılması ve gerektiğinde üzerinde düzenlemeler yapılabilmesi için özel bir otomasyon programı (VISIDAQ) kartın takılı olduğu bilgisayara kurulmuştur.



Şekil 5-13 Endüstriyel otomasyon kartında bilgi dönüşüm zinciri (Advantech)

Ölçüm programının örnek alma frekansı saniyede 50 örnek olarak ayarlanmıştır. Böylece basınç değerlerinde çok kısa aralıklarla oluşan değişimler, sağlıklı bir şekilde tespit edilmiştir. Transmitter ve sensörlerin kart kanallarına bağlantısında, sinyal etkileşimlerini en aza indirmek için diferansiyel bağlantı şekli uygulanmıştır.

### 5.3 Fark Basınç Transmitterinin Kalibrasyonu

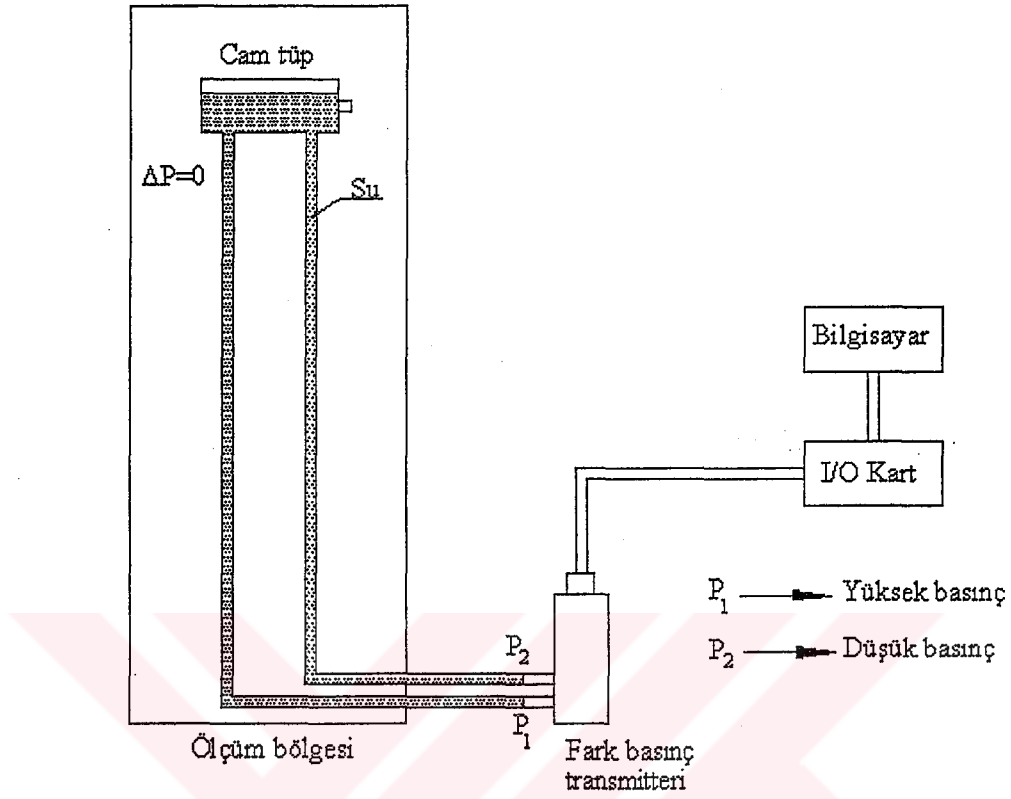
Deneylelerden önce fark basınç transmitterinin kalibrasyonu yapılmıştır. Kalibrasyon işlemi için iç çapı 6mm olan şeffaf plastik hortum ve bir adet cam tüpten yararlanılmıştır. Transmitterin bilgisayar ile elektronik bağlantısı tamamlandıktan sonra, belirli bir bölge ölçeklendirilerek ölçüm hattı uzunluğu ve transmitterin yerleştirileceği konum belirlenmiştir. Transmitterin  $P_1$  ucu yüksek basınç değerinin,  $P_2$  ucu ise alçak basınç değerinin algılandığı noktalar olup, hortum bağlantılarına uygun dizayn edilmiştir.

Kalibrasyon işleminin ilk aşamasında, transmitterin  $P_1$  ve  $P_2$  uçları su ile doldurularak içlerinde hava kalması önlenmiş, daha sonra hortum bağlantıları yapılmıştır.  $\Delta P=0$  şartının tam olarak sağlanabilmesi için her iki şeffaf hortumun atmosfere açık ucu yatay bir cam tüpe bağlanmış ve kollardaki su seviyeleri bu şekilde eşitlenmiştir. Daha sonra cam tüp ölçüm hattı üzerinde belli bir yüksekliğe getirilerek (Şekil 5.14) transmitter ile arasındaki mesafe sabitlenmiştir. Sistem bu konumda iken, bir otomasyon programı yardımı ile transmitterden alınan 100 adet voltaj sinyali kaydedilmiş, daha sonra bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Bulunan ortalama değer  $\Delta P=0$  şartı altında transmitterden bilgisayara iletilen ve bilgisayardan dijital olarak alınan analog sinyal (0-10 Volt) değeridir.

Kalibrasyonun ikinci aşamasında, alçak basınç noktasına bağlı ( $P_2$ ) şeffaf hortum içindeki su yüksekliği sabit tutulmuştur (0.20m). Yüksek basınç noktasına bağlanmış ( $P_1$ ) şeffaf hortum içindeki su yüksekliği ise belirli aralıklarla değiştirilmiştir. Böylece değişik  $\Delta h$  mesafelerinde, değişik  $\Delta P$  değerlerinin transmittere etki etmesi sağlanmıştır.  $P_1$  noktasına bağlı hortumdaki su seviyesinin her değişiminde (her yeni  $\Delta P$ 'de) transmitterden alınan analog sinyaller 100 adet voltaj değeri olarak kaydedilmiş ve bu değerlerinde ortalaması alınmıştır.

Böylece,  $\Delta h=0$  değerinden başlanarak, transmitterin maksimum  $\Delta P$  değerine karşılık gelecek  $\Delta h$  mesafesini sağlayabilmek için kollardaki su seviyesi ayarlanmış ve oluşturulan her bir basınç farkının transmitter tarafından ne kadarlık bir voltaj sinyaline dönüştüğü tespit edilmiştir. Bu değerlerin bir tablosu yapılarak (Çizelge 5.2), transmitter için  $\Delta P$ -Volt değişimini gösteren lineer bir doğru elde edilmiştir (Şekil 5.15 ve Şekil 5.16). Lineer

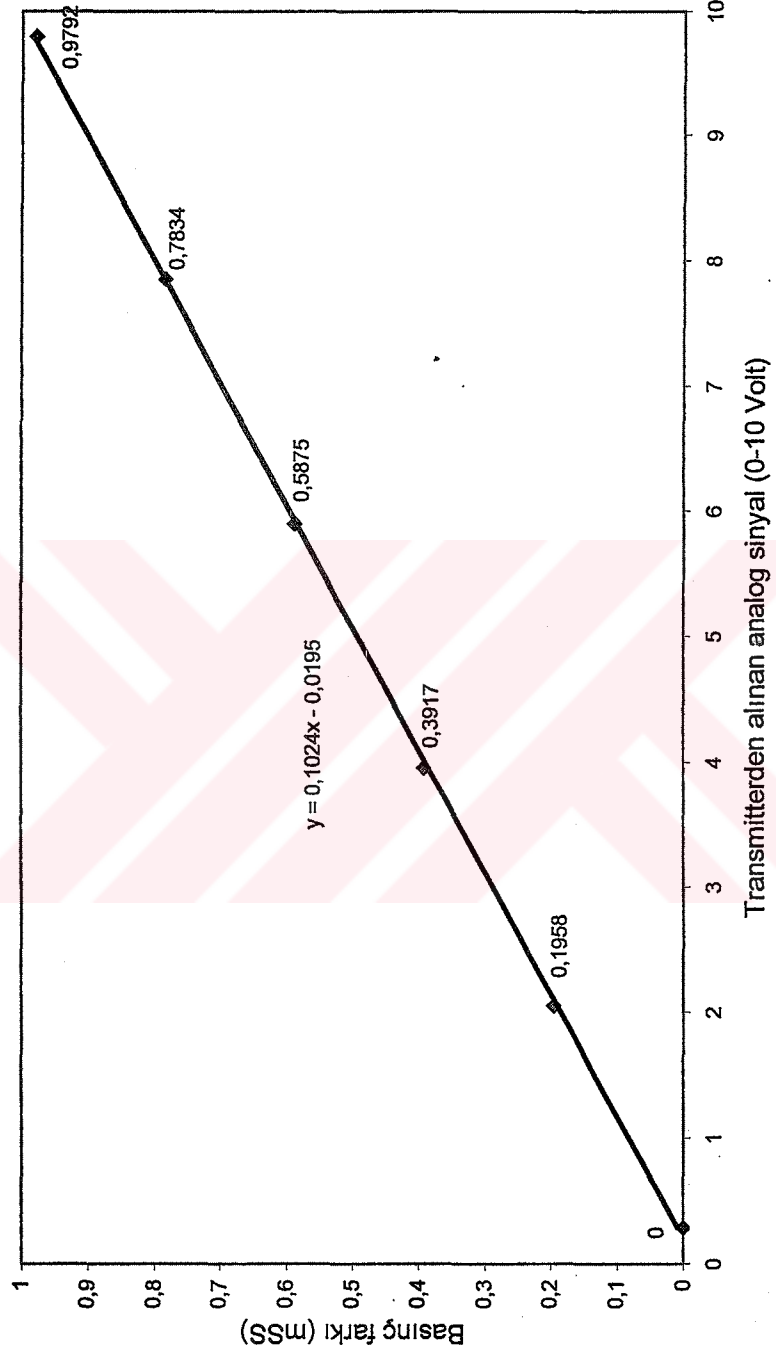
doğrunun denklemi çıkarılarak, bir bilgisayar programına aktarılmış ve transmitterden alınan analog sinyallerin  $\Delta P$  basınç farkına dönüşümü sağlanmıştır.



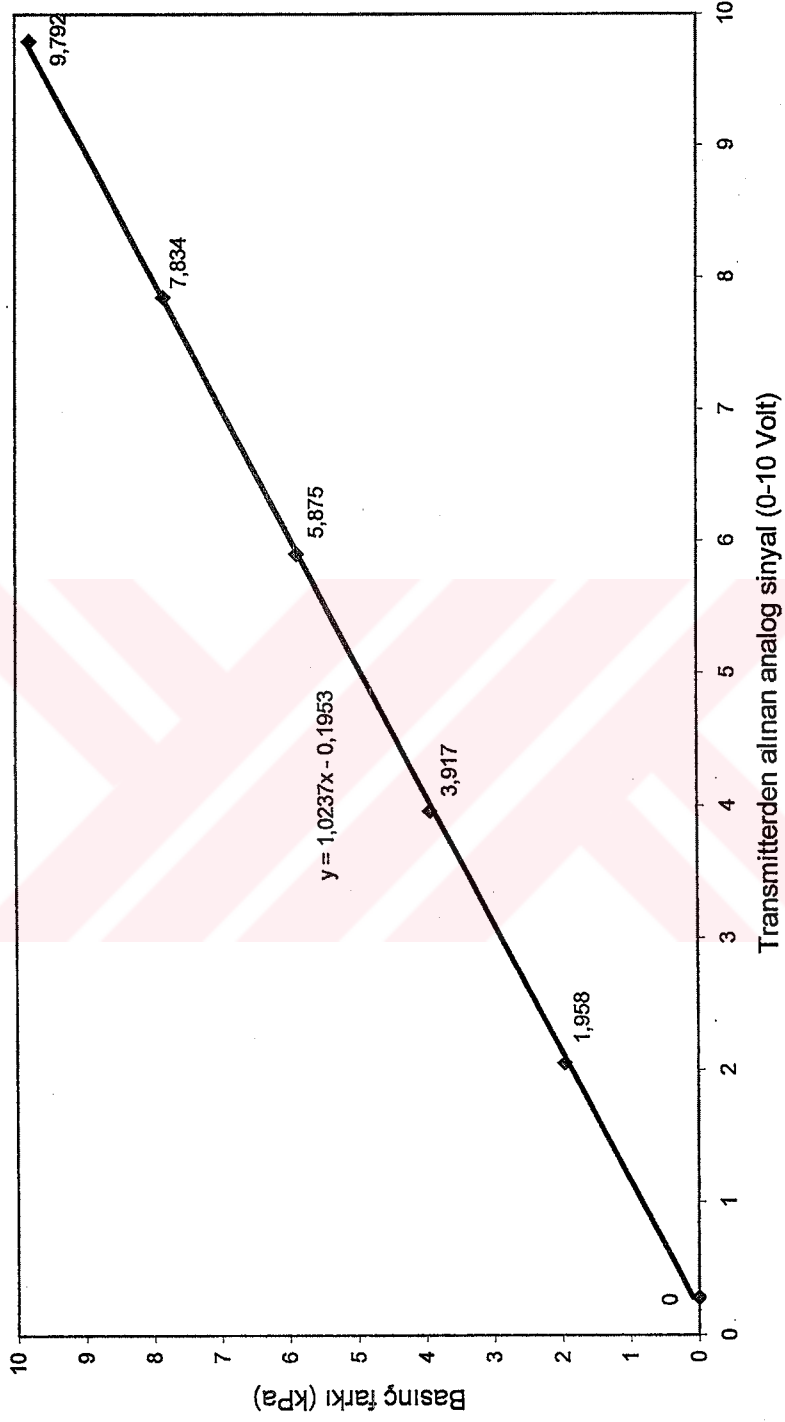
Şekil 5-14 Kalibrasyon şeması

Çizelge 5-2 Değişik basınç farklarına ait voltaj değerleri

Kollarda okunan su yükseklikleri farkı (m)	Transmitterden alınan analog sinyal (0-10 Volt)	Basınç farkı (0-1 mSS)	Basınç farkı (0-10 kPa)
0	0,28	0	0
0,20	2,05	0,1958	1,958
0,40	3,96	0,3917	3,917
0,60	5,9	0,5875	5,875
0,80	7,85	0,7834	7,834
1	9,8	0,9792	9,792

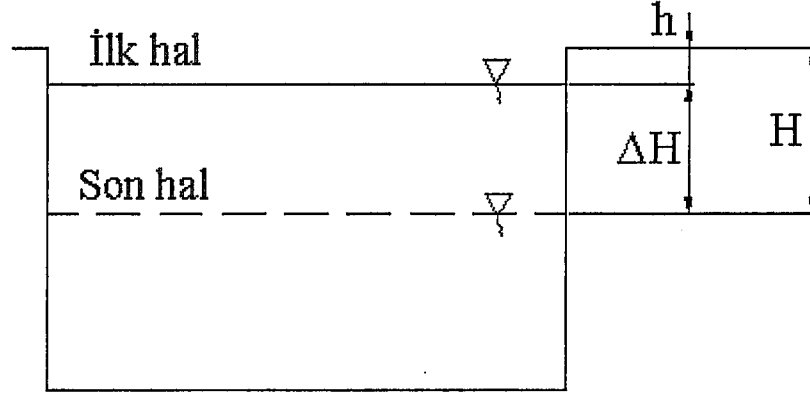


Şekil 5-15 Transmitterin kalibrasyon eğrisi (mSS-Volt)



Şekil 5-16 Transmitterin kalibrasyon eğrisi (kPa-Volt)

#### 5.4 Su Sayaçlarının Kalibrasyonu



Şekil 5-17 Su sayacı kalibrasyonuna ait temsili resim

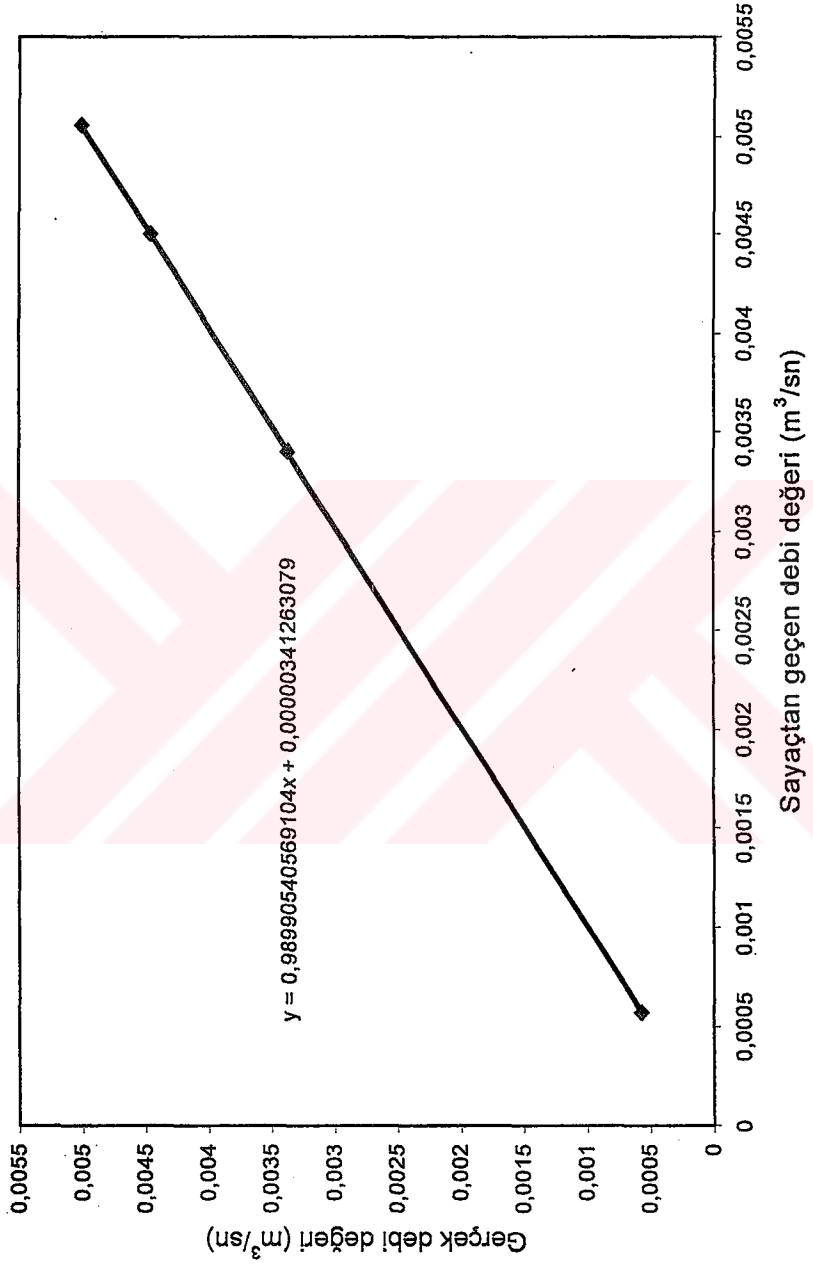
Bu işlem için ölçekli bir kap ve kumpastan yararlanılmıştır. İlk olarak depo taşma borusuna kadar su ile doldurulmuş ve su seviyesinin depo üst kenarından olan mesafesi kumpas kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 5.17’de h).

Depodan ölçekli kap yardımı ile belli hacimdeki su boşaltıldıktan sonra, depo üst kenarı ile depo içindeki su seviyesi arasındaki mesafe işaretlenmiştir (H). Depo bu işlemden sonra tekrar taşma borusuna kadar su ile doldurulmuştur.

Daha sonra su sayaçlarının pompa çalıştırılmadan önceki tüketim değerleri hazırlanan tabloya kayıt edilmiştir. Pompa basma vanası açıklığı belli bir konuma getirilip, pompa ve kronometre birlikte çalıştırılmıştır. Depodaki su seviyesi daha önce ölçekli kap ile boşaltılan su seviyesine gelene dek pompa çalıştırılmıştır. Bu esnada boşaltılan suyun depo dışına bırakılması sağlanmıştır. Su seviyesi istenen yüksekliğe ulaştığında basma vanası kapatılmış, pompa ve kronometre durdurulmuştur. Su sayacının tüketim değerleri tekrar alınıp, sayaçtan geçen su miktarı ( $m^3$ ) ile daha önce ölçekli kap yardımı ile alınan su miktarı ( $m^3$ ) arasında karşılaştırma yapılmıştır. Bu işlemler değişik pompa basma vanası açıklıkları uygulanarak tekrar edilmiş ve su sayacında okunan debi değeri ile sistemin gerçek akım debisi arasında bir ilişki kurulmuştur. Deneylerde kullanılacak su sayaçlarının kalibrasyonuna ait ölçüm değerleri (Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4) ve ilgili grafikler (Şekil 7.18 ve Şekil 7.19) aşağıda verilmiştir.

Çizelge 5-3 Kalibrasyona ait ölçüm değerleri (1. Su sayacı)

Tur (Pompa basma vanası açıklığı)	t (s)	1. Sayaç (m <sup>3</sup> )	2. Sayaç (m <sup>3</sup> )	3. Sayaç (m <sup>3</sup> )	H (mm)	Δ H (mm)	Δ V (sayaç) (m <sup>3</sup> )	Δ V (gerçek) (m <sup>3</sup> )	% Hata	Q (sayaç) (m <sup>3</sup> /s)	Q (gerçek) (m <sup>3</sup> /s)
-	-	709,72095	80,16525	70,9587	h=57,5	-	-	-	-	-	-
2	2147	710,961	80,16525	70,9587	356,5	299	1,24005	1,23188	0,66	5,77.10 <sup>-4</sup>	5,74.10 <sup>-4</sup>
-	-	710,961	80,16525	70,9587	h=56,6	-	-	-	-	-	-
3	362	712,1921	80,16525	70,9587	353	296,4	1,2311	1,221168	0,8	3,4.10 <sup>-3</sup>	3,37.10 <sup>-3</sup>
-	-	712,1921	80,16525	70,9587	h=57	-	-	-	-	-	-
4	274	713,4271	80,16525	70,9587	354	297	1,235	1,22364	0,9	4,5.10 <sup>-3</sup>	4,46.10 <sup>-3</sup>
-	-	713,4271	80,16525	70,9587	h=56,7	-	-	-	-	-	-
5	242	714,6517	80,16525	70,9587	351,075	294,375	1,2246	1,212825	0,97	5,06.10 <sup>-3</sup>	5,01.10 <sup>-3</sup>

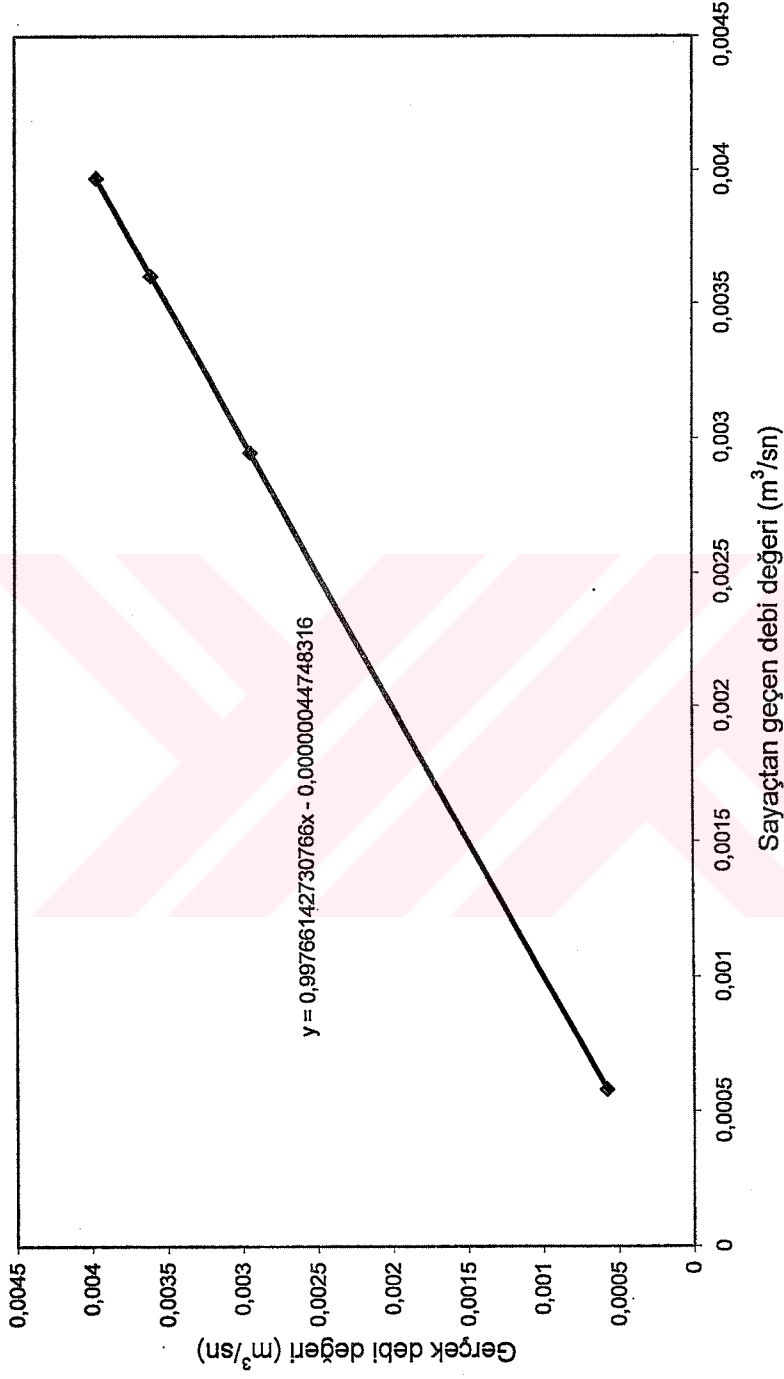


Şekil 5-18 Kalibraj eğrisi (1. Su sayacı)



Çizelge 5-4 Kalibrasyona ait ölçüm değerleri (2. Su sayacı)

Tur (Pompa basma vanası açıklığı)	t (s)	1. Sayaç (m <sup>3</sup> )	2. Sayaç (m <sup>3</sup> )	3. Sayaç (m <sup>3</sup> )	H (mm)	Δ H (mm)	Δ V (sayaç) (m <sup>3</sup> )	Δ V (gerçek) (m <sup>3</sup> )	% Hata	Q (sayaç) (m <sup>3</sup> /s)	Q (gerçek) (m <sup>3</sup> /s)
-	-	714,64295	86,3915	70,9626	h=57,2	-	-	-	-	-	-
2	2124	714,64295	87,62545	70,9626	355,8	298,6	1,23395	1,230232	0,3	5,81.10 <sup>-4</sup>	5,79.10 <sup>-4</sup>
-	-	714,64295	87,62545	70,9626	h=57,4	-	-	-	-	-	-
3	418	714,64295	88,8566	70,9626	355,5	298,1	1,23115	1,228172	0,24	2,95.10 <sup>-3</sup>	2,94.10 <sup>-3</sup>
-	-	714,64295	88,8566	70,9626	h=57	-	-	-	-	-	-
4	339	714,64295	90,0800	70,9626	353	296	1,2226	1,21952	0,25	3,61.10 <sup>-3</sup>	3,59.10 <sup>-3</sup>
-	-	714,64295	90,0800	70,9626	h=57	-	-	-	-	-	-
5	311	714,64295	91,315	70,9626	356	299	1,235	1,23188	0,25	3,97.10 <sup>-3</sup>	3,96.10 <sup>-3</sup>



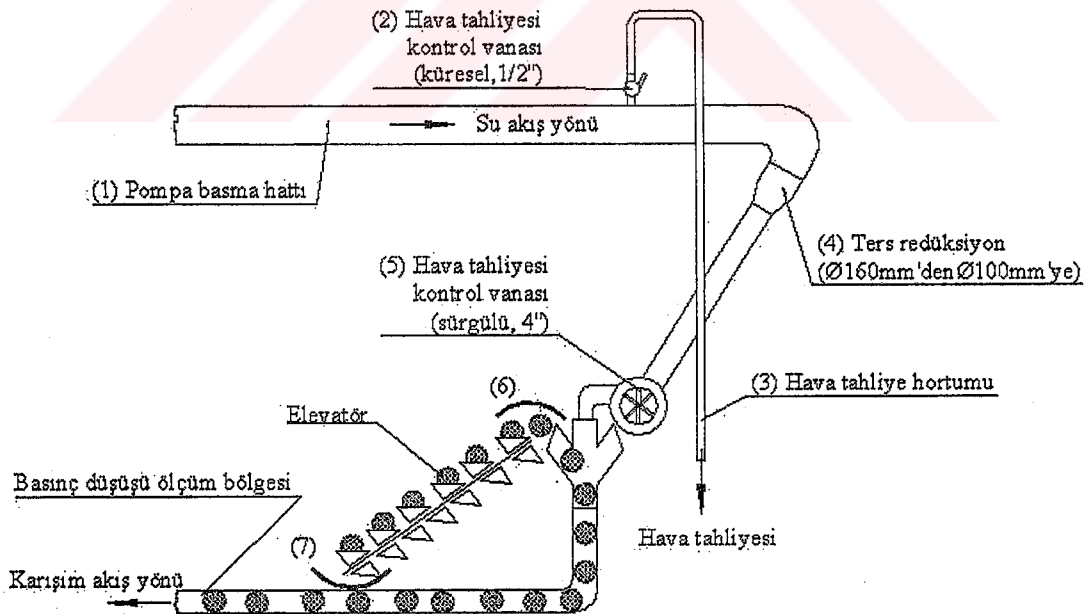
Şekil 5-19 Kalibraj eğrisi (2. Su sayacı)

## 5.5 Karşılaşılan Problemler ve Çözüm Yöntemleri

Deney tesisatı kurulum işlemleri tamamlandıktan sonra, ölçümler için sistem çalıştırıldıkça bir takım mekanik ve elektronik problemlerin olduğu görülmüştür. Doğru ölçümlerin alınabilmesi için sistemin kusursuz çalışması gerektiğinden bu problemlerin çözümü üzerinde çalışılmış, gerektiğinde tesisata özel olarak tasarlanmış parçalar ilave edilerek çalışma şartları iyileştirilmiştir.

### 5.5.1 Hava Tahliyesi Kontrol Vanaları

Basınç düşüşü ölçümleri yapılırken boru içinden geçen akışkanın borunun tamamını doldurması gerekmektedir. Deneyler sırasında pompa basma hattı bölgesinden (1), basınç düşüşü ölçüm bölgesine bir miktar hava akışının olduğu gözlenmiştir. Basma hattındaki boruyu (dış çapı 160mm) tam dolduramayan akışkan, hat bitiminde yer alan ters redüksiyondan (4) geçerken hız kazanmaktadır. Ters redüksiyonda oluşan düşük basınç, akışkan ile birlikte hava geçişine de neden olduğundan, basma hattı içinde biriken havanın tahliyesi için sisteme iki adet değişik özellikte vana ilavesi yapılmıştır (Şekil 5.20'de 2 ve 5).



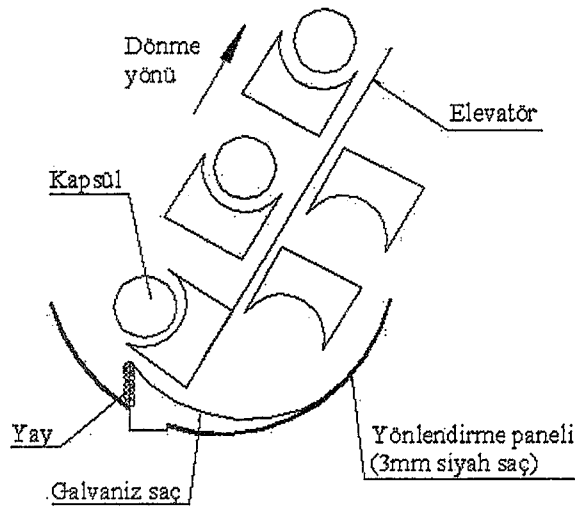
Şekil 5-20 Hava tahliyesi kontrol vanalarının tesisat üzerindeki yerleşimi

Basma hattındaki boruya monte edilen ve deneyler süresince hep açık konumda tutulan küresel vananın (2) ucuna ölçüm yapılacak bölgeye kadar uzanan hava tahliye hortumu eklenmiştir (3).

Ters redüksiyon ile kapsüllerin sisteme dahil oldukları nokta (6) arasındaki boru belli bir eğimde yerleştirilmiş, böylece akışkanın (redüksiyon çıkışından itibaren) bir film akışı şeklinde hava ile fazla türbülansa girmeden sisteme geçişi sağlanmıştır. Eğimli borunun sonuna yerleştirilen sürgülü vananın (5) belli oranlarda kısılması ile birlikte basma hattı içinde sıkışan hava, tahliye hortumu ile atılmıştır. Hortumdaki hava çıkışı kontrol edilerek basma hattı borusu (1) içindeki havanın tümüyle tahliyesi sağlandıktan sonra, boru içindeki suyun tahliye hortumunda belli bir yüksekliğe ulaşmasına dek sürgülü vananın kısılmasına devam edilmiştir. Böylece hem basınç düşüşü ölçüm bölgesine hava geçişi önlenmiş hem de çok yüksek su hızlarında bile basma hattı bölgesindeki su basıncı kontrol edilebilir bir hale getirilmiştir.

### 5.5.2 Kapsül Yönlendirme Panelleri

Kapsüllerin elevatöre geçişi ve elevatörden sisteme dahil edildiği noktalara, kapsül hareketlerini sınırlayıcı özellikte yönlendirici paneller ilave edilmiştir (Şekil 5.20'de 6 ve 7). Kapsüllerin kepçe içlerine tam olarak oturmasını sağlamak için elevatör kepçelerini kayışa bağlayan civatalar kısaltılmış, kepçenin her seferinde bir tek kapsülü alabilmesi için galvaniz saçtan (0.4mm) yaylı bir mekanizma tasarlanarak yönlendirme paneline monte edilmiştir (Şekil 5.21).

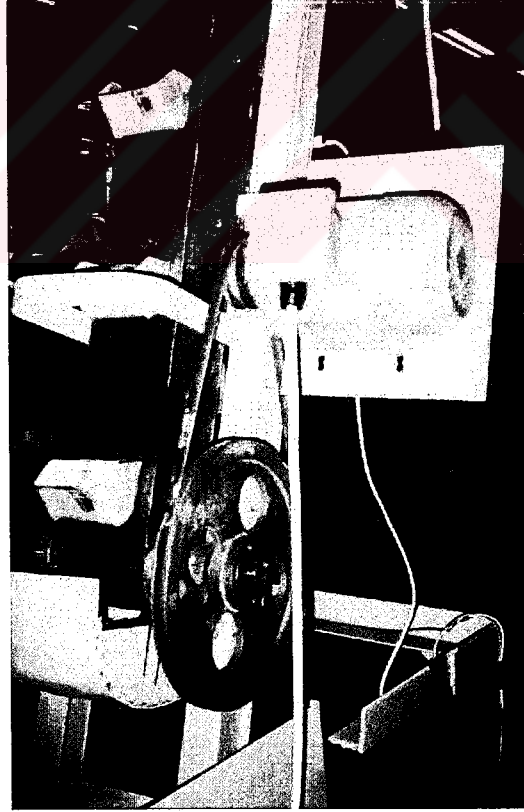


Şekil 5-21 Yönlendirme paneline monte edilmiş yaylı mekanizma

Elekten elevatöre uzanan hattı yüksek hızla geçen kapsüllerin elevatöre geçişi sağlayan 90°'lik dirsek ile elevatör kepçesi arasında sıkışarak düzensiz kapsül akışına neden olması üzerine dirsek 45°'lik dirsek ile değiştirilerek sorun giderilmiştir. Deneylerden önce kapsül besleme boru hattının tam dolu olmasına dikkat edilmiştir.

### 5.5.3 Kayış Kasnak Mekanizması

Deneyler sırasında, elevatör tam dolu halde iken tambur miline bağlı 0.75 Kw'lık elektrik motorunun döndürme momentinin yetersiz kaldığı buna bağlı olarak da motor sürücüsünün aşırı yük hatası vererek çalışmayı durdurduğu tespit edilmiştir. Motor mili ile elevatör tambur mili arasına kayış kasnak mekanizması ilavesi ile tambur milinin döndürme momenti 4 kat arttırılmış ve tam dolu haldeki elevatörün çok düşük hızlarda bile problemsiz bir şekilde çalışması sağlanmıştır. Motor miline bağlı kasnak çapı 8cm, tambur miline bağlı kasnak çapı 32cm olarak seçilmiştir (Şekil 5.22).



Şekil 5-22 Kayış kasnak mekanizması

#### 5.5.4 Klasik Manometre

Transmitterden alınan basınç düşüşü değerlerine ait bir karşılaştırma yapılabilmesi amacı ile sisteme U manometresi ilave edilmiştir.

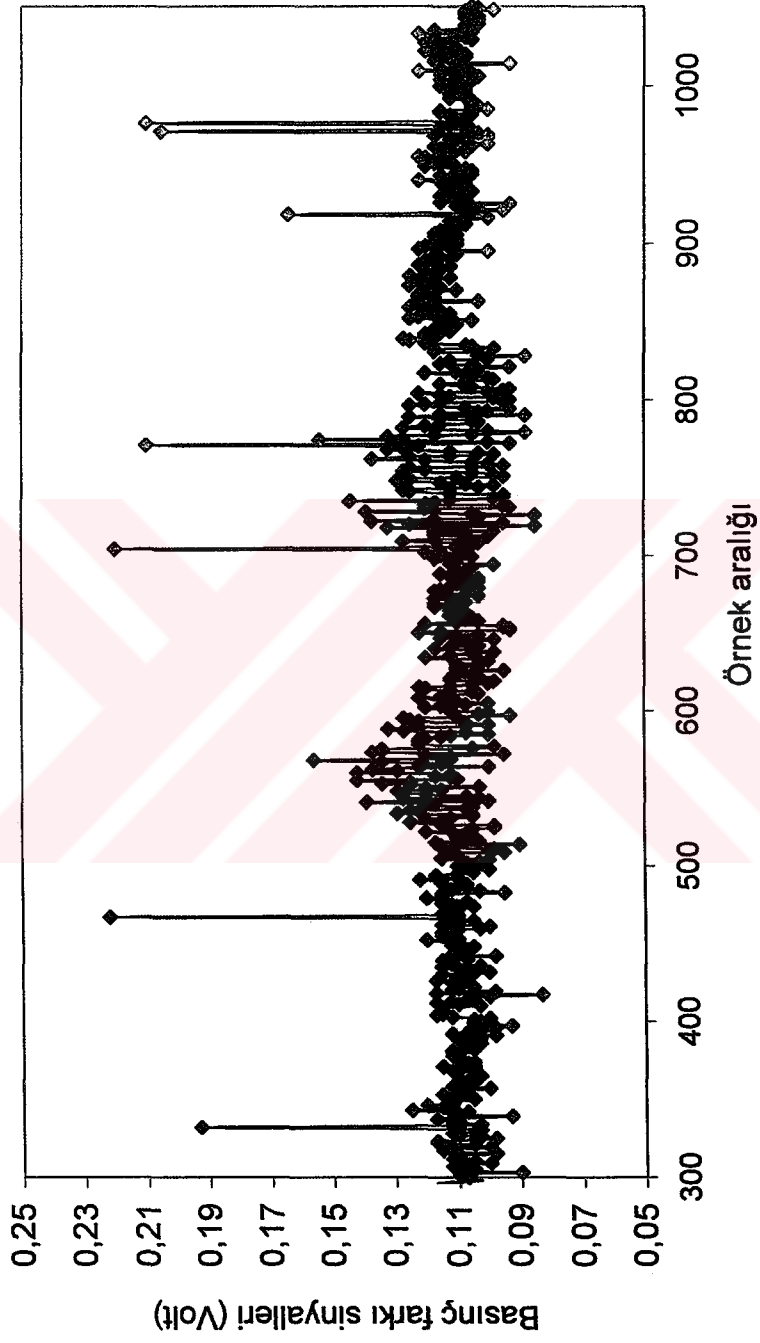
Deneyler sırasında, manometre kollarındaki su seviyelerinde meydana gelen salınımları sönmölemek için, ölçüm hattından manometreye ve fark basınç transmitterine giden piyezometrik hortumlar arasına değişik ebatlarda kompansatörler yerleştirilmiştir. Ayrıca, manometredeki su seviyesini gösteren kollar arasına da hava geçişini zorlaştırıcı bir eleman eklenerek, salınım problemi büyük ölçüde çözülmüştür.

#### 5.5.5 Ölçekli Kapsül Gözlem Hattı

Akış sırasında kapsüller arasındaki mesafenin yapılan gözlemler ile de tespiti için basınç düşüşü ölçüm bölgesindeki pleksiglas borunun 1m'lik bir bölümü ölçeklendirilmiştir. Değişen akım şartlarında bu bölgeden geçen kapsüllerin fotoğrafı çekilerek, kapsüller arasındaki mesafe ve 1m'deki anlık kapsül adedi gözleme dayalı olarak belirlenmiştir. Ayrıca bu bölgeden geçen kapsül hızları kronometre ile belirlenerek, bilgisayar ortamından alınan sinyal girişlerine göre tespit edilen kapsül gerçek hızlarına ait bilgiler pekiştirilmiştir.

#### 5.5.6 Deney Tesisatına Ait Topraklama Hattı

Deneyler sırasında, bilgisayar yolu ile yapılan basınç düşüşü ölçümleri incelendiğinde aşırı basınç piklerinin oluştuğu ve basınç düşüşü değerlerinin ortalaması hesaplanırken bu yüksek değerlerin ortalama değeri değiştirdiği tespit edilmiştir. Bunun üzerine, sistemin tüm elektronik devreleri gözden geçirildikten sonra sorunun topraklama kaynaklı olduğu görülmüştür. 1.6Ω'luk ayrı bir toprak hattı döşenmiş, bilgisayarın topraklaması bu hatta bağlandıktan sonra değerler normale dönmüştür.



Şekil 5-23 Topraklama işleminden önce alınan sinyal grafiği ( $V_s=0$ )

## 6. DENEYLERİN YAPILIŞI VE HESAPLAR

Deneylerin esas amacı değişik kapsül konsantrasyonlarında ve değişik su hızlarında, 4m'lik ölçüm bölgesinde meydana gelecek basınç düşüşlerini bulmaktır. Ölçüm bölgesindeki borunun hidrolik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ilk olarak su ile deneyler yapılmıştır.

Deneylere başlamadan önce, sisteme ait parametreler oluşturulmuş ve deney stratejisi belirlenmiştir.

### 6.1 Kapsül-Su Karışım Akışının Deneysel Parametreleri

Kapsül-su karışım akışına ait matematiksel model kurulmadan önce, akış özelliklerini belirleyici parametreler tespit edilmiştir. Kapsül-su karışım akışına ait deneysel parametreler ve tesisatın teknik özelliklerine bağlı olarak ölçüm şekilleri aşağıda özetlenmiştir.

#### 6.1.1 Su Hızı

Su hızı, sayaçlar ile bulunan debi değerinin ölçüm bölgesindeki borunun kesit alanına bölünmesi ile bulunmuştur.

$$V_s = \frac{Q_s(\text{sayaç})}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (\text{m/s}) \quad (6.1)$$

Daha önce kalibrasyonu yapılmış soğuk su sayacından 1m<sup>3</sup> suyun geçmesi için gereken süre kronometre ile tespit edilmiştir. Geçen hacmin süreye bölünmesi ile de akımın debisi hesaplanmıştır. Deneyler sırasında su debisi kapsüller sisteme dahil olmadan önce ayarlanmıştır. Kapsüller ile yapılan deneyler süresince başlangıçtaki debi ayarı değiştirilmemiştir. Belirlenen hız ve konsantrasyondaki ölçümler yapıldıktan sonra sistem durdurulmuştur. Değişik pompa basma vanası açıklıkları ile değişik hacimsel debi değerleri elde edilmiş, en küçük su debisinden en yüksek su debisine çıkılarak, %5'ten %35 kapsül konsantrasyonuna kadar deneyler yapılmıştır.

Tesisatta mevcut su sayaçlarının bir tanesi ile maksimum 30m<sup>3</sup>/h debi miktarı okunabilmektedir. Bu değer saniyede yaklaşık 0.008m<sup>3</sup>'lük debiye ve yaklaşık 1m/s'lik su hızlarına (ölçüm bölgesindeki boru iç çapı 100mm alındığında) karşılık gelmektedir. Düşük su hızlarında yapılan deneylerde (<1m/s) sadece 1 su sayacı yeterli olmuştur. Ancak deneyler esnasında kayıplardan ötürü tek su sayacı ile ancak 0.74m/s'lik su hızlarına kadar okuma



yapılabilmiştir. Yüksek su hızlarında, sistemde dolaşacak debi miktarının tespiti için devrede olan su sayaçları ayrı ayrı okunmuş ve bulunan değerler toplanmıştır. Deneyler süresince 3 su sayacından sadece ikisi kullanılmıştır (maksimum su hızı yaklaşık 2m/s).

### 6.1.2 Kapsül Hızı ve Ortalama Hız

Kapsül debisinin ölçüm bölgesindeki borunun kesit alanına bölünmesi ile hesaplanır ve su akışının etkisinde değildir.

$$Q_{kp} = \frac{\pi d^3}{6} N_{din} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (6.2)$$

Kapsül hızı, süreklilik denklemi kullanılarak;

$$V_{kp} = \frac{Q_{kp}}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{\frac{\pi d^3}{6} N_{din}}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (\text{m/s}) \quad (6.3)$$

olarak bulunur. Kapsül ve suyun beraber akışı sırasında ulaştıkları hız değeri ise ortalama hızı vermektedir ve aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$V_{ort} = \frac{4(Q_s + Q_{kp})}{\pi D^2} \quad (6.4)$$

### 6.1.3 Deneylerden Önce Belirlenen Teorik Kapsül Adedi

Deneylere başlamadan önce, ölçüm bölgesi içerisinde meydana gelecek dinamik kapsül konsantrasyonunun yaklaşık olarak bilinmesi gerekmektedir. Arzu edilen dinamik kapsül konsantrasyonunu oluşturacak teorik N değeri ( $N_{te}$  =adet kapsül/saniye) belirlendikten sonra, elevatör devri, saniyede  $N_{te}$  adet kapsülün sisteme bırakılmasını sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Dinamik konsantrasyon, sistemde hareket halindeki katı madde oranı olarak tanımlanırsa, su hızı ve sistemden saniyede geçen kapsül adedi dinamik konsantrasyonu belirleyecektir. İstenilen dinamik kapsül konsantrasyonları ve çalışma yapılan su hızları belli olduğundan, saniyede geçen kapsül adedi yaklaşık olarak bulunabilir.

$$C_{din} = (\text{Su hızı ya da ortalama hız}, \text{Kapsül adedi/saniye})$$

$$N_{te} = (V_s, C_{din}) \text{ ya da } N_{te} = (V_{ort}, C_{din}) \text{ olarak ifade edilir.}$$

$$C_{din} = \frac{Q_{kp}}{Q_s + Q_{kp}} = \frac{\frac{\pi d^3}{6} N_{te}}{Q_s + \left( \frac{\pi d^3}{6} N_{te} \right)} \quad (6.5)$$

$$\frac{\pi d^3}{6} N_{te} = C_{din} \left( Q_s + \frac{\pi d^3}{6} N_{te} \right)$$

ve buradan;

$$N_{te} = \frac{1}{\frac{\pi d^3}{6} (1 - C_{din})} Q_s \quad (6.6)$$

şeklinde  $N_{te}$  sayısı belirlenir. Çalışma yapılan kapsül çapı 0.08m ise  $\pi d^3/6$  değeri 0.000268 gibi sabit bir sayı olacaktır. Eşitlik 6.6 yeniden düzenlenirse;

$$N_{te} = 3731.34 \frac{C_{din}}{(1 - C_{din})} Q_s \quad (6.7)$$

olarak, çapı 0.08m olan kapsüller için uygulanabilir bir hale gelecektir. Ölçüm yapılması istenilen konsantrasyon değerleri belirli olduğundan, Eşitlik 6.7 için Çizelge 6.1 düzenlenebilir.

Çizelge 6-1 Dinamik konsantrasyon değerlerine göre Eşitlik 6.7'de kullanılacak sabitler

Konsantrasyon	$3731.34 \frac{C_{din}}{(1 - C_{din})}$
%5	196.386
%10	414.59
%15	658.47
%20	932.83
%25	1243.78
%30	1599.14

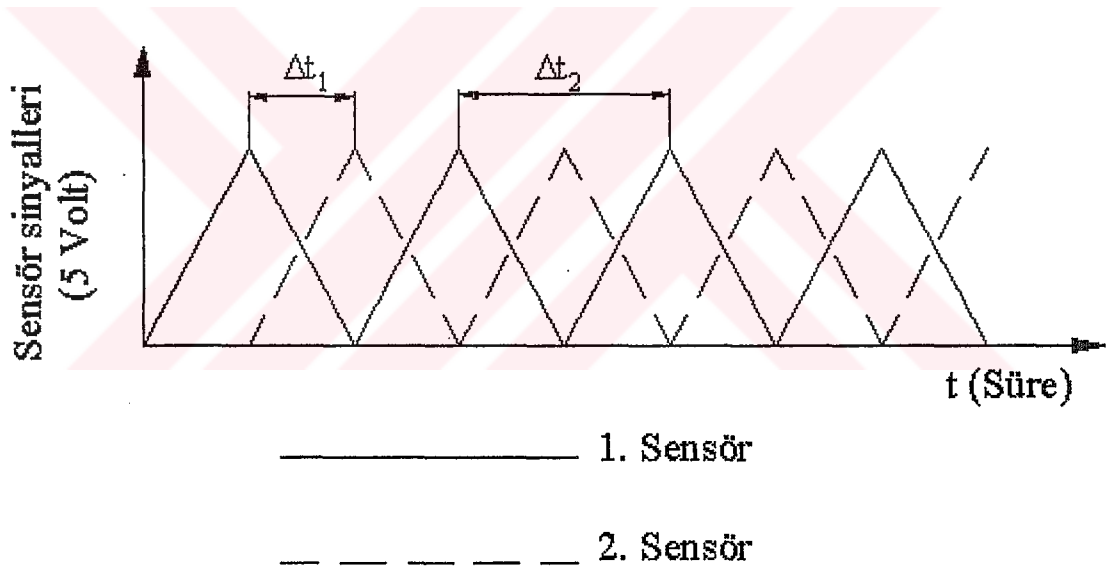
Deneyler sırasında, değişik kapsül çapları ve dinamik kapsül konsantrasyonları için (%5-30), belirli akım debilerinde Eşitlik 6.7 kullanılarak  $N_{te}$  sayısı hesaplanır. Saniyede sisteme bırakılması gereken kapsül adedi dikkate alınarak elevatör devri ayarlanır.

#### 6.1.4 Dinamik Konsantrasyon Kapsül Adedi

$N_{din}$ , sistemde  $N_{te}$  sayısına göre ayarlanmış akım şartları rejime girdikten sonra, kart vasıtası ile bilgisayar ortamına aktarılan sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunmuştur.

Ölçüm bölgesinden saniyede geçen gerçek kapsül adedini ifade eden bu değer aynı zamanda, kapsül-su karışım akışındaki gerçek dinamik kapsül konsantrasyonunu bulmamızı sağlar.

Özellikleri 5. Bölümde verilen, ölçüm bölgesine yerleştirilmiş iki adet sensörün bilgisayar ortamına aktarılan sinyal değerlerinin (volt), şematik olarak gösterimi aşağıdaki gibidir.



Şekil 6-1 Bilgisayara aktarılan sensör sinyallerinin şematik gösterimi

Bilgisayarın örnek alma kapasitesi saniyede 50 örneğe ayarlanmış olup,  $n$  bilgisayar programına aktarılan 1050 örnek arasında, her bir sensörün sinyal değerlerindeki pik sayısıdır. Sinyal piklerinin arasındaki süreler ise program sayesinde bilinmektedir. Bu durumda ölçüm bölgesinden saniyede geçen kapsül adedi:

$N_{din}=1$  (adet) / Kapsüllerin herhangi bir sensörü ardarda geçişi arasındaki zaman (s)

olarak ifade edilebilir. Bir kapsülün iki sensör arasındaki mesafeyi geçme süresi  $\Delta t_1$ , kapsüllerin aynı sensörü ardarda geçişi arasındaki süre ise  $\Delta t_2$  olarak adlandırılmıştır. Gerçek dinamik kapsül adedinin belirlenmesinde  $\Delta t_2$ 'lerin ortalaması hesaplamalarda yeterli olacaktır.

$$\Delta t_{2(ort)} = \frac{\sum_{n=1}^n \Delta t_2}{n} \text{ olarak yazılırsa,} \quad (6.8)$$

ölçüm bölgesinden saniyede geçen kapsül adedi:

$$N_{din} = \frac{1}{\Delta t_{2(ort)}} \quad (6.9)$$

şeklinde hesaplanır. Bu durumda kapsül-su karışım akışındaki gerçek dinamik kapsül konsantrasyonu:

$$C_{din} = \frac{Q_{kp}}{Q_s + Q_{kp}} = \frac{\frac{\pi d^3}{6} N_{din}}{Q_s + \left( \frac{\pi d^3}{6} N_{din} \right)} \quad (6.10)$$

olarak ifade edilir.

### 6.1.5 Gerçek Kapsül Hızı ve Kayma Oranı

Kapsülün su ile birlikte akışı sırasında ulaştığı gerçek hızdır. Bu değer bilgisayar ortamına aktarılan sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunmuştur. Basınç düşüşü ölçüm bölgesine yerleştirilen sensörler arasındaki mesafe 0.1m olup, bir kapsülün iki sensör arasındaki mesafeyi geçme süresi bilinmektedir.

$$\Delta t_{1(ort)} = \frac{\sum_{n=1}^n \Delta t_1}{n} \quad (6.11)$$

Bu durumda kapsül gerçek hızı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

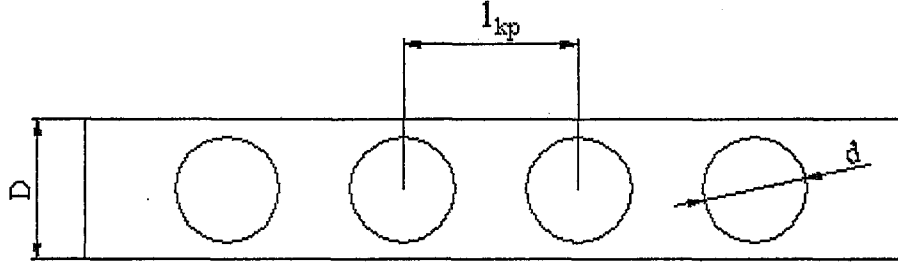
$$V_{kp(G)} = \frac{0,1}{\Delta t_{1(ort)}} \text{ (m/s)} \quad (6.12)$$

Gerçek kapsül hızının ortalama hıza oranı ise sıvı fazın katı fazı sürüklenme oranı olan

kaymayı verecektir (Hız oranı).

$$R_v = \frac{V_{kp(G)}}{V_{ort}} \quad (6.13)$$

### 6.1.6 Kapsüller Arası Mesafe ve Statik Konsantrasyon Kapsül Adedi



Şekil 6-2 Zinciri oluşturan kapsüller arasındaki mesafe

Kapsüllü akış sırasında, 1m uzunluğunda ölçeklendirilmiş bölgede yapılan gözlemler, kapsüller arasındaki mesafeler ve statik konsantrasyonlar hakkında kısmi olarak bilgi edinmemizi sağlamıştır. Ancak, zinciri oluşturan kapsüller arasındaki mesafenin tam olarak belirlenmesi ve bu şekilde gerçek statik kapsül konsantrasyonlarına ulaşmamız bilgisayar ortamına aktarılan sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile mümkün olmuştur. Hız, kapsülün saniyede aldığı yol olarak düşünülürse, kapsüller arasındaki mesafe:

$$l_{kp} = V_{kp(G)} \times \Delta t_{2(ort)} \quad (6.14)$$

olarak ifade edilir. Bu durumda 1m'lik bölge içindeki statik konsantrasyonu oluşturan kapsül adedi aşağıdaki gibi yazılır.

$$N_{st} = \frac{L}{l_{kp}} \quad (6.15)$$

1m uzunluğundaki bölgede statik konsantrasyonu oluşturan kapsül adedi belirlendikten sonra gerçek statik konsantrasyon:

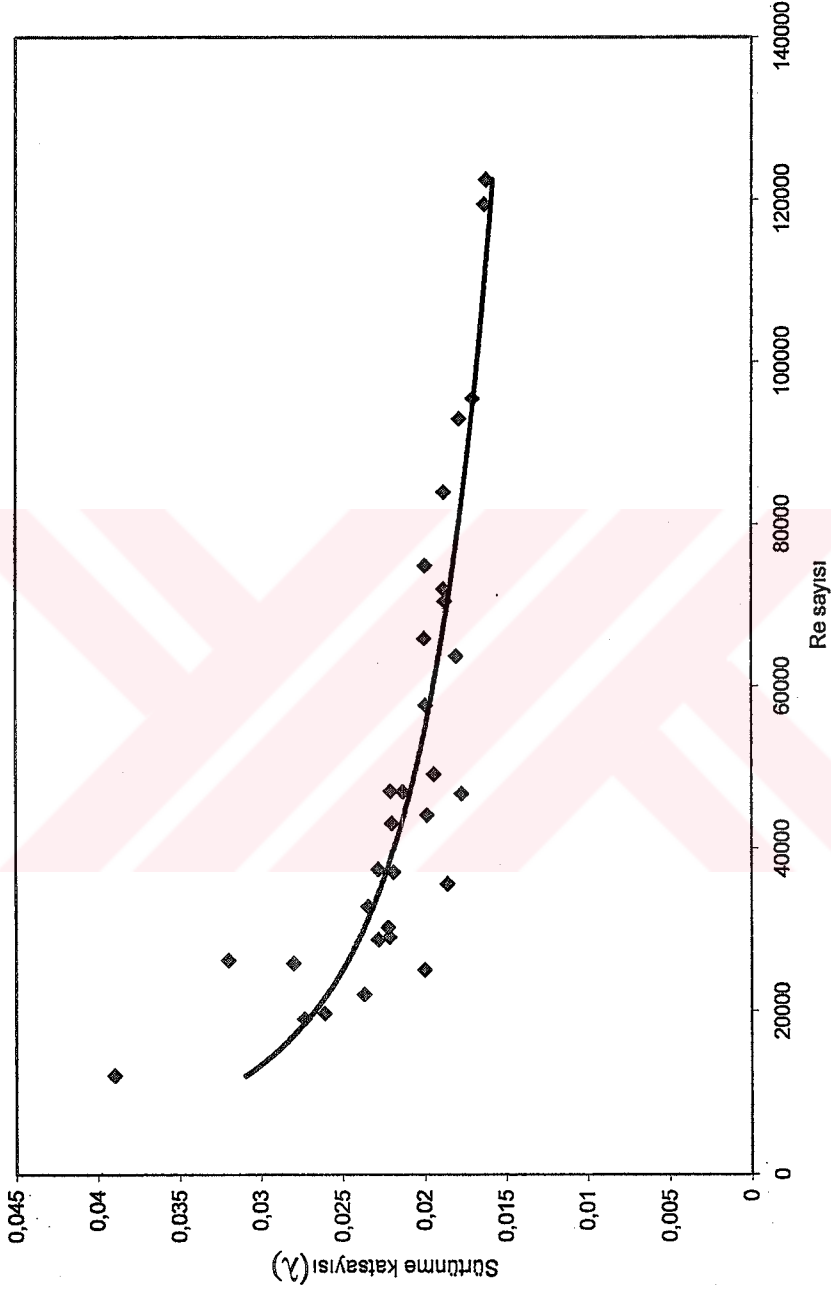
$$C_{st} = \frac{\frac{\pi d^3}{6} N_{st}}{\frac{\pi D^2}{4} L} \quad (6.16)$$

olarak bulunur.

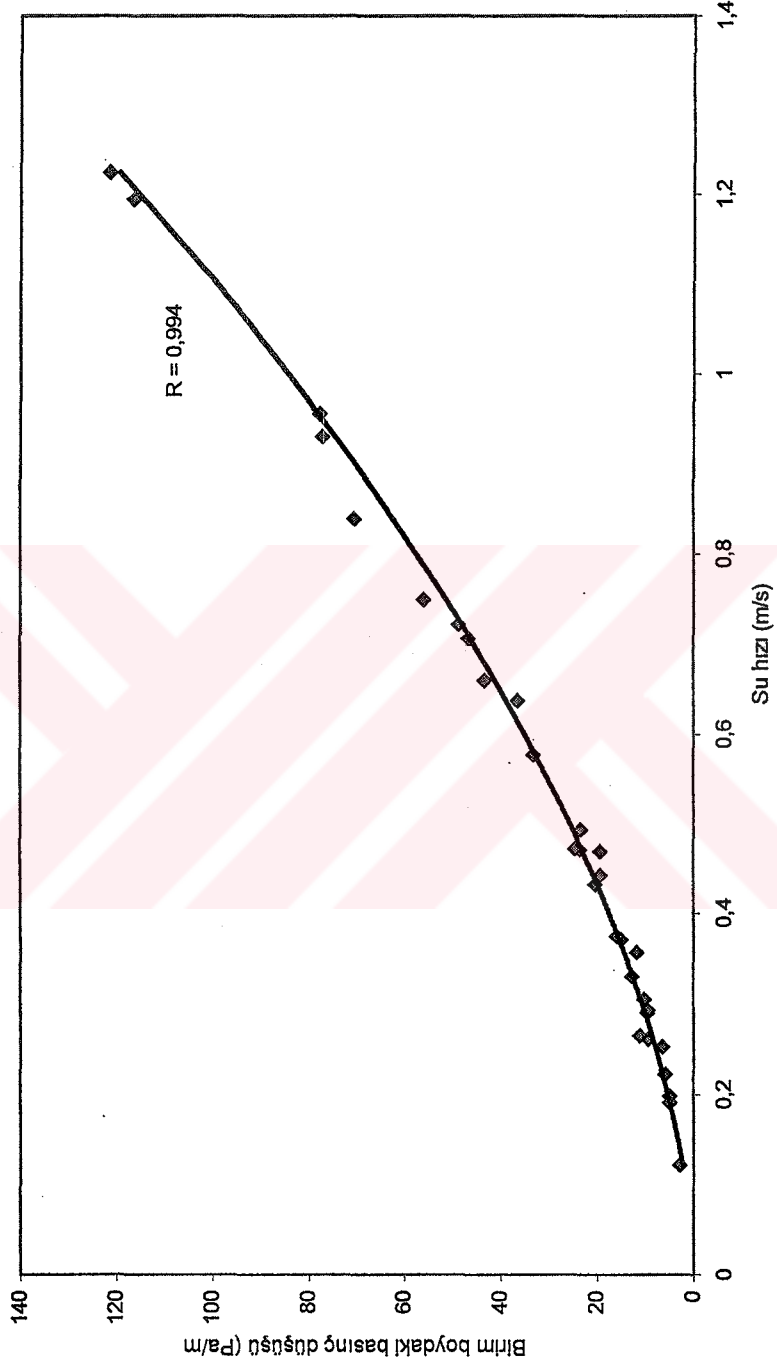
### 6.1.7 Tek Faz Su Akışında Oluşan Basınç Düşüşü

Akışkan durgun halde iken basınç düşüşü sıfırdır. Su hız kazandıkça boru sürtünmesine bağlı olarak basınç düşüşü artar. Deneyler sırasında her bir debi ayarından sonra kapsüllü akışa geçmeden önce sadece su akışının oluşturduğu basınç düşüşlerine ait ölçümler yapılmıştır. Saniyede 50 örneğe ayarlı bilgisayar programı ile 1050 adet basınç salınımı değeri bilgisayara kayıt edilmiş ve ortalamaları hesaplanmıştır. Aynı zamanda sisteme ilave edilen klasik manometre ile de basınç düşüşlerine ait okumalar yapılmıştır. Su akışında ölçülen basınç düşüşü değerleri ölçüm hattındaki borunun hidrolik özelliklerini belirlemede yardımcı olmuştur. Belirli hızlarda su akışına ait basınç düşüşü değerleri Darcy-Weisbach denkleminde yerlerine yazılarak borunun sürtünme katsayısı ( $\lambda$ ) hesaplanmıştır. Akımın Re sayısı hesaplanırken , 20°C ortam sıcaklığındaki suyun kinematik viskozitesi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ölçüm hattında kullanılan borunun hidrolik olarak pürüzsüz olduğu kabul edilmiştir.

Basınç düşüşü değerlerinin, ölçüm bölgesinin uzunluğuna bölünmesi ile de su akışına ait birim boyağıdaki basınç düşüşü  $i_s=(\Delta P/L)_s$  değerleri elde edilmiştir. Tek faz su akışında  $\lambda$ -Re ve  $i_s$ - $V_s$  değerleri arasındaki ilişkiyi veren grafikler Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'deki gibidir.



Şekil 6-3 Sürtünme katsayısının Re sayısına bağlı olarak değişimi



Şekil 6-4 Birim boydaki basınç düşüşünün su hızına bağlı olarak değişimi



### 6.1.8 Kapsül Su Karışım Akışında Oluşan Basınç Düşüşü

Akışkanın yalnız akışı sırasında belli bir basınç düşüşü oluşmaktadır, kapsüllü akışta ise katı fazın varlığından dolayı basınç düşüşü artar. Suyu ait ölçümler yapıldıktan sonra, belirlenen akış şartlarında, en düşük dinamik kapsül konsantrasyonundan başlanarak en yüksek kapsül konsantrasyonuna kadar basınç düşüşü ölçümleri yapılmıştır. Bilgisayar programına aktarılan 1050 basınç düşüşü değerinin ortalaması hesaplandıktan sonra değişik akış hızlarına karşılık gelen kapsül su karışımına ait birim boydaki basınç düşüşü değerleri  $i_{kr}=(\Delta P/L)_{kr}$  tespit edilmiştir.

## 6.2 Deneylerin Yapılışı

- 1- Deponun %80'i su ile dolduruldu.
- 2- Ölçüm cihazlarının endüstriyel otomasyon kartı ile bağlantıları kontrol edildi. Bilgisayardaki otomasyon programı deney stratejisine göre ayarlandı.
- 3- İlk olarak, ölçüm bölgesi içindeki akışkan durgun halde iken transmitter ile sıfır ölçümü yapıldı ve kalibrasyondaki sıfır değeri ile karşılaştırıldı. Bu değer kayıt edildi.
- 4- Manometreye giden piyezometrik hortumlar içindeki hava kabarcıkları alındı.
- 5- Pompa basma vanası açıklığı minimum konuma getirildi (daha sonra kademeli olarak açılacaktır) ve pompaya yol verildi. İstenilen debi miktarı ayarlandıktan sonra suyun tüm tesisatı dolaşması sağlandı.
- 6- Hava çıkışını sağlayan kontrol vanaları kullanılarak (sifon etkisi), ölçüm bölgesi içine hava girişi önlendi.
- 7- Su sayacından  $1m^3$  suyun geçmesi için gereken süre kronometreden tespit edildi ve süreklilik denkleminde (boru iç çapı sabit 0.1m) su hızı belirlendi. Belirlenen debi ve hız değerleri deneysel bilgilerin işlenmesi için hazırlanan tabloya kayıt edildi.
- 8- Pleksiglas borudan yapılan gözlemlerde havasız su akışının olup olmadığı kontrol edildi. Akış tümüyle rejime girdikten sonra sadece su akışına ait basınç düşüşü ölçümleri yapıldı. Ayrıca manometre ile yapılan okumalarda tabloya işlendi.
- 9- Ölçüm yapılacak kapsül konsantrasyonu (başlangıç değeri %5-10, bitiş değeri %25-30) ve su debisi (vana açıklığına bağlı olup, ölçümler boyunca sabit kaldı) Eşitlik 6.7' de yerine

- yazılarak teorikteki dinamik kapsül konsantrasyonunu oluşturan kapsül adedi belirlendi (adet kapsül/s). Elevatör motoru sürücüsü çalıştırıldı ve devri kademeli olarak arttırıldı. Elevatöre bağlı sensör devreye alınarak, 10 saniyeye ayarlanmış sayıcı ile sisteme bırakılan kapsül sayısı okundu. Belirlenen dinamik kapsül konsantrasyonunu sağlayacak kapsül adedine ulaşıncaya sürücü devir sayısı sabit bırakıldı.
- 10- Kapsüller belli aralıklarla sisteme dahil olduktan sonra, ölçüm bölgesi içindeki kapsül akışı kararlı bir hale (düzenli akış) gelene dek beklenildi.
  - 11- Elevatöre yerleştirilmiş sensör ile pano içindeki sayıcıya paralel bağlı olan, ölçüm bölgesi üzerindeki sensörlerden biri devreye alınarak bu bölgedeki dinamik kapsül konsantrasyonu oluşturacak kapsül adedinin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edildi.
  - 12- Kapsüller ölçüm bölgesi üzerindeki sensörlerin önünden geçerken sensörlerin kapsülleri algılayıp algılamadığına bakıldı. Gerektiğinde sensörlerin cismi görme ayarı değiştirildi.
  - 13- Basınç düşüşü ölçümleri yapıldı. Değerler bilgisayara kayıt edildi. Aynı anda manometre ile de basınç farklarına ait okumalar yapılarak tabloya işlendi.
  - 14- Ölçüm hattı üzerinde, ölçeklendirilmiş 1m uzunluğundaki bölgeden geçen kapsüllerin fotoğrafı çekilerek, kapsüller arasındaki mesafenin belirlenmesine alternatif olarak oluşturuldu.
  - 15- Kapsülün 1m uzunluğundaki ölçekli bölgeyi ne kadar sürede geçtiği kronometre ile tespit edilerek kapsüllerin gerçek hızları hakkında gözleme dayalı bir ölçüm gerçekleştirildi.

### 6.3 Kapsül Su Karışım Akışına Ait Örnek Hesap

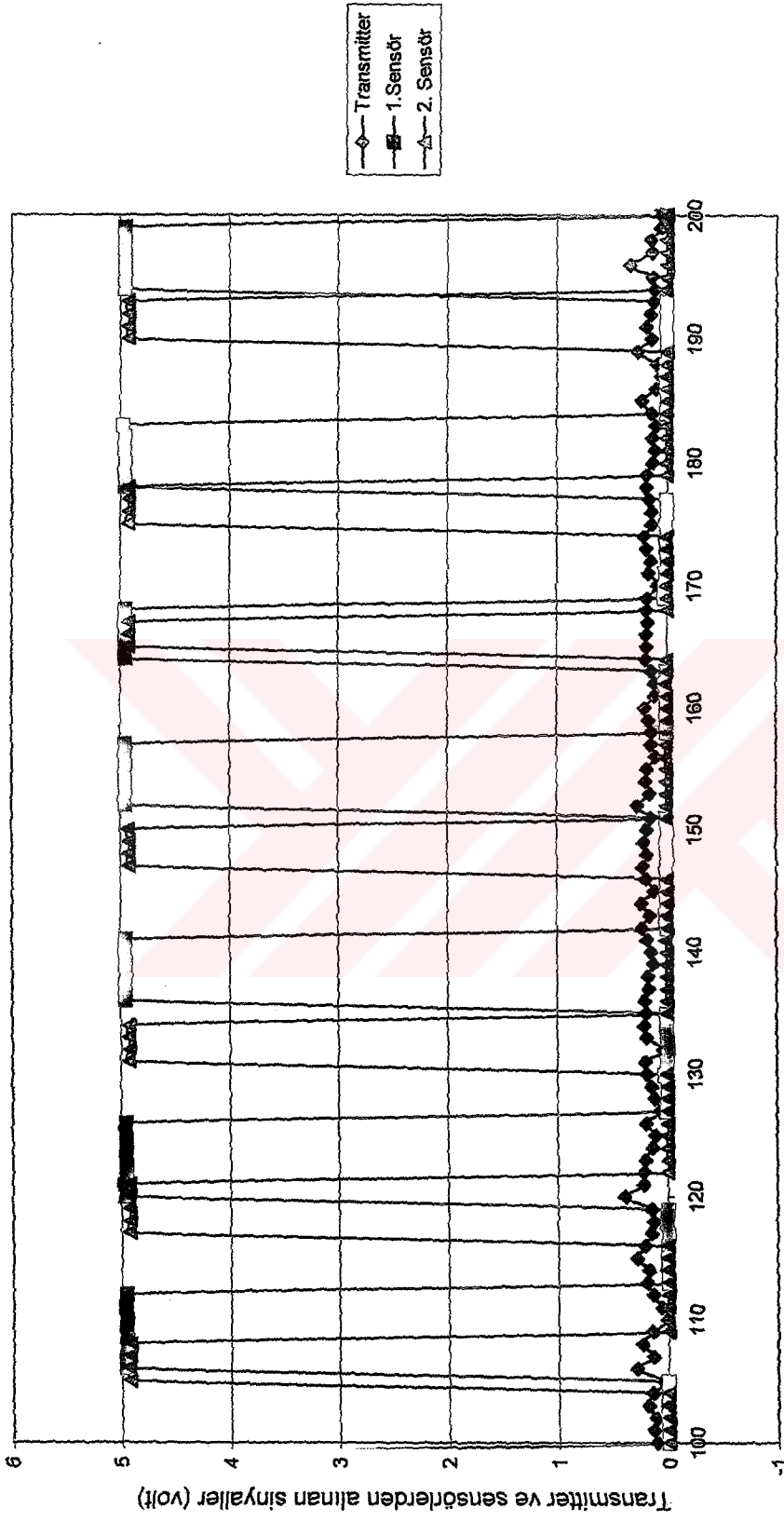
Deneysel işleyiş dikkate alınarak hazırlanan, gözleme dayalı deneysel bulguların ve bilgisayar programından alınan (transmitter) sinyal bilgilerinin işlendiği şablon tablo (Çizelge 6.2) aşağıdaki gibidir. Yapılan ölçümlere göre sistemin akış karakteristiği belirlenmiş olup, seçilen herhangi bir akım şartında toplanan bilgilerin değerlendirilmesi yapılacaktır. Bu işlem için, deneylerden birine ait bulgular örnek olarak verilmiştir. Teorik yaklaşım ile bulunan değerler ve kısmen gözleme dayalı olarak yapılan ölçümler ile bilgisayardan alınan sinyal değerleri arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Su hızı 0.289m/sn iken %25 dinamik kapsül konsantrasyonuna ait ölçümde transmitterden ve sensörlerden bilgisayara aktarılan sinyal değerlerinin grafiği Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'daki gibidir.

Çizelge 6-2 Deneysel bulgu tablosu

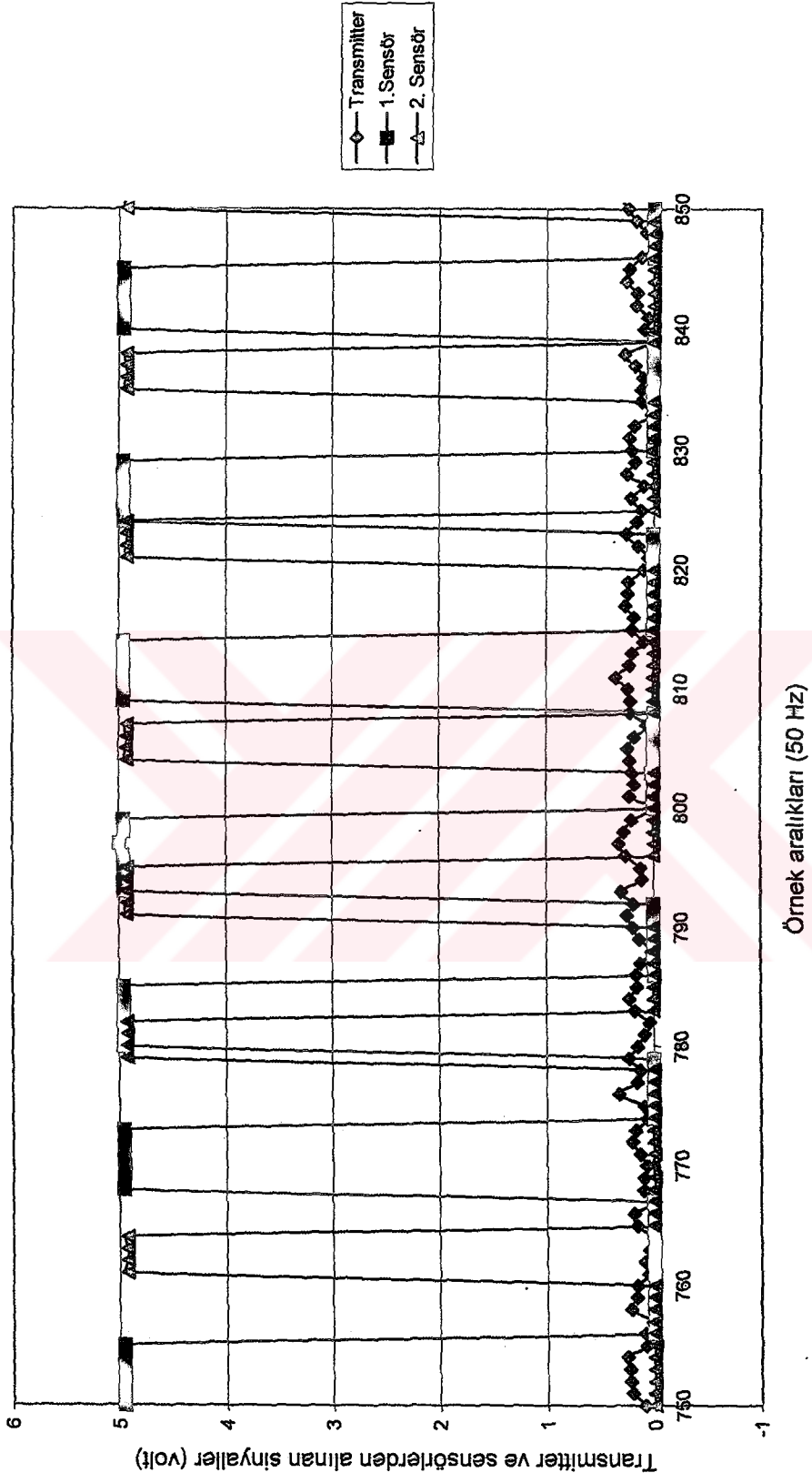
Deneysel No	Özellik	$C_{dn}$	Eşitlik (7.7)'de kullanılan sadeleştirme çarpanı	$N_{te}$ (adet/sn)			$w$ (d/d) (sürtücü)	$V_{tp}$ (m/s)	$V_{ort}$ (m/s) ( $V_{tp}+V_s$ )	$t$ (s) (kronometre ile belirlenen kapsül luza)	$V_{tp(g)}$ (m/s)	$\Delta H_t$ (volt) (Transmitterde okunan basınç farkı)	$\Delta H_t$ (mmSS)	$\Delta H_m$ (mmSS) (Manometrede okunan yük kaybı)
				Teorik N	Elevatör Sensör	Boru Sensör								
1	Akış Yok	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.104508	1.13	1-2
2	Sadece su	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.115603	3.9	3-4
3	%5 Kapsül	0.05	196.386	0.446	0.5	0.5	88	0.0152	0.3042	3.31	0.3021	0.129421	7.35	6-7
4	%10 Kapsül	0.10	414.59	0.94	0.9	0.9	158	0.0321	0.3211	3.14	0.3185	0.130222	7.55	7-8
5	%15 Kapsül	0.15	658.47	1.49	1.5	1.5	245	0.051	0.34	3.02	0.3311	0.136393	9.09	10
6	%20 Kapsül	0.20	932.83	2.12	2.1	2.1	344	0.0724	0.3614	2.75	0.3636	0.145274	11.32	12
7	%25 Kapsül	0.25	1243.78	2.82	2.8	2.8	461	0.0963	0.3853	2.65	0.3774	0.153981	13.49	14-15

Sonuçları örnek olarak verilen deneyde ölçümler süresince sabit kalan değerler:

1. Sayaçta  $0.1m^3$  suyun geçmesi için geçen süre  $t=43.99$  sn (2. ve 3. Sayaçlar kapalıdır.)
2. Boru iç çapı  $0.1m$ , kapsül çapı  $0.08m$  dir.
3.  $Q_s=0.002273 m^3/s$  ve  $V_s=0.289 m/s$  dir.



Şekil 6-5 Transmitter ve sensörlerden bilgisayara aktarılan sinyallerin değerlendirilmesi ile bulunan grafik (1)



Şekil 6-6 Transmitter ve sensörlerden bilgisayara aktarılan sinyallerin değerlendirilmesi ile bulunan grafik (2)

### 6.3.1 Ölçüm Bölgesinden Saniyede Geçen Kapsül Adedi

Ölçümler sırasında otomasyon programı kullanılarak alınan sinyal değerlerinin bir değerlendirilmesi yapılmış, 1050 örnek arasındaki sensör sinyal piklerinin sayısı belirlenerek  $\Delta t$  değerlerinin ortalaması hesaplanmıştır. Buna göre bir kapsülün iki sensör arasındaki mesafeyi (0.1m) geçme sürelerinin ortalaması:

$$\Delta t_{1(ort)} = 0.243485 \text{ s}$$

Kapsüllerin sensörlerden herhangi birisini ardarda geçme sürelerinin ortalaması ise,

$$\Delta t_{2(ort)} = 0.35421875 \text{ s bulunmuştur.}$$

Bu durumda saniyede geçen kapsül adedi:

$$N_{din} = \frac{1}{\Delta t_{2(ort)}} = \frac{1}{0.35422} = 2.823 \text{ (adet/s) dir.}$$

Deneylerden önce, elevatör motoru sürücüsünün hızını ayarlamak için oluşturulan teorik yaklaşıma göre  $N_{din}$  değeri 2.82 adet/s bulunmuştur (Çizelge 6.2 Deney No:7).

Deneysel sabitler olarak, ölçüm hattındaki borunun iç çapı 0.1m ve kapsül çapı 0.08m alındığında, kapsül debisi ve su akışından bağımsız olan kapsül hızı (yüzeysel kapsül hızı) ise aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$Q_{kp} = \frac{\pi d^3}{6} N_{din} = 0.000268 \times 2.823 = 0.0007566 \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$V_{kp} = \frac{Q_{kp}}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{0.0007566}{0.00785} = 0.0964 \text{ (m/s)}$$

Diğer deneysel sabitler olan su debisi ve su hızı bilinmektedir, sonuç olarak ortalama hız:

$$V_{ort} = \frac{4(Q_{kp} + Q_s)}{\pi D^2} = \frac{4(0.0007566 + 0.002273)}{0.00785} = 0.3857 \text{ (m/s) olarak tespit edilir.}$$

Görüldüğü gibi, teorik yaklaşım ile bulunan sonuçlar ile tamamıyla bilgisayar ortamında değerlendirilerek bulunan sonuçlar birbiri ile uyum içindedir.

### 6.3.2 Gerçek Kapsül Hızı ve Kapsül Debisi

Ölçüm bölgesi üzerine yerleştirilmiş sensörlerin arasındaki mesafe 0.1m'dir. Bir kapsülün bu mesafeyi ne kadar sürede geçtiği ise bilinmektedir. Bu durumda kapsül-su karışım akışında kapsüllerin kazanmış olduğu hız:

$$V_{kp(G)} = \frac{0.1}{\Delta t_{1(ort)}} = \frac{0.1}{0.2435} = 0.411 \text{ (m/s) dir.}$$

Deneyler sırasında ölçeklendirilmiş hat üzerinde yapılan (gözleme dayalı) ölçümlerde, bir kapsülün 1m uzunluğundaki bölgeyi geçme süresi kronometre ile tespit edilerek (2.65 s) kapsül hızı yaklaşık 0.38m/s olarak bulunmuştur (Çizelge 6.2 Deney No:7).

Kapsül ve su hızlarının birbirinden farklı olması fazların birbirini sürüklemesine neden olacaktır. Bu durumda hız oranı (kayma oranı):

$$R_v = \frac{V_{kp}}{V_{ort}} = \frac{0.411}{0.3857} = 1.065$$

olarak bulunur.

### 6.3.3 Kapsüller Arası Mesafe ve Statik Konsantrasyon Kapsül Adedi

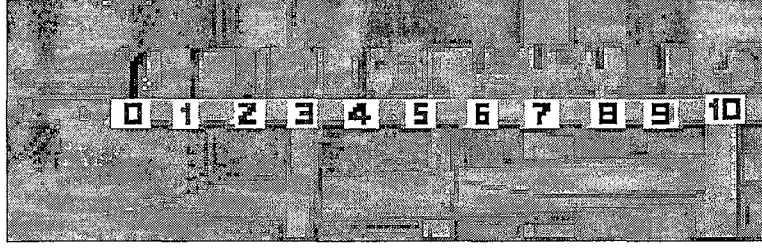
Yukarıdaki bilgiler ışığında, kapsüller arasındaki mesafe:

$$l_{kp} = V_{kp(G)} \times \Delta t_{2(ort)} = 0.411 \times 0.35422 = 0.1456 \text{ m}$$

olarak belirlenir. Statik konsantrasyonu oluşturacak kapsül adedi ise 1m uzunluğundaki bölge için yazılırsa:

$$N_{st} = \frac{L}{l_{kp}} = \frac{1}{0.1456} = 6.87 \text{ adettir.}$$

Ölçeklendirilmiş bölgede yapılan fotoğraf çekimlerinden bu ölçüme ait olanı Şekil 6.7'de verilmiştir. Görülmektedir ki, hesaplar ile bulunan statik kapsül sayısı ile fotoğrafı alınan ölçekli bölgedeki kapsül sayısı yaklaşık 7 adettir.



Şekil 6-7 Kapsül su karışım akışına ait bir fotoğraf ( $N_{st} \approx 7$  adet)

### 6.3.4 Statik ve Dinamik Kapsül Konsantrasyonları

Dinamik konsantrasyon, kapsül su karışım akışında, akış halindeki katı madde hacminin toplam hacme oranı şeklinde ifade edilirse,

$$C_{din} = \frac{Q_{kp}}{Q_{kp} + Q_s} = 0.2497 \Rightarrow \%24.97 \text{ dir.}$$

Statik konsantrasyon ise belli bir bölge içinde oluşan anlık durgunluk halindeki katı hacminin toplam hacme oranı şeklinde ifade edilirse aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$C_{st} = \frac{\frac{\pi d^3}{6} N_{st}}{\frac{\pi D^2}{4} L} = \frac{0.000268 \times 6.87}{0.00785} = 0.2345 \Rightarrow \%23.45$$

### 6.3.5 Su ve Karışım Akışına Ait Basınç Düşüşleri

Su hızı sıfır iken yani ölçüm hattına bağlı transmitter kollarında bir basınç farkı oluşmuyor iken sıfır ölçümleri yapılmıştır. Bu değer kalibrasyondaki sıfır (kollardaki su seviyeleri eşit) değeri ile karşılaştırılarak doğruluğu test edilmiştir. Daha sonra fark basınç transmitterinden bilgisayara aktarılan analog sinyaller basınç değerine çevrilmiştir. Hesaplamalarda, bilgisayara kaydedilen 1050 adet basınç düşüşü değerinin ortalaması kullanılmıştır.

Sadece su akışına ait basınç düşüşü:

$$\Delta P_s = 38.266 \text{ Pa}$$

Kapsül su karışım akışına ait basınç düşüşü ise:

$$\Delta P_{kr} = 132.388 \text{ Pa olarak hesaplanmıştır.}$$



Manometre ile yapılan ölçüm sonuçlarının yukarıdaki değerlerle uyumlu olduğu görülmüştür.

Karışımın (kapsül+su) oluşturduğu basınç düşüşü ile tek faz su akışında oluşan basınç düşüşü arasındaki oran ise (basınç oranı):

$$R_p = \frac{\Delta P_{kr}}{\Delta P_s} = \frac{132.388}{38.266} = 3.4596 \quad \text{olarak bulunur.}$$

#### 6.4 Sonuçlar

Yukarıda özetlemiş, özellikleri belirli akış şartına göre yapılmış hesaplar değişik debiler ve değişik konsantrasyonlar için uygulanmış olup, sistemin matematiksel modeline ait kurulumda bu sonuçlardan yararlanılmıştır.

Ölçümlerin ve her ölçümde alınan örnek sayılarının fazlalığından dolayı, sinyal piklerinin sayısını ve  $\Delta t$  değerlerinin ortalamasını bulmaya yönelik bir bilgisayar programı kullanılmıştır (bknz. Ek 1).

Sensör sinyallerinin değerlendirilmesinden sonra, elde edilen  $\Delta t_1$  ve  $\Delta t_2$  ortalama değerleri ile kapsüller arası mesafeler, kapsül gerçek hızları, akış sırasında ulaşılan gerçek konsantrasyonlar hesaplanmıştır. Teorik olarak bulunan değerler ile deneysel bulgular arasında karşılaştırmalar yapıp, % hata oranları belirlenmiştir.

Teorik değerler hesaplanırken  $R_v=1$  kabulü yapılmıştır, çizelgeler incelendiğinde gerçek kapsül-su akışındaki  $R_v$  değerinin birden büyük olduğu görülmektedir (ortalama  $R_v=1.05$ ). Gerçek kapsül konsantrasyonu değerlerinin teorik olarak hesaplanan değerlerden farklı çıkmasının nedeni  $R_v>1$  olmasıdır.

Değişik konsantrasyonlar ve akış hızlarında, sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunan deneysel sonuçlar aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir. Kapsüllü akışta oluşacak, sisteme özgü basınç düşüşü ifadesinin kurulumunda bu sonuçlardan yararlanılmıştır.

Çizelge 6-3a Değişik hızlar ve %5 kapsül konsantrasyonunda, sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunan sonuçlar

Deney No	$Q_s$ (m <sup>3</sup> /s)	$V_s$ (m/s)	$N_{te}$ (adet/s)	$C_{din(te)}$	$\Delta t_{1(ort)}$ (s)	$\Delta t_{2(ort)}$ (s)	$N_{din}$ (adet/s)	$V_{kp}$ (m/s)	$Q_{kp}$ (m <sup>3</sup> /s)	$V_{ort}$ (m/s)
1	0,0020410	0,260	0,401	0,05	0,4007	2,7221	0,367	0,013	0,0000985	0,2724
2	0,0025905	0,330	0,509	0,05	0,2823	2,0155	0,496	0,017	0,0001330	0,3468
3	0,0029438	0,375	0,578	0,05	0,2345	1,7420	0,574	0,020	0,0001538	0,3944
4	0,0038701	0,493	0,760	0,05	0,1847	1,4104	0,709	0,024	0,0001900	0,5169
5	0,0045295	0,577	0,890	0,05	0,1500	1,0532	0,950	0,032	0,0002545	0,6091
6	0,0051732	0,659	1,016	0,05	0,1333	1,0668	0,937	0,032	0,0002512	0,6907
7	0,0055397	0,706	1,088	0,05	0,1248	0,9132	1,095	0,037	0,0002935	0,7427
8	0,0065862	0,839	1,293	0,05	0,1015	0,7977	1,254	0,043	0,0003360	0,8814
9	0,0073005	0,930	1,434	0,05	0,0931	0,8038	1,244	0,042	0,0003334	0,9720
10	0,0074968	0,955	1,472	0,05	0,0928	0,6697	1,493	0,051	0,0004002	1,0055
11	0,0077715	0,990	1,526	0,05	0,0903	0,6694	1,494	0,051	0,0004004	1,0405
12	0,0083995	1,070	1,650	0,05	0,0807	0,6352	1,574	0,054	0,0004219	1,1232
13	0,0086350	1,100	1,696	0,05	0,0758	0,6464	1,547	0,053	0,0004146	1,1522
14	0,0090197	1,149	1,771	0,05	0,0749	0,5842	1,712	0,058	0,0004588	1,2068
15	0,0092081	1,173	1,808	0,05	0,0718	0,5633	1,775	0,061	0,0004757	1,2330
16	0,0094200	1,200	1,850	0,05	0,0714	0,5658	1,767	0,060	0,0004737	1,2597
17	0,0117750	1,500	2,312	0,05	0,0539	0,4533	2,206	0,075	0,0005913	1,5745

Çizelge 6-3b Değişik hızlar ve %5 kapsül konsantrasyonunda, sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunan sonuçlar

Deney No	$V_{kp(G)}$ (m/s)	$l_{kp}$ (m)	$N_{st}$ (adet/s)	$C_{din}$	$C_{st}$	$\Delta H_{kp}$ (mmSS)	$i_{kp}$ (Pa/m)	$R_v$	%Hata $N_{din}$	%Hata $C_{din}$
1	0,250	0,679	1,472	0,046	0,050	3,8658	9,481	0,916	9,11	8,65
2	0,354	0,714	1,401	0,049	0,048	6,8	16,677	1,022	2,54	2,41
3	0,426	0,743	1,346	0,050	0,046	8,1249	19,926	1,081	0,71	0,67
4	0,542	0,764	1,309	0,047	0,045	12,5675	30,822	1,048	7,19	6,83
5	0,667	0,702	1,424	0,053	0,049	16,5081	40,486	1,094	6,32	6,00
6	0,750	0,801	1,249	0,046	0,043	22,1837	54,406	1,087	8,38	7,97
7	0,801	0,732	1,366	0,050	0,047	23,9369	58,705	1,079	0,65	0,62
8	0,985	0,786	1,272	0,049	0,043	33,7932	82,878	1,118	3,18	3,02
9	1,074	0,864	1,158	0,044	0,040	38,6974	94,905	1,105	15,24	14,48
10	1,077	0,722	1,386	0,051	0,047	41,31	101,313	1,072	1,41	1,34
11	1,107	0,741	1,350	0,049	0,046	46,5065	114,057	1,064	2,16	2,05
12	1,239	0,787	1,271	0,048	0,043	57,58	141,215	1,103	4,77	4,53
13	1,320	0,853	1,172	0,046	0,040	59,4521	145,806	1,146	9,62	9,14
14	1,336	0,780	1,281	0,048	0,044	62,84	154,115	1,107	3,48	3,30
15	1,394	0,785	1,274	0,049	0,043	70,8791	173,831	1,130	1,87	1,78
16	1,400	0,792	1,263	0,048	0,043	73,6536	180,635	1,111	4,67	4,44
17	1,854	0,840	1,190	0,048	0,041	99,8387	244,854	1,178	4,81	4,57
<b>Ortalama</b>						<b>Ortalama</b>				
<b>Değerler</b>		0,770	1,299	0,048	0,044	<b>Değerler</b>		1,086	5,07	4,81

$$\% \text{Hata } N_{din} = \frac{|N_{din} - N_{te}|}{N_{din}} \times 100$$

$$\% \text{Hata } C_{din} = \frac{|C_{din} - C_{din(te)}|}{C_{din}} \times 100$$

Çizelge 6-4a Değişik hızlar ve %10 kapsül konsantrasyonunda, sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunan sonuçlar

Deney No	$Q_s$	$V_s$	$N_{te}$	$C_{din(te)}$	$\Delta t_{1(ort)}$	$\Delta t_{2(ort)}$	$N_{din}$	$V_{kp}$	$Q_{kp}$	$V_{ort}$
1	0,0011116	0,1416	0,461	0,10	0,6400	2,0544	0,487	0,017	0,000130449	0,1581
2	0,0015543	0,1980	0,644	0,10	0,4464	1,8800	0,532	0,018	0,000142553	0,2161
3	0,0020410	0,2600	0,846	0,10	0,3527	1,4089	0,710	0,024	0,000190215	0,2841
4	0,0025905	0,3300	1,074	0,10	0,2574	0,8950	1,117	0,038	0,000299441	0,3680
5	0,0029438	0,3750	1,220	0,10	0,2242	0,8296	1,205	0,041	0,000323047	0,4159
6	0,0038701	0,4930	1,604	0,10	0,1691	0,6171	1,620	0,055	0,000434292	0,5480
7	0,0045295	0,5770	1,878	0,10	0,1442	0,5532	1,808	0,062	0,000484491	0,6384
8	0,0051732	0,6590	2,145	0,10	0,1251	0,4912	2,036	0,070	0,000545644	0,7281
9	0,0055397	0,7057	2,297	0,10	0,1198	0,4639	2,156	0,074	0,000577756	0,7789
10	0,0065862	0,8390	2,731	0,10	0,0974	0,3857	2,593	0,089	0,000694792	0,9270
11	0,0077715	0,9900	3,222	0,10	0,0850	0,3165	3,160	0,108	0,000846828	1,0973

Çizelge 6-4b Değişik hızlar ve %10 kapsül konsantrasyonunda, sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunan sonuçlar

Deney No	$V_{kp(G)}$	$I_{kp}$	$N_{st}$	$C_{din}$	$C_{st}$	$\Delta H$	$I_{kp}$	$R_v$	%Hata $N_{din}$	%Hata $C_{din}$
1	0,156	0,321	3,115	0,105	0,106	3,3	8,093	0,988	5,32	4,79
2	0,224	0,421	2,374	0,084	0,081	3,5833	8,788	1,037	21,15	19,03
3	0,284	0,400	2,503	0,085	0,085	5,3749	13,182	0,998	19,22	17,30
4	0,389	0,348	2,876	0,104	0,098	8,3	20,356	1,056	3,88	3,49
5	0,446	0,370	2,703	0,099	0,092	11,0753	27,162	1,072	1,25	1,12
6	0,591	0,365	2,740	0,101	0,094	15,8565	38,888	1,079	0,99	0,89
7	0,693	0,384	2,607	0,097	0,089	20,8414	51,114	1,086	3,88	3,49
8	0,799	0,393	2,547	0,095	0,087	27,3819	67,154	1,098	5,34	4,81
9	0,835	0,387	2,582	0,094	0,088	29,4172	72,146	1,072	6,54	5,88
10	1,027	0,396	2,524	0,095	0,086	39,8486	97,729	1,108	5,32	4,79
11	1,176	0,372	2,686	0,098	0,092	55,5682	136,281	1,072	1,97	1,77
Ortalama Değerler		0,378	2,647	0,096	0,090		Ortalama Değerler	1,061	6,81	6,12

Çizelge 6-5a Değişik hızlar ve %15 kapsül konsantrasyonunda, sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunan sonuçlar

Deney No	$Q_s$	$V_s$	$N_{te}$	$C_{din(te)}$	$\Delta t_{1(ort)}$	$\Delta t_{2(ort)}$	$N_{din}$	$V_{kp}$	$Q_{kp}$	$V_{ort}$
1	0,0011116	0,1416	0,732	15%	0,603846	1,517308	0,659	0,023	0,0001766	0,1640
2	0,0015543	0,1980	1,023	15%	0,414211	1,081667	0,924	0,032	0,0002478	0,2294
3	0,0020410	0,2600	1,344	15%	0,341538	0,804423	1,243	0,042	0,0003332	0,3023
4	0,0025905	0,3300	1,706	15%	0,247273	0,623437	1,604	0,055	0,0004299	0,3846
5	0,0029438	0,3750	1,938	15%	0,21973	0,571667	1,749	0,060	0,0004688	0,4345
6	0,0038701	0,4930	2,548	15%	0,167353	0,414216	2,414	0,082	0,0006470	0,5751
7	0,0045295	0,5770	2,983	15%	0,137685	0,392642	2,547	0,087	0,0006826	0,6636
8	0,0051732	0,6590	3,406	15%	0,122239	0,322652	3,099	0,106	0,0008306	0,7644

Çizelge 6-5b Değişik hızlar ve %15 kapsül konsantrasyonunda, sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunan sonuçlar

Deney No	$V_{kp(G)}$	$I_{kp}$	$N_{st}$	$C_{din}$	$C_{st}$	$\Delta H$	$I_{kp}$	$R_v$	%Hata $N_{din}$	%Hata $C_{din}$
1	0,166	0,251	3,980	0,137	0,136	3,8	9,320	1,010	11,06	9,40
2	0,241	0,261	3,829	0,137	0,131	4,6112	11,309	1,052	10,70	9,10
3	0,293	0,236	4,246	0,140	0,145	6,59	16,162	0,969	8,11	6,89
4	0,404	0,252	3,966	0,142	0,135	9,6	23,544	1,052	6,34	5,39
5	0,455	0,260	3,844	0,137	0,131	13,0289	31,953	1,047	10,81	9,19
6	0,598	0,248	4,040	0,143	0,138	17,9813	44,099	1,039	5,56	4,72
7	0,726	0,285	3,507	0,131	0,120	23,38	57,339	1,094	17,11	14,54
8	0,818	0,264	3,789	0,138	0,129	32,3345	79,300	1,070	9,91	8,42
<b>Ortalama</b>							<b>Ortalama</b>			
<b>Değerler</b>		0,257	3,889	0,138	0,133		<b>Değerler</b>	1,042	9,95	8,46

Çizelge 6-6a Değişik hızlar ve %20 kapsül konsantrasyonunda, sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunan sonuçlar

Deney No	$Q_s$	$V_s$	$N_{te}$	$C_{din(te)}$	$\Delta t_{1(ort)}$	$\Delta t_{2(ort)}$	$N_{din}$	$V_{kp}$	$Q_{kp}$	$V_{ort}$
1	0,0009522	0,1213	0,888	20%	0,655294	1,146471	0,872	0,030	0,0002338	0,1510
2	0,0011116	0,1416	1,037	20%	0,56	0,9995	1,001	0,034	0,0002681	0,1757
3	0,0015543	0,1980	1,450	20%	0,398148	0,771111	1,297	0,044	0,0003476	0,2422
4	0,0020410	0,2600	1,904	20%	0,301	0,51625	1,937	0,066	0,0005191	0,3260
5	0,0025905	0,3300	2,416	20%	0,23	0,44087	2,268	0,077	0,0006079	0,4072
6	0,0029438	0,3750	2,746	20%	0,192273	0,38537	2,595	0,089	0,0006954	0,4634
7	0,0038701	0,4930	3,610	20%	0,152192	0,29	3,448	0,118	0,0009241	0,6104

Çizelge 6-6b Değişik hızlar ve %20 kapsül konsantrasyonunda, sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunan sonuçlar

Deney No	$V_{kp(G)}$	$I_{kp}$	$N_{st}$	$C_{din}$	$C_{st}$	$\Delta H$	$i_{kp}$	$R_v$	%Hata $N_{din}$	%Hata $C_{din}$
1	0,153	0,175	5,716	0,197	0,195	4,8175	11,815	1,011	1,83	1,47
2	0,179	0,178	5,603	0,194	0,191	4,9	12,017	1,017	3,64	2,91
3	0,251	0,194	5,163	0,183	0,176	5,7162	14,019	1,037	11,80	9,44
4	0,332	0,172	5,831	0,203	0,199	8,42	20,650	1,019	1,71	1,37
5	0,435	0,192	5,217	0,190	0,178	12,3756	30,351	1,068	6,54	5,23
6	0,520	0,200	4,989	0,191	0,170	16,6278	40,780	1,122	5,82	4,66
7	0,657	0,191	5,248	0,193	0,179	24,5726	60,264	1,076	4,69	3,75
Ortalama						Ortalama				
Değerler		0,186	5,379	0,193	0,184	Değerler		1,050	5,15	4,12

Çizelge 6-7a Değişik hızlar ve %25 kapsül konsantrasyonunda, sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunan sonuçlar

Deney No	$Q_s$	$V_s$	$N_{te}$	$C_{din(te)}$	$\Delta t_{1(ort)}$	$\Delta t_{2(ort)}$	$N_{din}$	$V_{kp}$	$Q_{kp}$	$V_{ort}$
1	0,0009522	0,1213	1,184	25%	0,6342	0,8028	1,246	0,043	0,0003338	0,1637
2	0,0011116	0,1416	1,383	25%	0,531481	0,761923	1,312	0,045	0,0003517	0,1863
3	0,0015543	0,1980	1,933	25%	0,380541	0,566757	1,764	0,060	0,0004729	0,2581
4	0,0020410	0,2600	2,539	25%	0,292745	0,4092	2,444	0,083	0,0006549	0,3433
5	0,0025905	0,3300	3,222	25%	0,217045	0,313939	3,185	0,109	0,0008537	0,4385
6	0,0029438	0,3750	3,661	25%	0,189662	0,286712	3,488	0,119	0,0009347	0,4938

Çizelge 6-7b Değişik hızlar ve %25 kapsül konsantrasyonunda, sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunan sonuçlar

Deney No	$V_{kp(G)}$	$I_{kp}$	$N_{st}$	$C_{din}$	$C_{st}$	$\Delta H$	$i_{kp}$	$R_v$	%Hata $N_{din}$	%Hata $C_{din}$
1	0,158	0,127	7,900	0,260	0,270	5,608	13,754	0,963	4,92	3,69
2	0,188	0,143	6,976	0,240	0,238	5,9	14,470	1,010	5,34	4,00
3	0,263	0,149	6,714	0,233	0,229	7,4667	18,312	1,018	9,57	7,17
4	0,342	0,140	7,154	0,243	0,244	10,1	24,770	0,995	3,88	2,91
5	0,461	0,145	6,914	0,248	0,236	15,2236	37,336	1,051	1,15	0,86
6	0,527	0,151	6,615	0,241	0,226	19,2365	47,178	1,068	4,98	3,73
Ortalama Değerler		0,142	7,022	0,244	0,240	Ortalama Değerler		1,017	4,97	3,73



Çizelge 6-8a Değişik hızlar ve %30 kapsül konsantrasyonunda, sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunan sonuçlar

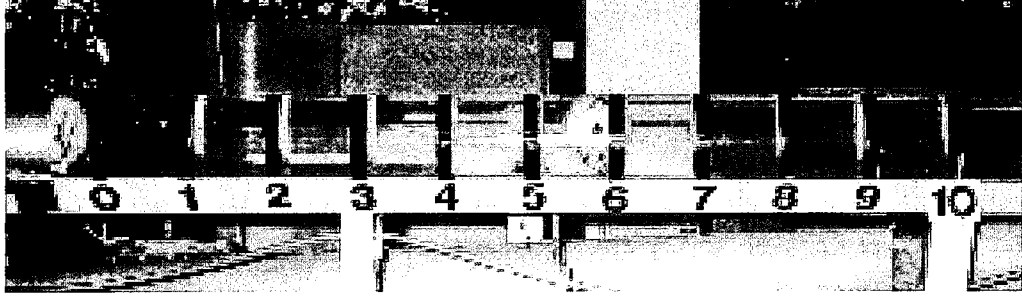
Deney No	$Q_s$	$V_s$	$N_{te}$	$C_{din(te)}$	$\Delta t_{1(ort)}$	$\Delta t_{2(ort)}$	$N_{din}$	$V_{kp}$	$Q_{kp}$	$V_{ort}$
1	0,0011116	0,1416	1,778	30%	0,490429	0,593286	1,686	0,058	0,0004517	0,1990
2	0,0015543	0,1980	2,486	30%	0,354712	0,402404	2,485	0,085	0,0006660	0,2827
3	0,0019782	0,2520	3,163	30%	0,26553	0,314773	3,177	0,108	0,0008514	0,3603
4	0,0020724	0,2640	3,314	30%	0,253692	0,32	3,125	0,107	0,0008375	0,3705

Çizelge 6-8b Değişik hızlar ve %30 kapsül konsantrasyonunda, sensör sinyallerinin değerlendirilmesi ile bulunan sonuçlar

Deney No	$V_{kp(G)}$	$I_{kp}$	$N_{st}$	$C_{din(G)}$	$C_{st}$	$\Delta H$	$I_{kp}$	$R_v$	%Hata $N_{din}$	%Hata $C_{din}$
1	0,204	0,121	8,266	0,289	0,282	6,98	17,118	1,024	5,46	3,82
2	0,282	0,113	8,815	0,300	0,301	9,1375	22,410	0,997	0,02	0,01
3	0,377	0,119	8,436	0,301	0,288	11,49	28,179	1,045	0,42	0,30
4	0,394	0,126	7,928	0,288	0,271	12,5112	30,684	1,064	6,05	4,24
Ortalama Değerler		0,120	8,349	0,294	0,285	Ortalama Değerler		1,033	2,99	2,09

### 6.5 Gözlem Bölgesindeki Kapsül Sayısının Hesaplanan $N_{st}$ Değeri İle Uymu

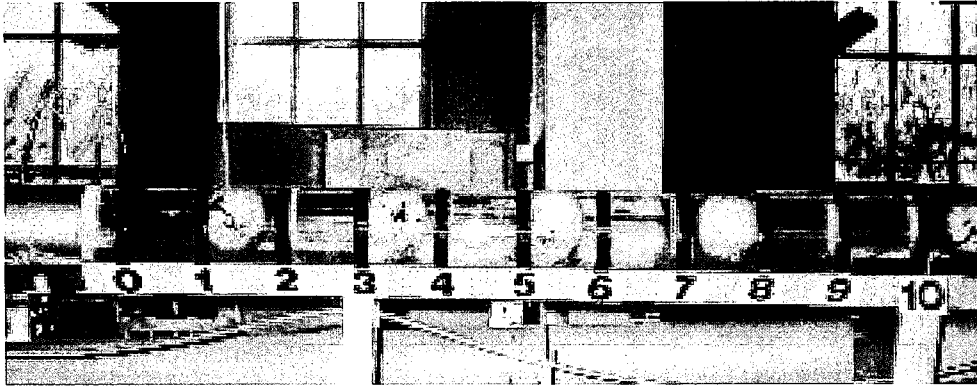
Deneysel bulgulara göre belirlenen  $N_{st}$  değeri ile kapsüllü akışta çekilen fotoğraflardaki kapsül sayılarının karşılaştırılması için aşağıdaki örnekler verilmiştir.



Şekil 6-8  $V_s=0.659\text{m/s}$  ve  $C_{din}=\%5$  iken  $N_{st}=1.299$  adet kapsül (bknz. Çizelge 6-3b)



Şekil 6-9  $V_s=0.659\text{m/s}$  ve  $C_{din}=\%10$  iken  $N_{st}=2.647$  adet kapsül (bknz. Çizelge 6-4b)



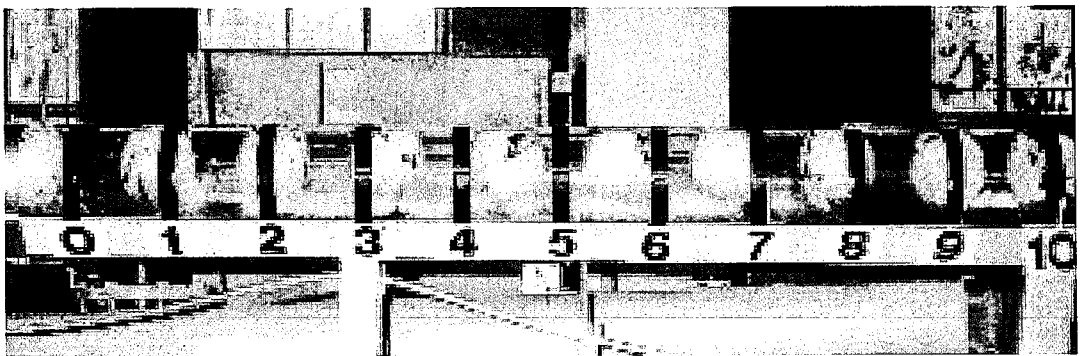
Şekil 6-10  $V_s=0.264\text{m/s}$  ve  $C_{din}=\%15$  iken  $N_{st}=3.889$  adet kapsül (bknz. Çizelge 6-5b)



Şekil 6-11  $V_s=0.264\text{m/s}$  ve  $C_{din}=\%20$  iken  $N_{st}=5.379$  adet kapsül (bknz. Çizelge 6-6b)



Şekil 6-12  $V_s=0.264\text{m/s}$  ve  $C_{din}=\%25$  iken  $N_{st}=7.022$  adet kapsül (bknz. Çizelge 6-7b)



Şekil 6-13  $V_s=0.264\text{m/s}$  ve  $C_{din}=\%30$  iken  $N_{st}=8.349$  adet kapsül (bknz. Çizelge 6-8b)

## 6.6 Boyut Analizi

Boyut analizinde Buckingham'ın  $\pi$  yöntemi kullanılmıştır.

Sisteme ait bağımsız değişken parametreleri; kapsül gerçek hızı ( $V_{kp(G)}$ ), kapsül çapı ( $d$ ), kapsül yoğunluğu ( $\rho_{kp}$ ), kapsül şekil faktörü ( $B$ ), kapsüller arası mesafe ( $l_{kp}$ ), kapsül yüzey pürüzlülüğü ( $e_{kp}$ ), boru yüzey pürüzlülüğü ( $e_b$ ), boru çapı ( $D$ ), boru eğimi ( $\theta$ ), boru ve kapsül malzemesinin sertlik faktörü ( $KS$ ), taşıyıcı sıvının (su) sürtünmeyi azaltıcı etkisini veren yağlama faktörü ( $c$ ), taşıyıcı sıvının yoğunluğu ( $\rho$ ), dinamik viskozitesi ( $\mu$ ), kapsül ve taşıyıcı sıvının beraber akışındaki ortalama hızdır ( $V_{ort}$ ).

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{kr} = f(V_{kp(G)}, d, \rho_{kp}, B, l_{kp}, e_{kp}, e_b, D, \theta, KS, c, \rho, \mu, V_{ort}) \quad (6.17)$$

Sürtünme katsayısı, Re sayısı, yağlama faktörü, boru ve kapsül yüzey pürüzlülüğü ile malzemesinin bir fonksiyonudur. Taşıyıcı sıvı ile aynı yoğunluğa sahip kapsüllerde yağlama faktörü dikkate alınmamaktadır (Ellis, 1964a). Deneyleerde kullanılan kapsüllerin yoğunluğu suya çok yakın olduğu için yağlama faktörü dikkate alınmamıştır. Boru ve kapsül yüzeyleri

pürüzsüz kabul edilecek durumdadır  $\left(\frac{e_{kp}}{d} = 0, \frac{e_b}{D} = 0\right)$ . Kapsül ve boru malzemesi sert

olduğundan sertlik faktörü  $KS$  (ezilme direnci) her iki eleman için de yok sayılabilir.

Silindirik kapsül kullanılmış çalışmalarda değişken olarak alınan ( $l/d$ ) narinlik oranı, kapsüller küre olduğundan  $d/d=1$  olur. Boru yatay olduğu için eğim açısı hesaplamalara dahil edilmemiştir. Çalışmada kullanılan kapsüller küre şeklinde olduğundan şekil faktörü ( $B$ ) dikkate alınmamıştır.

Bu durumda, sisteme ait bağımsız değişken parametreleri Eşitlik 6.18'deki gibidir.

$$V_{kp(G)} \text{ ya da } \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{kr} \text{ için } = f(V_{ort}, D, d, \rho_{kp}, \rho, \mu, l_{kp}, g, e_{kp}, e_b) \quad (6.18)$$

Üç ana boyut cinsinden (M,L,T) ifade edilebilen ve 11 adet bağımsız değişkenden oluşan fiziksel olaydan sekiz boyutsuz sayı elde edilir. Buckingham'ın boyut analizi temel alınarak bulunan boyutsuz sayıları, literatür bilgileri dikkate alınarak, sistemin ana hidrodinamik karakteristikleri olan; kayma oranı ( $R_v = V_{kp(G)}/V_{ort}$ ) ya da boyutsuz basınç düşüşünün bir fonksiyonu olarak yazmak mümkündür.

$$\frac{V_{kp(G)}}{V_{ort}} = f\left(\frac{d}{D}, \frac{\rho_{kp}}{\rho}, \frac{V_{ort}\rho D}{\mu}, \frac{e_{kp}}{d}, \frac{e_b}{D}, \frac{V_{ort}^2}{gd}, \frac{d}{l_{kp}}\right) \quad (6.19)$$

$$\frac{V_{ort}^2 \rho}{D} \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{kr}^{-1} = f\left(\frac{d}{D}, \frac{\rho_{kp}}{\rho}, \frac{V_{ort}\rho D}{\mu}, \frac{e_{kp}}{d}, \frac{e_b}{D}, \frac{V_{ort}^2}{gd}, \frac{d}{l_{kp}}\right) \quad (6.20)$$

Boyut analizi sonucuna göre sisteme ait boyutsuz sayılar, boyutsuz basınç düşüştü ifadesi  $\left(\frac{V_{ort}^2 \rho}{D} \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{kr}^{-1}\right)$  ya da hız oranının  $\left(\frac{V_{kp(G)}}{V_{ort}}\right)$  fonksiyonu olarak yazılmıştır. Boyutsuz

sayılar, çap oranı  $\left(\frac{d}{D}\right)$ , bağıl yoğunluk  $\left(\frac{\rho_{kp}}{\rho}\right)$ , Re sayısı  $\left(\frac{V_{ort}^2 \rho D}{\mu}\right)$ , kapsül bağıl

pürüzlülüğü  $\left(\frac{e_{kp}}{d}\right)$ , boru bağıl pürüzlülüğü  $\left(\frac{e_b}{D}\right)$ , kapsül Froude sayısı  $\left(\frac{V_{ort}^2}{gd}\right)$  ve statik

konsantrasyonu veren ifadedir  $\left(\frac{d}{l_{kp}}\right)$ .

Eşit yoğunluklu, küresel kapsüller ile yapılmış çalışmalarda Froude sayısının etkisinin önemsiz olduğu rapor edilmiştir (Ellis ve Bolt, 1964). Sistemde kullanılan kürelerin yoğunluğu suya yakındır. Bu nedenle Froude sayısı hesaplamalarda ihmal edilmiştir.  $\frac{d}{l_{kp}}$

boyutsuz parametresi, statik konsantrasyonu ifade etmektedir. Statik konsantrasyonun:

$$C_{st} = \frac{2}{3} k^2 \frac{d}{l_{kp}} \quad (6.21)$$

olduğu bulunmuştur.

## 6.7 Karışım Yoğunluğu

$\Delta P$ 'deki artış hızın karesi ve yoğunlukla orantılı olarak değişmektedir. Yoğunluk olarak, L uzunluğundaki boruda, kapsül+su karışımının toplam ağırlığının toplam hacme bölünmesi ile bulunan karışım yoğunluğu kullanılmıştır. L uzunluğundaki boru içindeki kapsül adedi  $N_{st}$  olarak ifade edilirse, karışım yoğunluğu:

$$\rho_{kr} = \frac{\left( \frac{\pi D^2}{4} L - \frac{\pi d^3}{6} N_{st} \right) \rho + \frac{\pi d^3}{6} N_{st} \rho_{kp}}{\frac{\pi D^2}{4} L} \quad (6.22)$$

şeklinde yazılır.  $N_{st}=L/l_{kp}$  ve  $s=\rho_{kp}/\rho$  olduğundan, Eşitlik 6.22'de gerekli sadeleştirmeler yapılırsa, karışım yoğunluğu:

$$\rho_{kr} = \frac{\rho \frac{L}{l_{kp}} \left( \frac{\pi D^2}{4} l_{kp} - \frac{\pi d^3}{6} + \frac{\pi d^3}{6} \frac{\rho_{kp}}{\rho} \right)}{\frac{\pi D^2}{4} L} \quad (6.23)$$

$$\rho_{kr} = \rho \left[ 1 + \frac{2}{3} k^2 \frac{d}{l_{kp}} (s-1) \right] \quad (6.24)$$

Kapsüller birbirleri ile temasta kabul edildiğinde,  $l_{kp}=d$  olur. Bu durumda Eşitlik 6.24 aşağıdaki gibi yazılır.

$$\rho_{kr} = \rho \left[ 1 + \frac{2}{3} k^2 (s-1) \right] \quad (6.25)$$

Karışım yoğunluğu konsantrasyona bağlı olarak ifade edilirse:

$$C_{st} = \frac{\frac{\pi d^3}{6} N_{st}}{\frac{\pi D^2}{4} L} \quad (6.26)$$

$$C_{st} = \frac{2}{3} k^2 \frac{d}{l_{kp}} \quad (6.27)$$

$C_{st}$ , Eşitlik 6.24'de yerine yazıldığında,

$$\rho_{kr} = \rho [1 + C_{st} (s-1)] \quad (6.28)$$

olarak bulunur. Kapsül mesafeleri bilindiğinden,  $\rho_{kr}$  için Eşitlik 6.24 kullanılmıştır (Çizelge 6.9).

Çizelge 6-9 Eşitlik 6.24'e göre hesaplanmış karışım yoğunlukları

Konsantrasyon	$l_{kp}$ (m)	$\rho_{kr}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Konsantrasyon	$l_{kp}$ (m)	$\rho_{kr}$ (kg/m <sup>3</sup> )
0,05	0,77	994,24	0,20	0,186	976,14
0,10	0,378	988,26	0,25	0,142	968,75
0,15	0,257	982,73	0,30	0,12	963,02

### 6.8 Teorik Yaklaşım

Kapsül su karışım akışında meydana gelen birim boydaki toplam basınç düşüşü tek faz karışım akışının oluşturduğu basınç düşüşü (homojen akış) ile kürelerin dönme hareketi sonucunda oluşan basınç düşüşünün toplamı şeklinde ifade edilebilir.

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{kr} = \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{hom.} + \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{kp} \quad (6.29)$$

Tek faz karışım akışının oluşturduğu (homojen akış) birim boydaki basınç düşüşü bilinmektedir (Eşitlik 6.30).

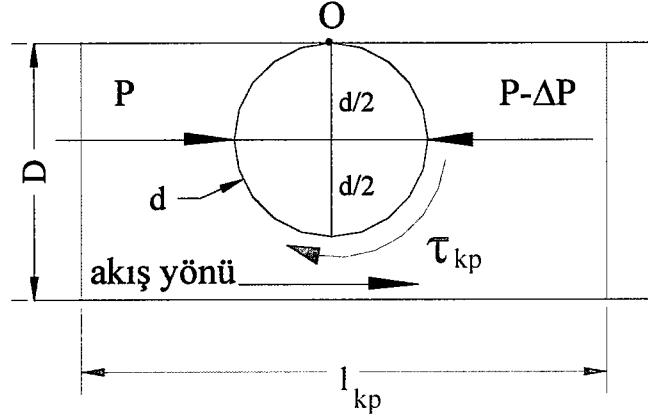
$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{hom.} = \lambda_b \frac{1}{D} \rho_{kr} \frac{V_{ort}^2}{2} \quad (6.30)$$

Kapsüllerin dönme hareketi nedeniyle oluşan basınç düşüşü ( $\Delta P_{kp}$ ) bir tek kapsülün dönme hareketini kapsayan akıştaki kuvvet dengeleri yazılarak bulunabilir (Şekil 6.14). Bu durumda bir tek kapsülün akışında oluşan birim boydaki basınç düşüşü  $\frac{\Delta P}{l_{kp}}$  olacaktır. Bir metredeki

kapsül adedi  $\frac{1}{l_{kp}}$  olduğundan, kapsüllü akış sırasında kapsül dönmesi nedeniyle oluşan 1 metredeki basınç düşüşü;

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{kp} = \frac{\Delta P}{(l_{kp})^2} \quad (6.31)$$

olarak bulunur.



Şekil 6-14 Teorik yaklaşıma göre kuvvet dağılımı

Kuvvetin küre merkezinden geçtiği ve temas noktası O'ya göre döndürme momenti oluşturduğu kabul edilmiştir. Bu moment uzunluğu çapına eşit  $d$  çapındaki silindir yüzeyinde ters yönde oluşan kesme gerilmesi ile dengelenecektir. Küre çevresindeki kayma gerilmesi sabit alınarak moment dengesi yazılırsa;

$$\Delta P \frac{\pi d^2}{4} \frac{d}{2} = \tau_{kp} 4\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \frac{d}{2} \quad (6.32)$$

$$\Delta P = 4\tau_{kp} \quad (6.33)$$

olarak bulunur. Boru ile küre arasındaki ortalama boşluğa  $\left(\frac{D-d}{2} = \text{sabit}\right)$  göre hesaplanan küre yüzeyindeki kesme gerilmesi:

$$\tau_{kp} = \frac{\mu V_{ort}}{\frac{(D-d)}{2}} \quad (6.34)$$

Eşitlik 6.33 ve 6.34, Eşitlik 6.31'de yerine yazılırsa:

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{kp} = \frac{4\tau_{kp}}{(l_{kp})^2} = \frac{4\mu V_{ort}}{(D-d) \frac{(l_{kp})^2}{2}} \quad (6.35)$$

bulunur. Payda kısmında yer alan ifadeler, statik konsantrasyon (Eşitlik 6.26) ve çap oranları cinsinden yazılıp, gerekli sadeleştirmeler yapıldığında Eşitlik 6.35 aşağıdaki hale gelir.



$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{kp} = \frac{9}{50} \mu V_{ort} \frac{D^4}{d^6} C_{st}^2 \quad (6.36)$$

Eşitlik 6.29'u aşağıdaki gibi yazmak mümkündür.

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{kr} = \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{hom.} \left[ 1 + \frac{\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{kp}}{\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{hom.}} \right] \quad (6.37)$$

Kapsüllü akışta oluşacak basınç düşüşü ifadesi (Eşitlik 6.36), Eşitlik 6.37'de yerine yazılacak olursa:

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{kr} = \lambda_b \frac{1}{D} \rho_{kr} \frac{V_{ort}^2}{2} \left[ 1 + \frac{\frac{9}{50} \mu V_{ort} \frac{D^4}{d^6} C_{st}^2}{\lambda_b \frac{1}{D} \rho_{kr} \frac{V_{ort}^2}{2}} \right] \quad (6.38)$$

$$\frac{\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{kp}}{\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{hom.}} = \frac{9}{25} \rho \nu V_{ort} \frac{D^4}{d^6} C_{st}^2 \frac{1}{\lambda_b} \frac{D}{1} \frac{1}{\rho_{kr}} \frac{2}{V_{ort}^2} \quad (6.39)$$

Eşitlik 6.38'de gerekli sadeleştirmeler yapıp, boyutsuz sayılar belirlenir. Eşitlik 6.24'e göre

$$\frac{\rho}{\rho_{kr}} = \frac{1}{1 + \frac{2}{3} \left(\frac{d}{D}\right)^2 \frac{d}{l_{kp}} (s-1)} \quad (6.40)$$

olduğundan; Eşitlik 6.38 (teorik yaklaşım ifadesi) yeniden düzenlenir.

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{kr} = \lambda_b \frac{1}{D} \rho_{kr} \frac{V_{ort}^2}{2} \left[ 1 + \frac{9}{25} \frac{1}{1 + \frac{2}{3} \left(\frac{d}{D}\right)^2 \frac{d}{l_{kp}} (s-1)} \frac{D^5 C_{st}^2 \lambda_{kp}}{d^5 \lambda_b} \right] \quad (6.41)$$

$$l_{kp} = \frac{2d^3}{3D^2} \frac{1}{C_{st}^2} \quad (6.42)$$

$l_{kp}$  ifadesi statik konsantrasyona bağlı olarak yazılıp, gerekli sadeleştirmeler yapıldığında olayı karakterize eden matematiksel ifade aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{kr} = \lambda_b \frac{1}{D} \rho_{kr} \left[ 1 + \frac{9}{25} \frac{C_{st}^2 \lambda_{kp}}{[1 + C_{st}(s-1)]k^5 \lambda_b} \right] \quad (6.43)$$

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{kr} = \lambda_b \frac{1}{D} \rho_{kr} \left[ 1 + Y \frac{C_{st}^2 \lambda_{kp}}{[1 + C_{st}(s-1)]k^5 \lambda_b} \right] \quad (6.44)$$

Hesaplarda  $\lambda_b = \lambda_{kp}$  olarak alınmıştır. Eşitliğin sağ tarafında kalan birinci terim tek faz karışım akışında oluşan basınç düşüşünü ikinci ve boyutsuzlaştırılmış olan terim kapsüllerin dönme hareketine bağlı olarak oluşan basınç düşüşünü vermektedir. Boyutsuz olan terimin önündeki katsayı (Y) deneysel bulgulara bağlı olarak değiştirilebilir. Teorik yaklaşımdaki kabuller dikkate alınarak yapılan hesaplarda, deneysel bulgulara göre, %5-20 kapsül konsantrasyonunda bu katsayı 6.4, %20-30 kapsül konsantrasyonunda 3.8 olarak bulunmuştur. Hesaplanan sonuçlar (Eşitlik 6.44'e göre), deneysel bulgular ile karşılaştırıldığında,  $2.5 \times 10^4 < Re < 1.5 \times 10^5$  için ortalama %8.6'lık bir sapma tespit edilmiştir.

## 6.9 Deneysel Bulgulara Bağlı İfade

Darcy-Weisbach denklemi deneysel bulgulara bağlı matematiksel model için kök oluşturmuştur. Re sayısı  $V_{ort}$  hıza bağlı olarak elde edilerek, sürtünme katsayısının bulunmasında kullanılmıştır. Su ile yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre, boru yüzeyi hidrolik olarak pürüzsüz kabul edilmiştir. Pürüzsüz boru için,  $V_{ort}$  hıza bağlı Re sayısı ile Moody diyagramı kullanılarak  $\lambda$  değerleri seçilmiştir.

$$Re = \frac{V_{ort} D}{\nu} \quad (6.45)$$

$$\lambda = f\left(Re, \frac{e_b}{D} = 0\right) \text{ (Moody)} \quad (6.46)$$

Konsantrasyon miktarı arttıkça dönme hareketi yapan kürelerin yüzey alanı artacağı için konsantrasyon ifadesinin  $(1+C)^n$  şeklinde basınç düşüşüne etkidiği kabul edilmiştir.

Kürelerin boru içindeki dönme hareketinde  $d/D$  oranı azaldıkça, kayma gerilmelerinin etkisi de azalmaktadır (basınç düşüşü azalmaktadır). Çap oranının basınç düşüşü üzerindeki etkisi  $(1+k)^p$  şeklinde gösterilmiştir.  $d/D$  ve konsantrasyondaki artışların basınç düşüşündeki artışla orantılı olduğu kabulü ile deneysel bulgular için Darcy-Weisbach ifadesi aşağıdaki gibi düzenlenmiştir.

$$(\Delta P)_{kr} = \lambda_b \frac{L}{D} \rho_{kr} \frac{V_{ort}^2}{2} (1 + C_{st})^n \left(1 + \frac{d}{D}\right)^p \quad (6.47)$$

Deneysel bulgulara dayalı, değişik konsantrasyonlar ve hızlar için 40 adet iki bilinmeyenli denklem çifti oluşturularak Eşitlik 6.47'deki n ve p değerleri hesaplanmıştır.

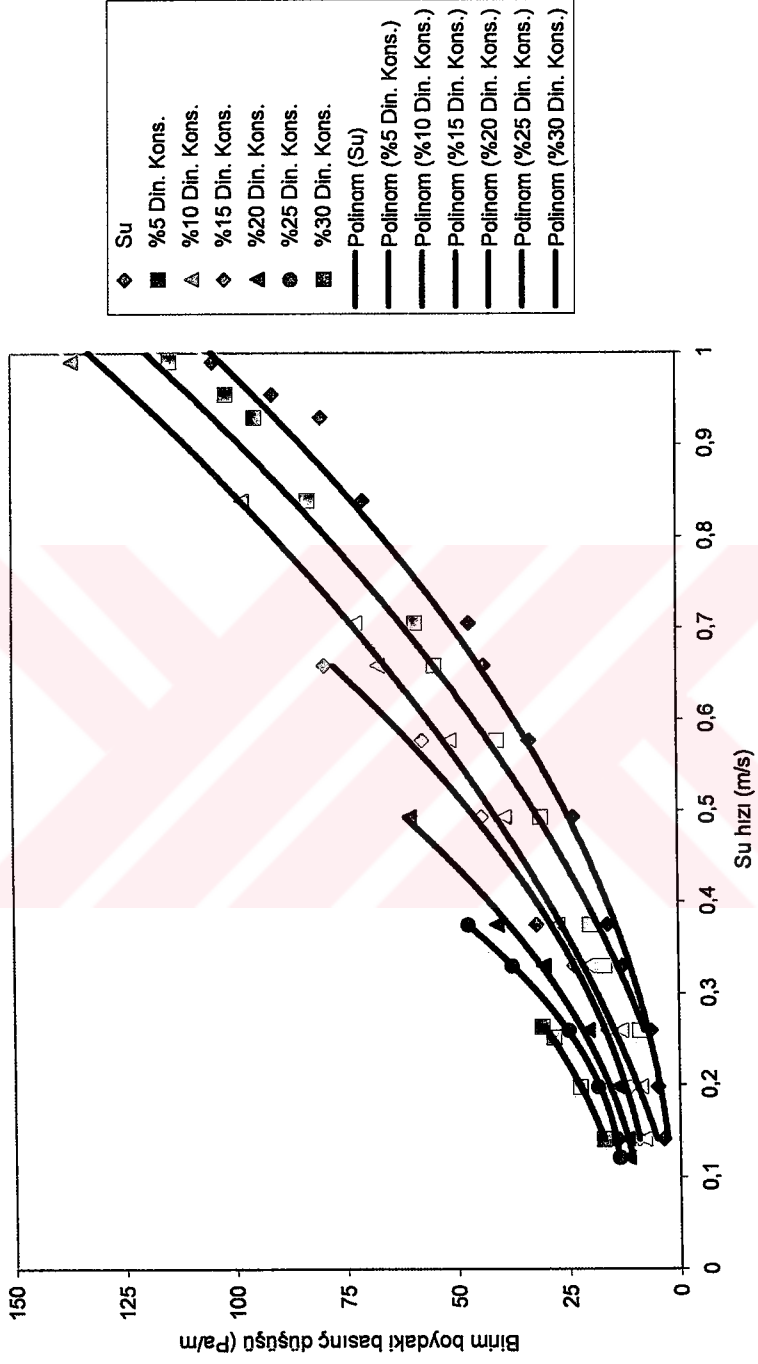
$$a_1 = b_1^n c_1^p \quad (6.48)$$

$$a_2 = b_2^n c_2^p \quad (6.49)$$

$2.5 \times 10^4 < Re < 1.5 \times 10^5$  şartlarında  $n=2.88$  ve  $p=-0.02$  olarak bulunmuştur (Re su hızına bağlı).

$$(\Delta P)_{kr} = \lambda_b \frac{L}{D} \rho_{kr} \frac{V_{ort}^2}{2} (1 + C_{st})^{2.88} \left(1 + \frac{d}{D}\right)^{-0.02} \quad (6.50)$$

$2.5 \times 10^4 < Re < 1.5 \times 10^5$  için, Eşitlik 6.50'ye (deneysel bulgu ifadesi) göre hesaplanan  $(\Delta P)_{kr}$  değerleri ile deneysel olarak bulunmuş  $(\Delta P)_{kr}$  değerlerinin ortalama %3.37'lik bir sapma ile uyumlu olduğu bulunmuştur.  $1.2 \times 10^4 < Re < 1.5 \times 10^5$  için ise,  $(\Delta P)_{kr}$  değerleri arasındaki sapma oranı %3.82'dir. Denklem çifti oluşturulurken dikkate alınan, deneysel bulgulara ait diyagram aşağıda verilmiştir.



Şekil 6-15 Deneysel bulgulara ait  $(\Delta P/L)_{kr} - V_s$  değişimi

## 7. İSTATİKSEL ANALİZ VE DENEY HATA ANALİZİ

### 7.1 İstatiksel Analiz

Laboratuvar ortamlarında, elektrik geriliminin değişmesi, topraklama kaynaklı problemler, deney sisteminde biriken statik elektrik, ölçüm cihazlarının ısınması veya ölçüm aletinde oluşabilecek ufak titreşimler belli bir fiziksel büyüklüğün ölçüm sonuçlarının değişik olmasına neden olabilir. Bu nedenle deneyi yapan kişi n adet ölçüm tekrarı yapmışsa, farklı ölçüm sonuçlarının ortalama değeri ile ilgilenecektir.

Aynı fiziksel büyüklük için yapılan n adet ölçümün her biri  $x_i$  ise, bu değerlerin aritmetik ortalaması;

$$x_m = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (7.1)$$

şeklindedir. Her bir ölçüm değerinin, ortalama değerden farkı ise sapmayı verecektir.

$$d_i = x_i - x_m \quad (7.2)$$

Deneysel bulguların, aritmetik ortalama değerden olan sapmaların dağılımını standart sapma belirler.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - x_m)^2}{n}} \quad (7.3)$$

Ölçüm değerlerinin ortalama değerden belirli bir hata payı ile  $\pm$  sapması belirlenirken; Gausien dağılımı (Normal hata dağılımı) yada daha hassas belirlemelerde t dağılımı fonksiyonlarından yararlanılabilir. Deneysel bulguların değerlendirilmesinde kullanılan bu yöntemler, standart sapma değeri ile çan eğrisinin sınır değerleri arasında bağıntı kurulmasını sağlar (Şekil 7.1).

#### 7.1.1 Güvenilirlik

Belirli güvenilirlik yüzdesi yada öngörülen hata yüzdelerinde, standart sapmanın güven aralığı sayısı ile çarpımı  $\pm$  sapmayı verecektir.

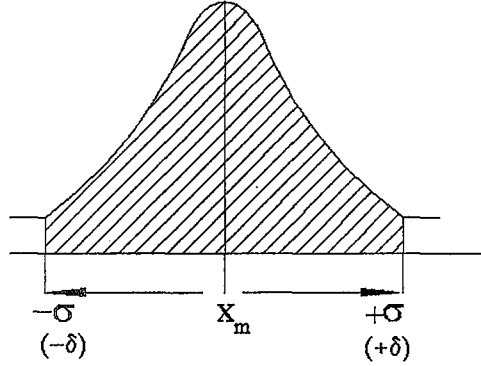
$$x_m \pm z\sigma \quad (7.4)$$

%99.0 güvenilirlikte (yada %1 öngörülen hata yüzdesinde)  $z=2,57$

%95.4 güvenilirlikte (yada %4.6 öngörülen hata yüzdesinde)  $z=2,0$

%68.3 güvenilirlikte (yada %31,7 öngörülen hata yüzdesinde)  $z=1$  olarak alınmıştır.

Bir başka deyişle, eldeki bir deney bulgusunun  $x$  ortalama değerinden  $\sigma$  standart sapma toleransı ( $x_m \pm \sigma$ ) içinde bulunabilme olasılığı %68.3,  $2\sigma$  standart sapma toleransı ( $x_m \pm 2\sigma$ ) içinde bulunabilme olasılığı ise %95.4 değerindedir (Genceli, 2000).



Şekil 7-1 Gausien hata dağılımı fonksiyon grafiği

Eğer ölçüm adedi az ise, sapmalar bulunurken aşağıdaki ifadeden yararlanır.

$$\delta = \frac{z\sigma}{\sqrt{n}} \Rightarrow x_m \pm \delta \quad (7.5)$$

Kapsül su karışım akışında kapsüller arasındaki ortalama mesafe ve belirli güven aralığında ortalama değerden ne kadarlık bir sapma olduğu Gausien hata dağılımı yöntemine göre belirlenmiştir.

Çizelge 7-1 %5-30 Konsantrasyon aralığında kapsül mesafelerindeki sapmalar

$C_{dlin}$	$l_{kp(ort)}$ (m)	$\sigma$ (Sapma)	$l_{kp(ort)} \pm 2\sigma$ (%95.4)	$l_{kp(ort)} \pm 1\sigma$ (%68.3)	$C_{dlin}$	$l_{kp(ort)}$ (m)	$\sigma$ (Sapma)	$l_{kp(ort)} \pm 2\sigma$ (%95.4)	$l_{kp(ort)} \pm 1\sigma$ (%68.3)
5%	0,7697	0,0511	0,1021	0,0511	20%	0,1860	0,0100	0,0200	0,0100
10%	0,3779	0,0249	0,0497	0,0249	25%	0,1425	0,0078	0,0157	0,0078
15%	0,2571	0,0134	0,0268	0,0134	30%	0,1198	0,0047	0,0093	0,0047

$x$  ve  $y$  gibi biri değişken diğeri sonuç olan sistemlerde  $y$  ifadesinin  $x$  değişkenine göre analitik

ifadesi en küçük kareler yöntemine göre bulunabilir.

İstatistiksel analizi yapılacak olan deney bulguları tablolaştırıldıktan sonra, bilgisayar programı vasıtasıyla sonuç değerleri için bir korelasyon eğrisi oluşturulmuş ve korelasyon eğrisi denklemleri sağlanmıştır. Her bir eğri için bulunan korelasyon katsayısı (R) bilgisayarın atadığı korelasyon katsayısı ile uyumlu bulunmuştur (Şekil 7.2 ve 7.3). Herhangi bir  $i$  noktasındaki değer ( $x_i$ ), korelasyon denkleminde yerine yazılacak olursa tahmini sonuçlar ( $y_{ic}$ ) elde edilecektir. Tahmini sonuçların gerçek değerlerden olan sapması tahmini değerlerin standart hatası olarak kabul edilir ve aşağıdaki şekilde gösterilir.

$$\sigma_{y,x} = \sqrt{\frac{\sum(y_i - y_{ic})^2}{n-2}} \quad (7.6)$$

$y_i$  sonuç değerlerinin ortalama değerden ( $y_m$ ) olan standart sapması ise;

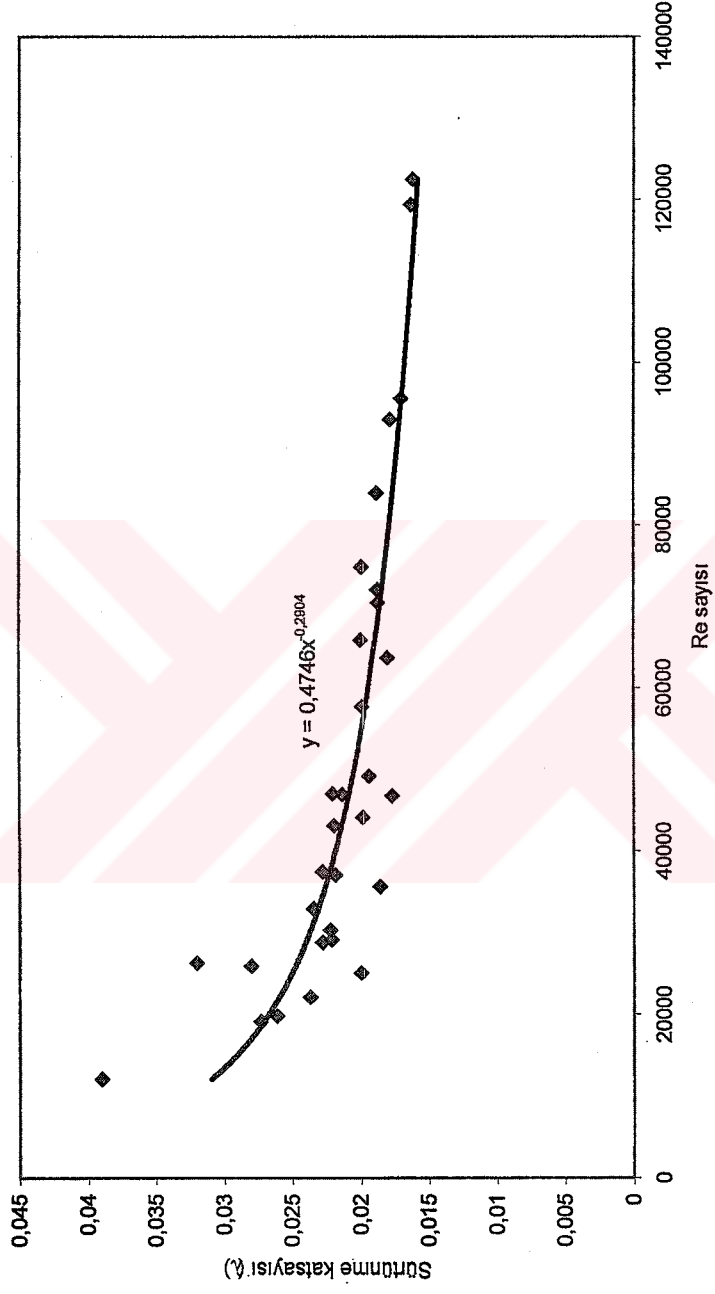
$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum(y_i - y_m)^2}{n-1}} \quad (7.7)$$

olarak bulunur.

$\sigma_{y,x}=0$  iken korelasyon eğrisi ile deneysel bulgular tam uyumludur. Başka bir deyişle  $R=1$  dir. Eğer,  $\sigma_y=\sigma_{y,x}$  ise  $R=0$  dır. Deneysel bulguların korelasyon eğrisi ile uyumsuz olduğu görülür (Holman, 1994). Şekillerde (Şekil 7.2 ve 7.3) verilen eğrilerin korelasyon katsayıları ve standart hataları bulunmuş, sonuçlar Çizelge 7.2'de verilmiştir.

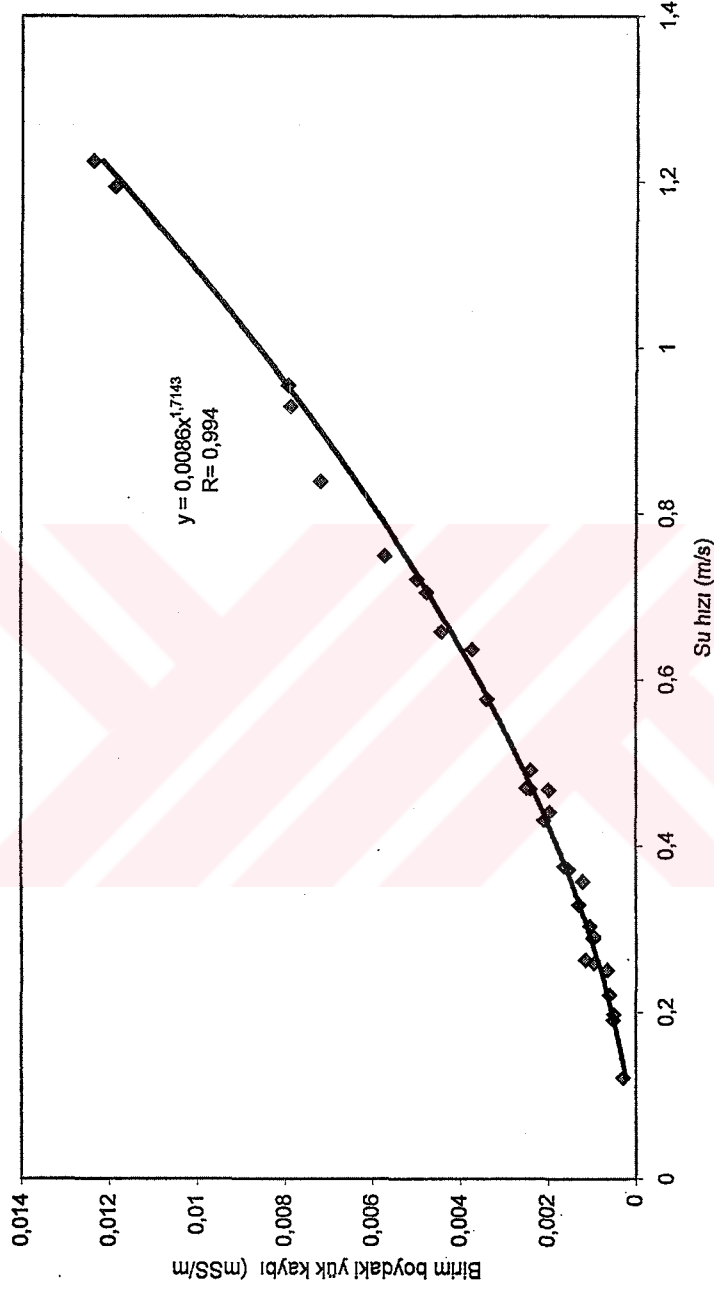
Çizelge 7-2 İstatistiksel analiz sonuçları

Eğri adı	Ortalama değer	%99.0 (güvenilirlikle)	%95.4 (güvenilirlikle)	%68.3 (güvenilirlikle)
$\lambda=f(Re)$	$\lambda=0,0217$	$\pm 0,0022$	$\pm 0,00172$	$\pm 0,00086$
$(\Delta H/L)_s-V_s$	$(\Delta H/L)_s=0,003255$	$\pm 0,001488$	$\pm 0,001158$	$\pm 0,000579$



Şekil 7-2 Tek faz su akışında deneysel bulgulara bağlı  $\lambda=f(Re)$  değişimi





Şekil 7-3 Tek faz su akışında deneysel bulgulara bağlı  $(\Delta H/L)_s$ - $V_s$  değişimi

## 7.2 Deney hata analizi

Deney sisteminde kullanılan ölçüm cihazları ve aletlerinin hassasiyeti deneysel bulguların doğruluğunu etkilemektedir. Hata hesabı yapılırken, boru çapını ölçmek için kullanılan kumpas, basınç düşüşü ölçümünde kullanılan transmitter, debi tespitinde yararlanılan su sayaçları, kapsül ağılığı belirlenirken kullanılan hassas terazi, kronometre ya da sisteme yerleştirilmiş olan termokupl'un sahip olduğu hassasiyet değeri ve bu değerlerin ölçüm sonuçlarına etkisi bilinmelidir.

Deneysel bulguların hata analizi yapılırken belirsizlik analizi yönteminden yararlanılmıştır. Ölçülecek N fiziksel büyüklüğü, n tane bağımsız değişkenin etkisinde olsun. Bu değişkenler  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  olarak verilsin.

$$N = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

Bağımsız değişkenlere ait hata oranları,  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$  ise, ölçümü yapılacak fiziksel büyüklüğün hata oranı aşağıdaki ifade ile bulunur.

$$w_N = \left[ \left( \frac{\partial N}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial N}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial N}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.8)$$

$$N \mp w_N \quad (\text{Mutlak hata}) \quad (7.9)$$

$$\%w_N = \frac{w_N 100}{N} \quad (\text{Bağıl hata}) \quad (7.10)$$

Çizelge 7-3 Ölçülen değerler ve belirsizlikleri

Ölçülen değerler	Ölçüm aletinin hassasiyeti
Basınç (Pa)	%0,5
Hacim (m <sup>3</sup> )	%0,5
Zaman (s)	%0,5
Uzunluk (m)	%0,5
Ağırlık (kg)	%0,5
Sıcaklık (°C)	±1°C

Yapılan bir ölçümde su sayacından geçen suyun hacmi  $v=0,05\pm\%0,5$  m<sup>3</sup>, kronometre ile okunan süre  $t=44,9\pm\%0,5$  s'dir. Belirsizlik analizine göre sayaçlara ve kronometreye ait % hataların, Eşitlik 7.11 ile hesaplanan  $Q$  (m<sup>3</sup>/sn) değeri üzerindeki etkisi bulunmak istenirse.

$$Q = \frac{v}{t} \quad (\text{m}^3/\text{sn}) \quad (7.11)$$

$$Q=f(v(\text{hacim}),t(\text{zaman}))$$

Eşitlik 7.8'e göre hem  $v$  hem de  $t$  için ayrı ayrı kısmi türevler alınır:

$$\frac{\partial Q}{\partial v} = \frac{1}{t}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -\frac{v}{t^2}$$

$$w_v=0,00025 \text{ m}^3, w_t=0,225 \text{ s}$$

$$w_Q = \left[ \left( \frac{w_v}{t} \right)^2 + \left( -\frac{v}{t^2} w_t \right)^2 \right]^{1/2} = 7,858 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

İşlemlerden sonra debi değerinin  $\pm\%0,7$ 'lik bir hata ile ölçüldüğü bulunur. Benzer şekilde diğer büyüklüklere ait hata oranları bulunmuştur. Tüm sisteme ait değişkenler;  $f(Q, V, N_{te}, v, \rho, A, \Delta P, Re)$  olarak kabul edilmiştir.

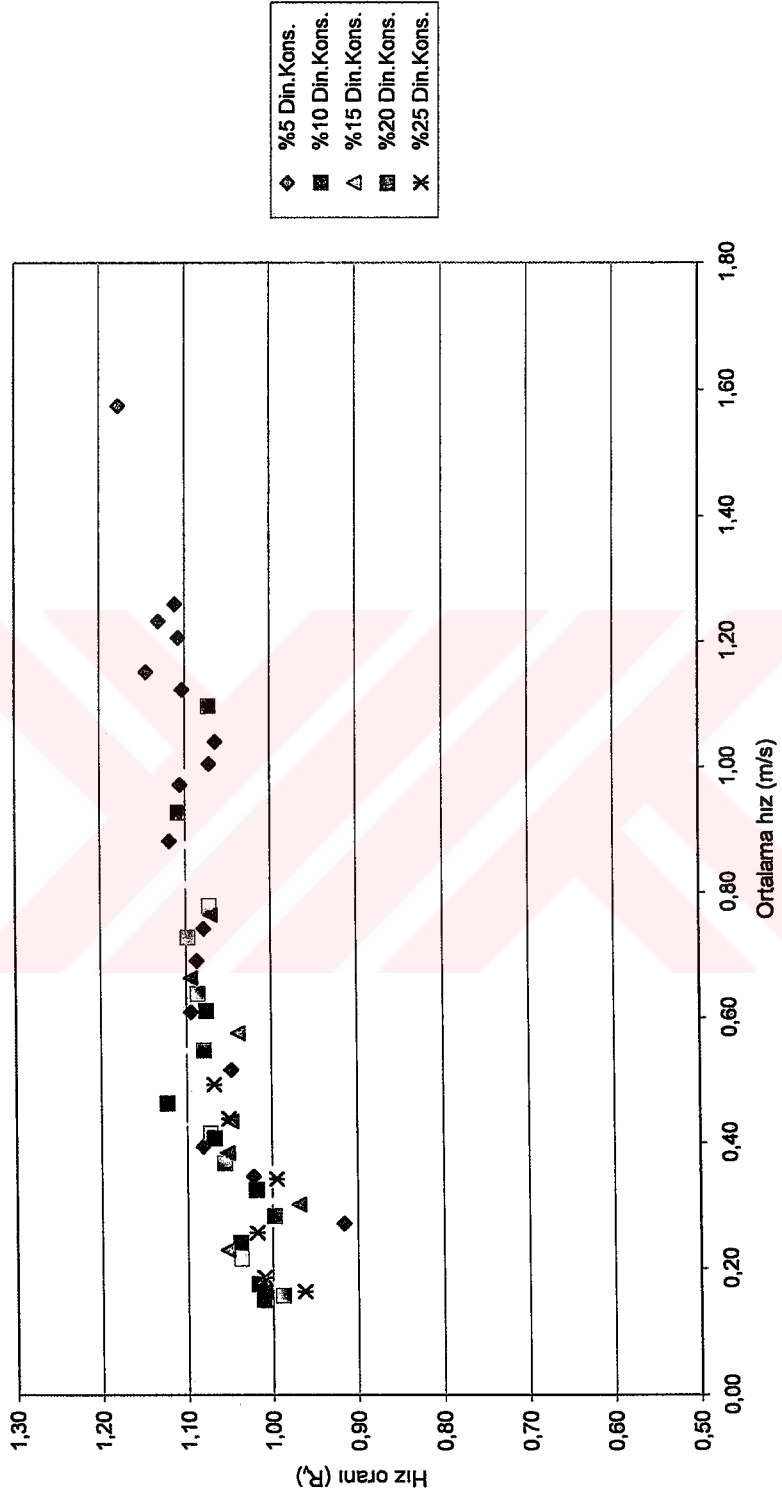
Çizelge 7-4 Deney sonuçları ile hesaplanmış değerler ve bağıl hata oranları

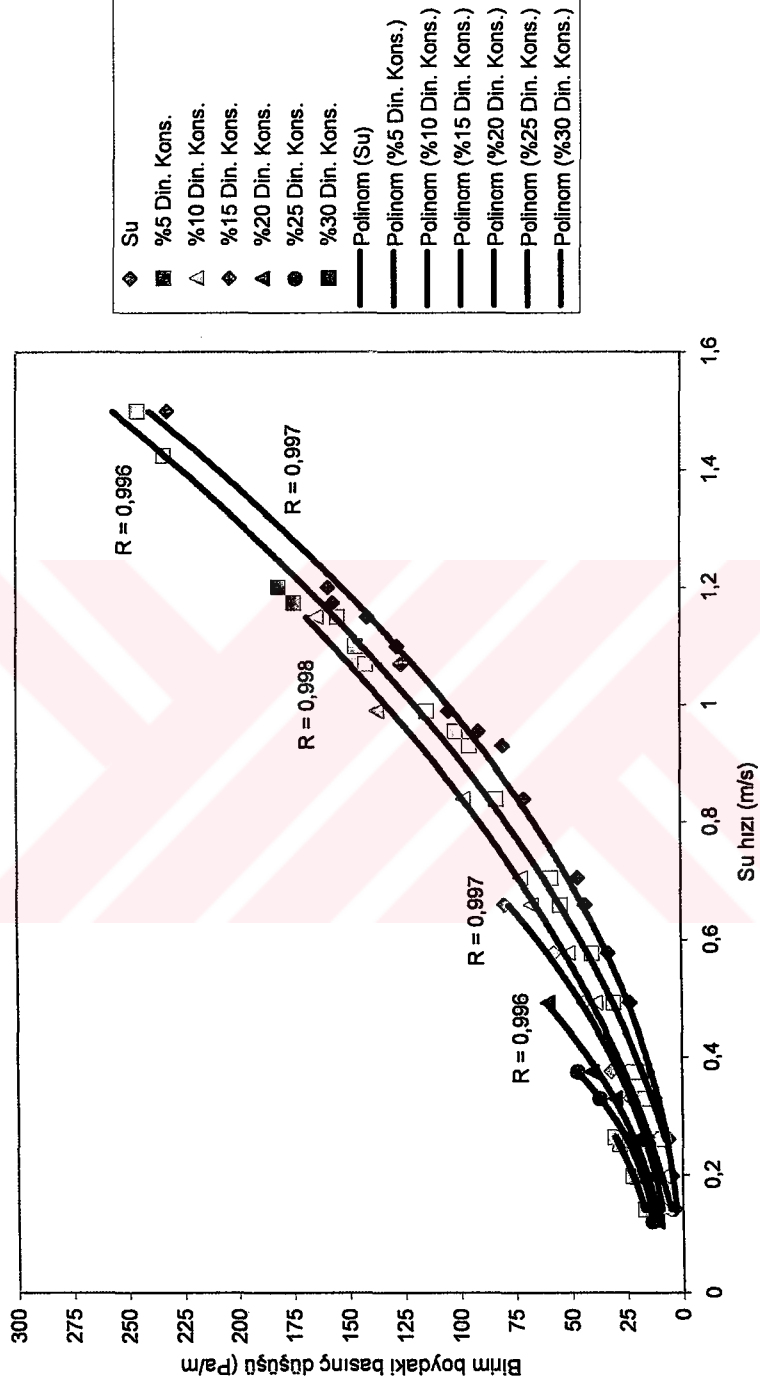
Ölçülen değer	% Hata	Ölçülen değer	% Hata
$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	0,7	$\Delta P$ (Pa)	0,45
$V$ (m/s)	1,22	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1,66
$N_{te}$ (adet/s)	0,7	$v$ (m <sup>2</sup> /s)	2,02
$Re$	2,66	$A$ (m <sup>2</sup> )	1

## 8. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

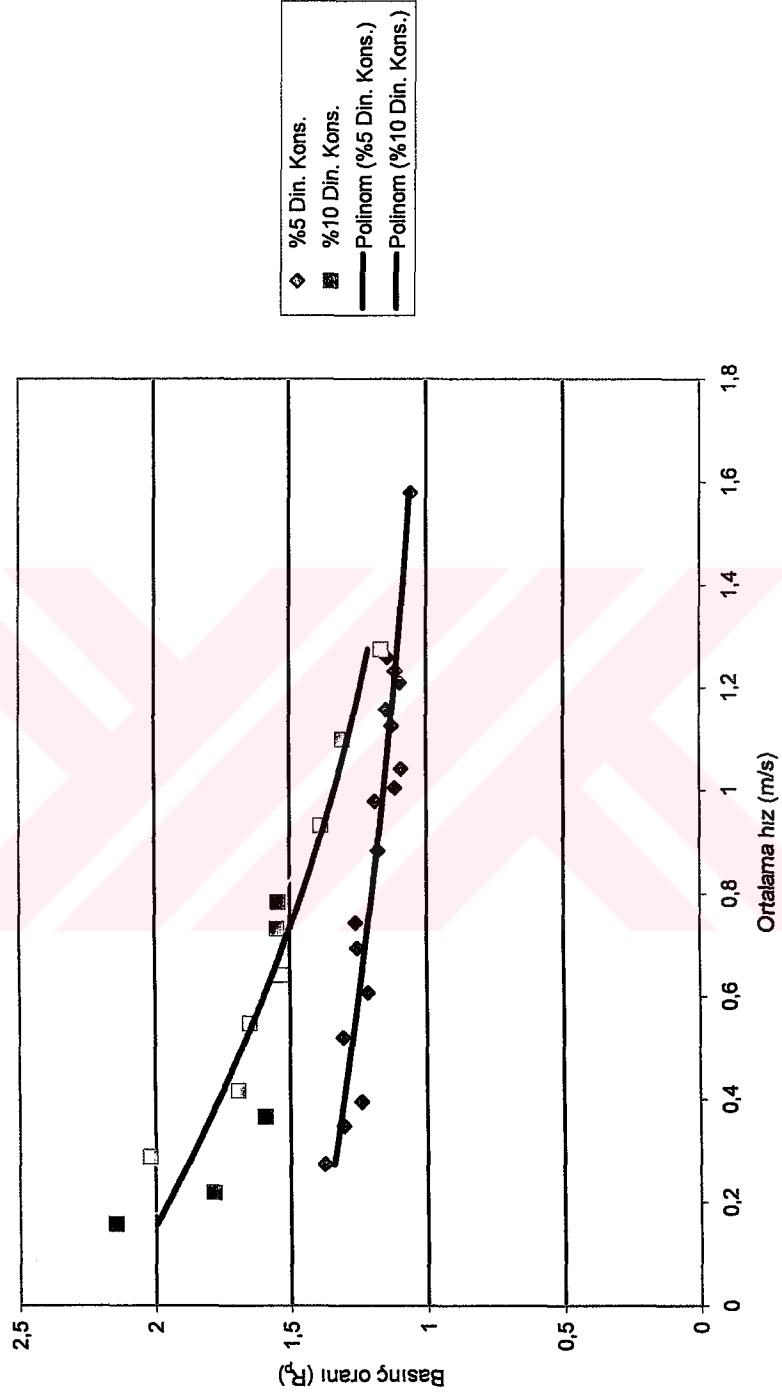
### 8.1 Deneyler Sırasında Tespit Edilen Kapsül Akış Özellikleri

- 1) Boru yatay ve kapsüllerin yoğunluğu sudan daha az olduğu için suyun kaldırma kuvveti etkisi nedeniyle kapsüller boru üst yüzeyine temas ederek ilerlemiştir. 0.1-0.8 m/sn su hızlarında kapsül hareketi sadece dönme şeklinde olmuştur.
- 2) Su hızı yaklaşık 0.8m/s iken kapsül hareketinde dönme ile birlikte eksene doğru sıçrama hareketi gözlenmiştir. Bunun nedeni su hızının artması ile birlikte dönme hızı artan küresel kapsüllerin etrafını çevreleyen suyun türbülans şiddetinin artması, küresel kapsülün boru üst yüzeyinden ayrılması, sürtünme kuvvetlerinin düşmesi ve küresel kapsülün kayma (akma) eğilimine başlamasıdır.
- 3) 0.95m/s'den büyük su hızlarında ve %5'den daha fazla kapsül konsantrasyonlarında küresel kapsüllerde kayma hareketi gözlenmiştir. Kapsül boru üst yüzeyi ile teması olmaksızın arada kalan sıvı filmi altındaki hareketini dönme+kayma eğilimli şekilde sürdürmüştür. Su hızı arttıkça kapsül hızları da artmıştır. Yatay yöndeki kesme ve basınç kuvvetleri azalmıştır. Sonuç olarak, küresel kapsüllerin boru ekseninde sabit bir hızla kayarak hareket etme eğilimi artmıştır.
- 4) Deneyler süresince yapılan ölçümler göstermiştir ki, bu tip akışlarda katı fazı sıvı faz sürüklemektedir. Su hızı arttıkça, hız oranında ( $R_v$ ) artma olmuştur. Su hızının, 0.12-1.5m/s arasındaki değerlerinde ve %5-25 kapsül konsantrasyonlarında yapılan tüm ölçümlerde  $R_v > 1$  bulunmuştur. Bunun nedeni küresel kapsüllerin özellikle yüksek hızlarda, maksimum akım hızlarının olduğu boru eksenine doğru kaymalarıdır. Su hızı ve kapsül konsantrasyonlarına bağlı hız oranları değişimi Şekil 8.1'de görülmektedir.
- 5) Düşük konsantrasyonlarda kapsül-su karışımında oluşan basınç düşüşü , tek faz su akışında oluşan basınç düşüşüne yakın çıkmıştır. %5-30 dinamik kapsül konsantrasyonları için bulunan basınç düşüşü eğri karakteristiklerinin birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür (Şekil 8.2).
- 6) Kapsüllü akışta, su hızı ve kapsül konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak basınç düşüşleri de orantılı olarak artmıştır . İlgili grafikler aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

Şekil 8-1 Ortalama hıza bağlı  $R_v$  değişimi



Şekil 8-2 Deneysel bulgulara göre  $(\Delta P/L)_{kr} - V_s$  eğrileri ve korelasyon katsayıları



Şekil 8-3 Basınç oranının ortalama hıza bağlı olarak değişimi

- 7) Karışım hızı arttıkça, basınç oranlarında düşüş görülmüştür. Bunun nedeni akış hızı arttıkça, küresel kapsüllerin boru yüzeyinden, boru eksenine doğru yer değiştirmesi (eşmerkezli pozisyona kaymaları) ve dönme hareketlerinin azalmasıdır. Kapsül hareketinin daha çok kayma (akma) ağırlıklı olması nedeniyle kapsül etrafındaki kayma gerilmeleri azalmıştır. Sonuç olarak, su hızının çok yüksek değerlerinde  $R_p$  değerinin 1'e yaklaşması (yani kapsüllü akışta oluşan basınç düşüşünün tek faz su akışında oluşan basınç düşüşüne oranının bir olması) mümkündür denilebilir (Şekil 8.3).

## 8.2 Deney Sonuçlarının Diğer Akış Tiplerindeki Modeller ile Karşılaştırılması

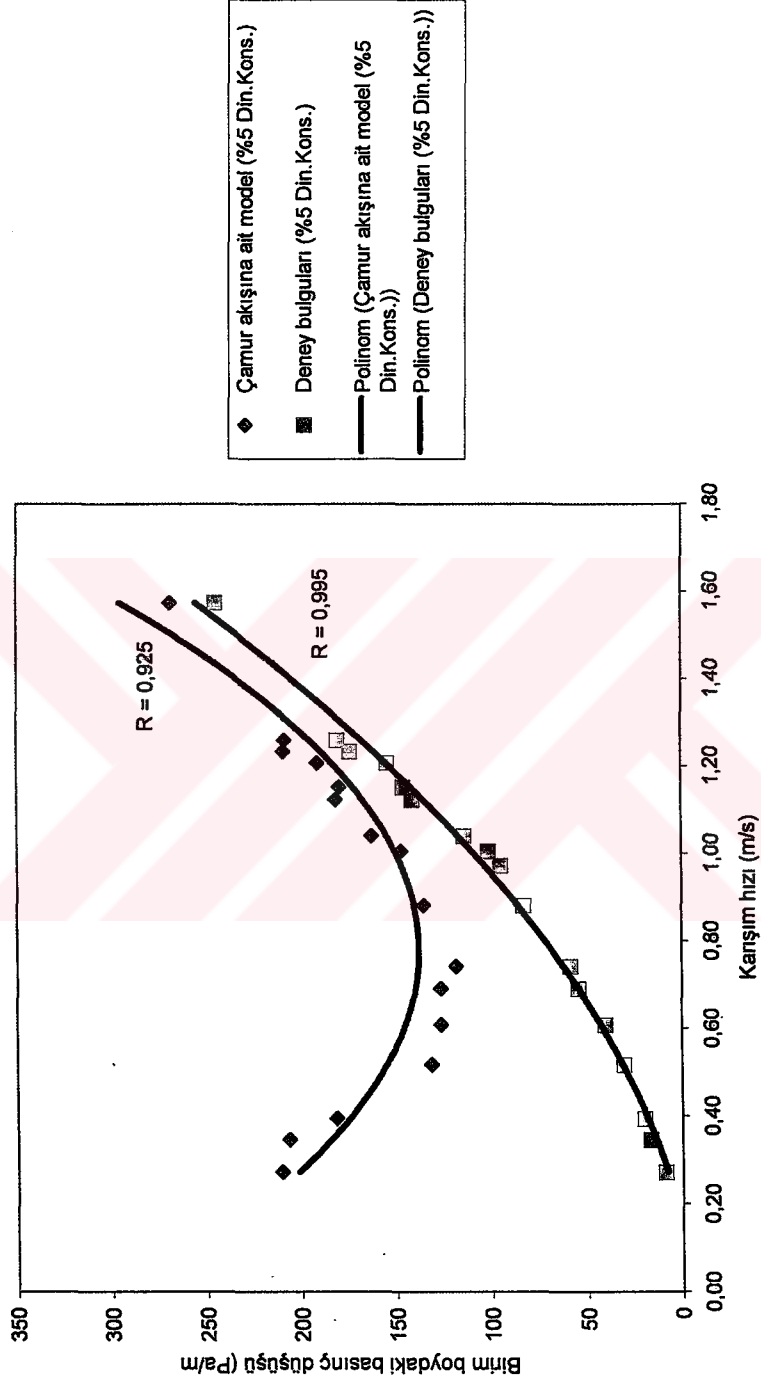
Simetrik ve asimetrik süspansiyon akışlarında taneler boru enine kesiti boyunca düzgün dağılmış durumdadırlar. Küresel kapsüller ise boru çapının neredeyse %80-90'ını doldurduklarından boru içinde sanki homojen dağılmış tanelerin oluşturduğu bir kütleymiş gibi düşünülerek iki akış tipi arasında bir benzeşim kurulabilir.

Hız ve konsantrasyon dağılımlarının benzerliğinden dolayı simetrik ve asimetrik süspansiyon akışlarına ait matematiksel modeller ile deney sonuçlarının bir karşılaştırılması yapıldığında, modellerin deney sonuçlarını simüle etmediği görülmüştür.

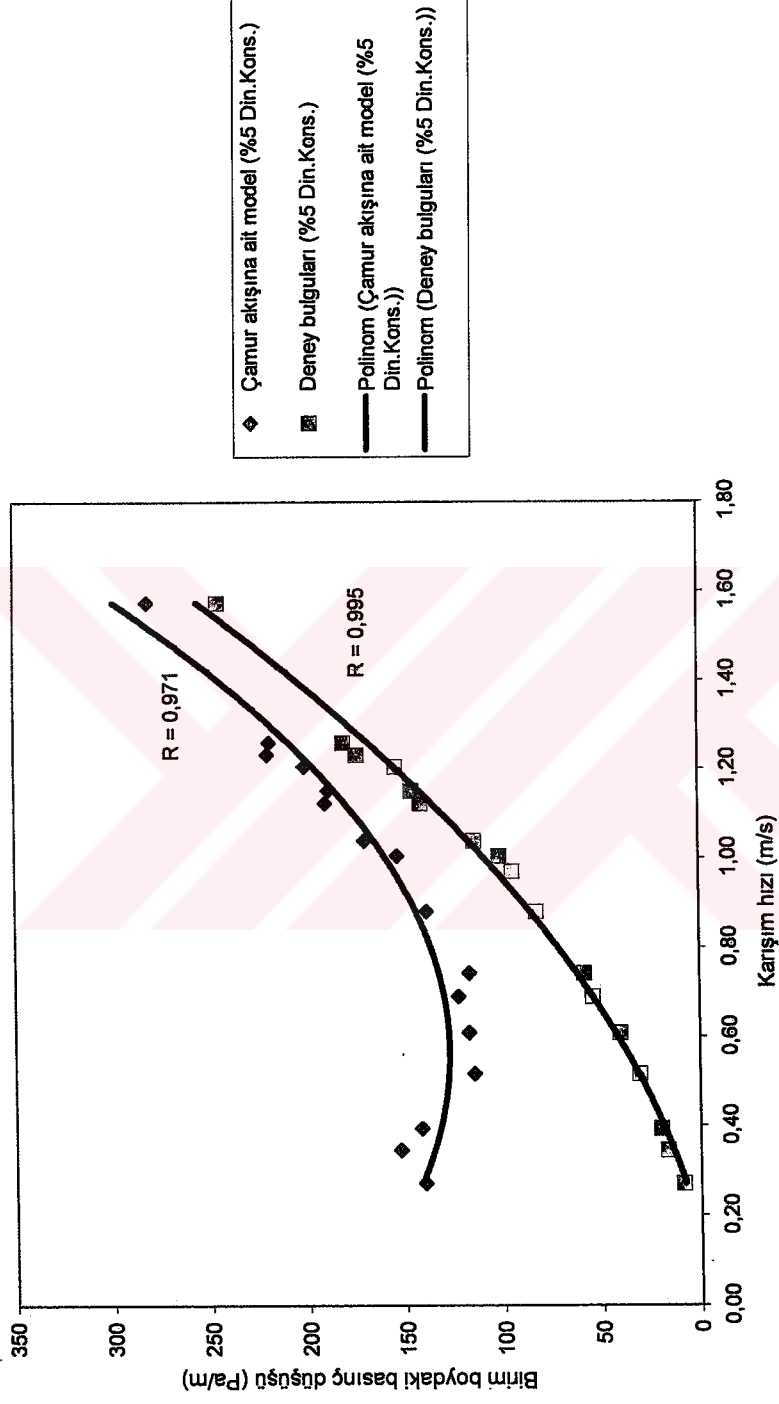
Deneyssel olarak elde edilen basınç düşüşü değerleri, küresel kapsül akışlarında kullanılan genel basınç düşüşü ifadeleri ile de karşılaştırılmıştır. Bu ifadelerin biri kapsül-su karışım akışını tek fazlı bir karışım akışı olarak ele alan Govier ve Aziz'in ifadesi (bkz. Bölüm 3), diğeri ise aynı kabulün yapıldığı fakat sürtünme katsayısı hesaplanırken (bkz. Bölüm 3) farklı bir yol izlenen Agarwal'ın ifadesidir. Bu teorik yaklaşımlara deney değerleri uygulandığında elde edilen basınç düşüşü değerlerinin, deney bulgularından oldukça farklı olduğu (sapma %20'den fazla) tespit edilmiştir (bkz. Ek 2,3,4,5,6,7,8).

Farklı tipteki akışlar için geliştirilmiş basınç düşüşü eşitliklerine, deney değişkenleri uygulandığında (karışım hızı, tane çapı, boru çapı, tane konsantrasyonu, tane yoğunluğu,..vd.) elde edilen basınç düşüşü değerleri ile deneyssel olarak elde edilmiş %5 kapsül konsantrasyonlarındaki basınç düşüşü değerleri karşılaştırılmış, mevcut modeller ile bulunmuş basınç düşüşlerinin, deney sonuçlarını sağlamadığı görülmüştür. İlgili grafikler aşağıda sunulmuştur.

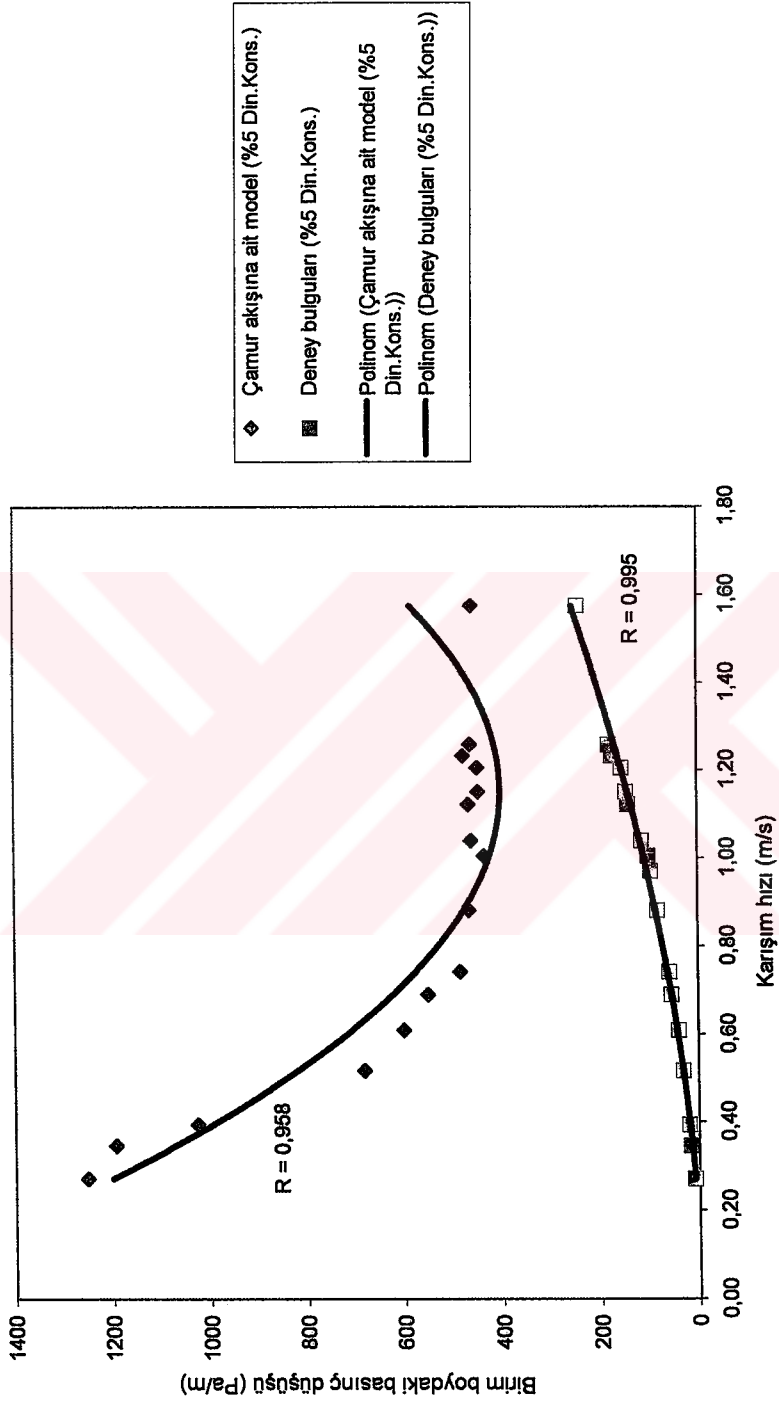




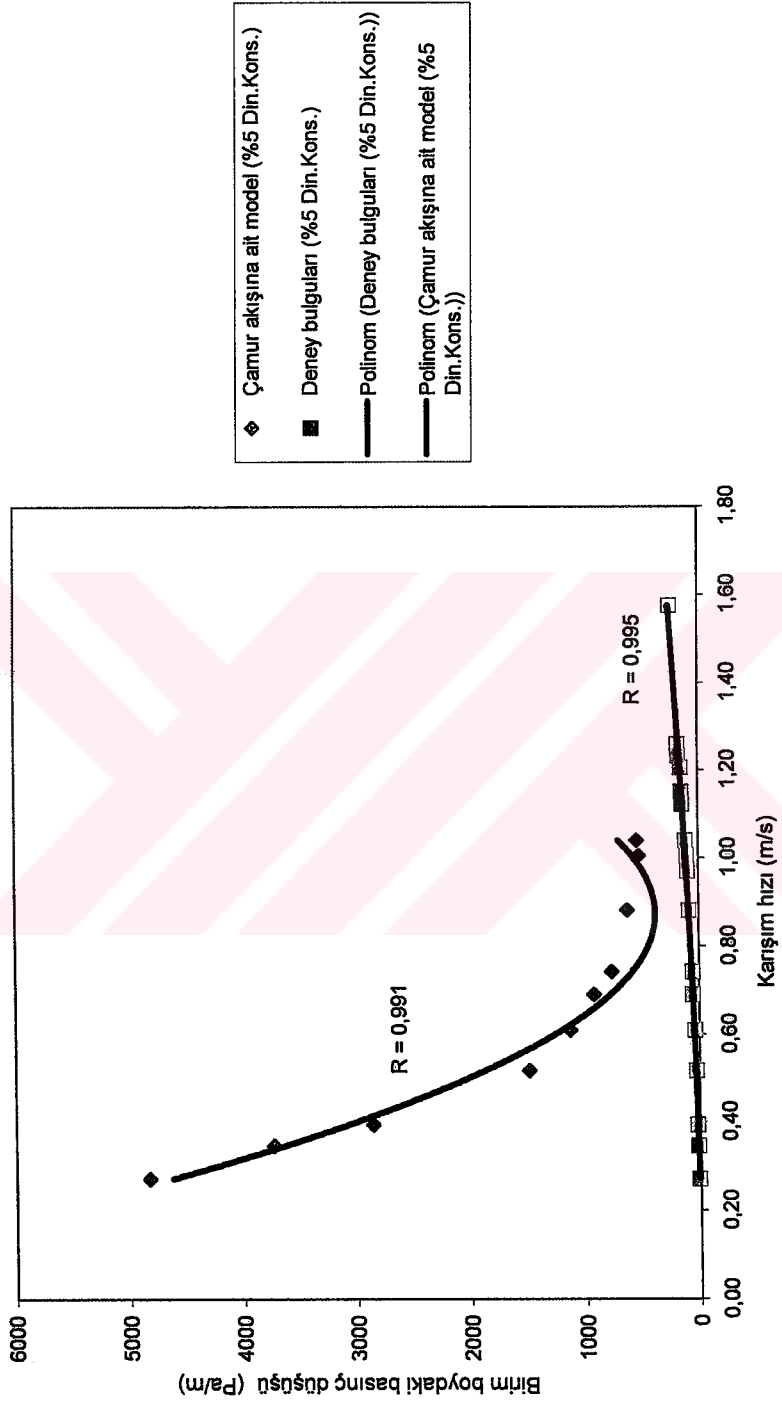
Şekil 8-4 %5 Katı madde konsantrasyonunda Durand-Condolios çamur akışı modelinin deney bulgularını ile karşılaştırılması



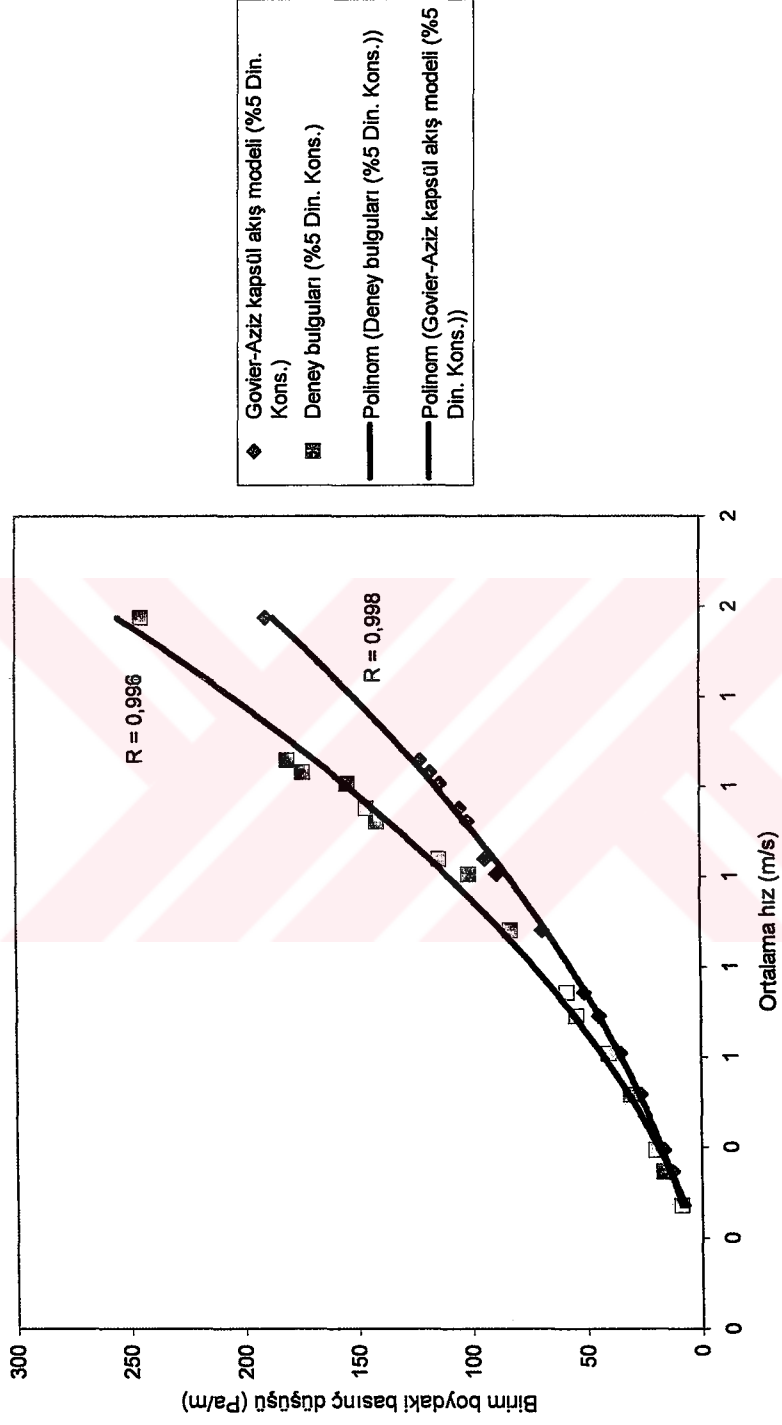
Şekil 8-5 %5 Katı madde konsantrasyonunda Hayden-Stelson çamur akışı modelinin deney bulguları ile karşılaştırılması



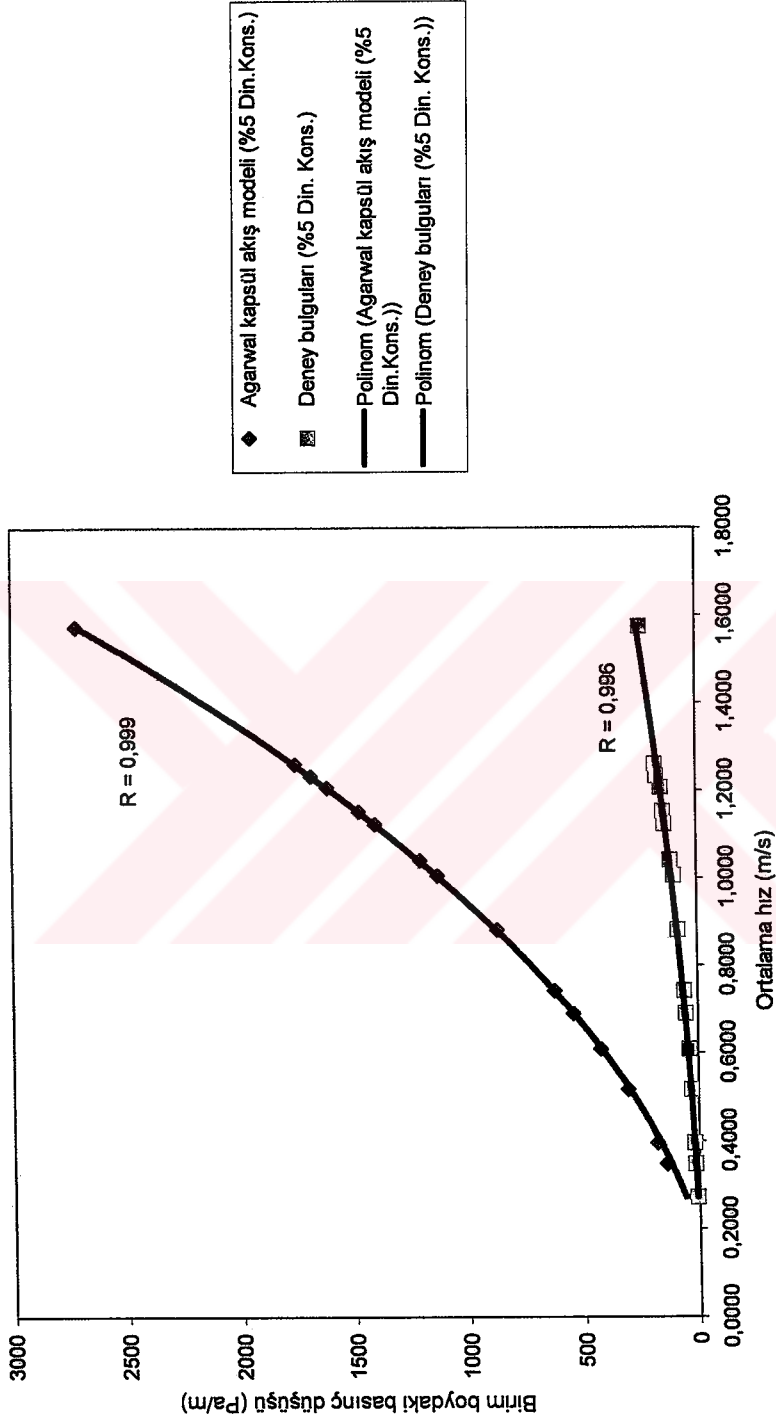
Şekil 8-6 %5 Katı madde konsantrasyonunda Newitt çamur akışı modelinin deney bulguları ile karşılaştırılması



Şekil 8-7 %5 Katı madde konsantrasyonunda Zandi-Govatos çamur akışı modelinin deney bulguları ile karşılaştırılması



Şekil 8-8 %5 Katı madde konsantrasyonunda Govier-Aziz küresel akış modelinin deneysel bulgular ile karşılaştırılması (%20 Sapma)



Şekil 8-9 %5 Katı madde konsantrasyonunda Agarwal küresel akış modelinin deney bulguları ile karşılaştırılması

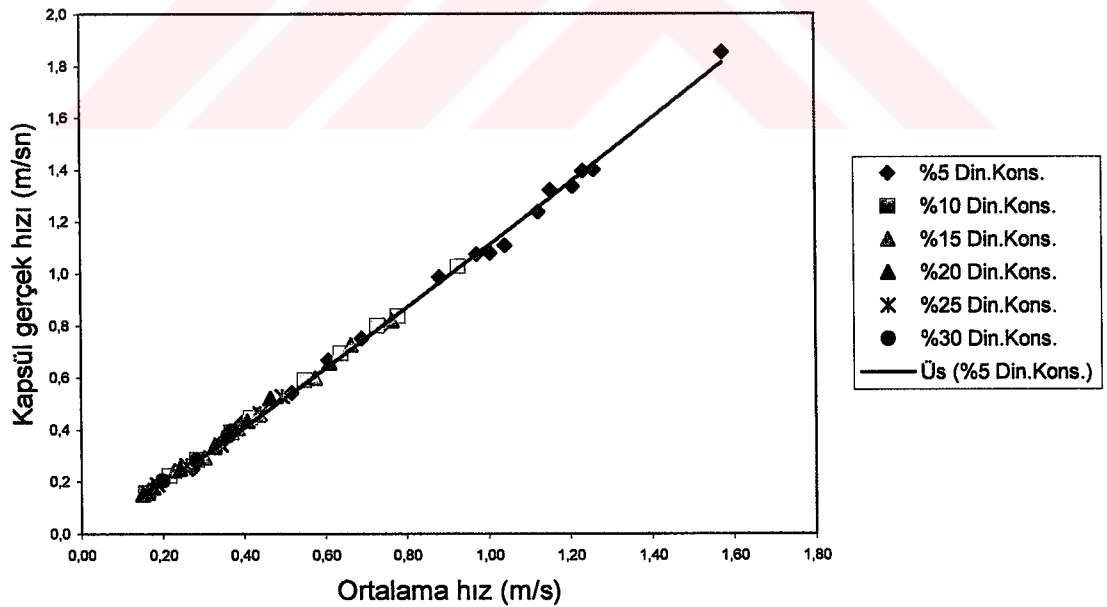
## 9. SONUÇLAR

İki fazlı akış olan boru hatlarının projelendirilmesinde, pompa debisi, basma yüksekliği, gücünün, boru çapı, tane çapı ve basınç düşüşlerini minimum yapacak taşıma şartlarının tam olarak belirlenmesi, yapılacak deneylere ve bu deneylerden elde edilecek bulgulara bağlıdır. Bu yüzden, prototip deney tesisatları, nakli düşünülen madde ve taşıma şekline göre, mümkün olduğunca gerçeğine benzer şartları sağlayacak şekilde kurulmalıdır. Ancak bu şekilde, toplanan veriler belirli akım şartları için özelleştirilebilir.

Yatay borular içinde, yoğunluğu sudan az olan küresel kapsül treni akışlarına ait deneysel çalışmada ulaşılan genel sonuçlara aşağıda yer verilmiş, bu alanda boşlukları dolduracağı düşünülen diğer çalışmalardan bahsedilmiştir.

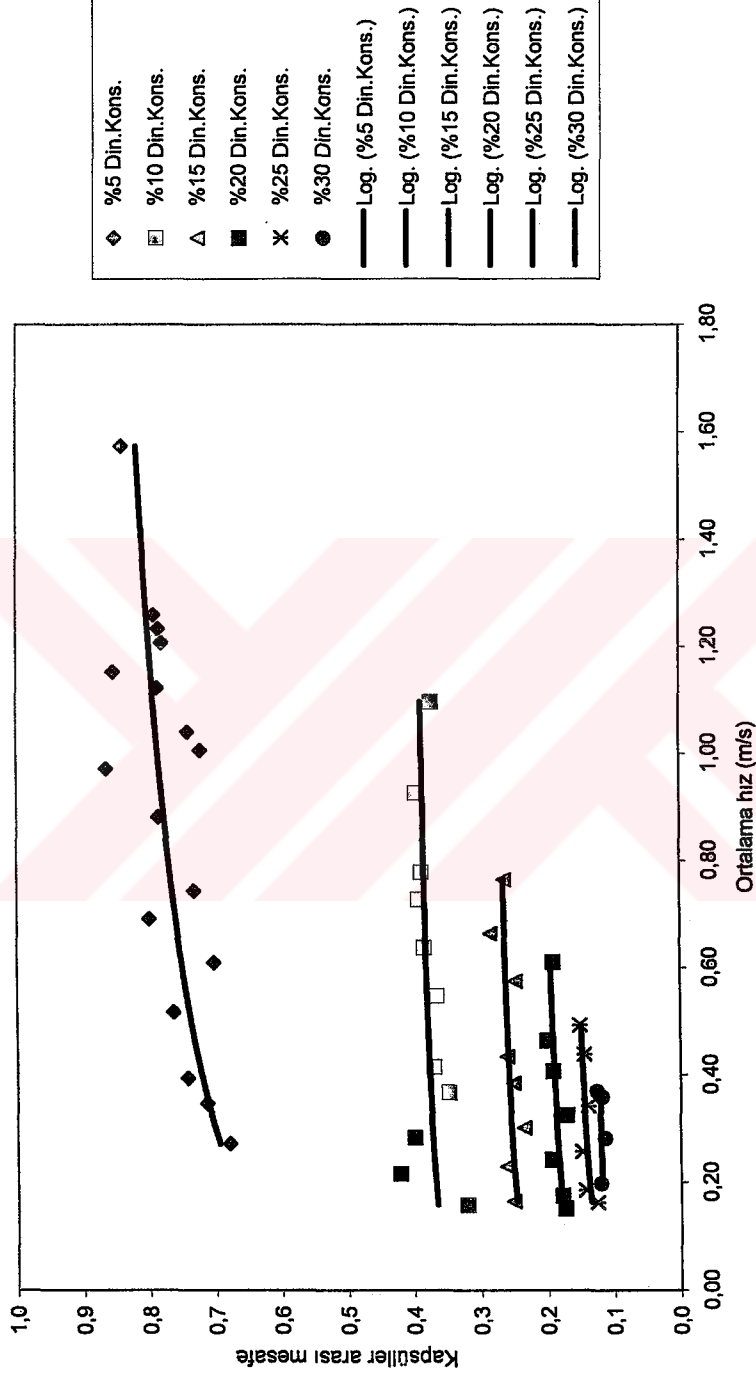
- 1) Su hızındaki ve kapsül konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak basınç düşüşleri artmıştır. Kapsüllü akışta oluşan basınç düşüşlerinin eğri karakteristikleri, tek faz su akışının basınç düşüşü eğri karakteristiği ile uyumludur.
- 2) Düşük hızlarda basınç düşüşü değerleri, tek faz su akışında oluşan basınç düşüşü değerlerine çok yakın çıkmıştır. Bu sonuç, kapsül akışlarını çamur akışlarından ayıran en belirgin özelliktir. Orta hızlara çıkıldığında değişik konsantrasyonlardaki basınç düşüşü değerleri, türbülans şiddeti ve buna bağlı kapsül dönme sayısının artması nedeniyle tek faz su değerlerinden uzaklaşmıştır.
- 3) Katı fazı sıvı faz sürüklemektedir. Değişik su hızları ve konsantrasyon aralıklarında, hız oranı her zaman bire çok yakın veya birden büyük çıkmıştır. Bunun nedeni kapsüllerin, maksimum hızın gerçekleştiği boru eksenine boyunca hareket etmeleridir. Deneysel bulgulara göre  $V_{kp(G)}=1.05V_s$  olarak tespit edilmiştir.
- 4) Düşük hızlarda kapsül hareketi sadece dönme, orta ve yüksek hızlarda dönme+kayma eğilimli şeklinde gerçekleşmiştir.
- 5) Dinamik konsantrasyon artışına bağlı olarak kapsüller arasındaki mesafeler kısalmıştır. Sabit konsantrasyonlarda ise ortalama hız artışına bağlı olarak kapsül mesafeleri hemen hemen sabit kalmıştır. (Şekil 9.2).
- 6)  $0.12 < V_s < 1.5$  m/s aralığında ve %5-25 kapsül konsantrasyonlarında yapılan tüm ölçümlerde  $R_v > 1$  bulunmuştur. Ortalama hız arttıkça hız oranı 1'den uzaklaşmıştır. Bunun nedeni kapsüllerin yüksek hızlarda boru eksenine doğru kaymalarıdır.

- 7) Sabit konsantrasyonlarda, ortalama hız arttıkça basınç oranında azalma (1'e yaklaşma) meydana gelmiştir. Bunun nedeni kapsüllerin yüksek hızlarda boru eksenini üzerinde (eşmerkezli pozisyon) hareket etme eğiliminde olmalarıdır. Kapsüller kaymaya (akmaya) başladıklarında dönme sayısı azalmakta buna bağlı olarak kapsül etrafında oluşan kayma gerilmeleri azalmaktadır. Katı-katı sürtünmesi, katı-sıvı (aradaki sıvı filmi altında çok az da olsa dönme hareketi sürer) sürtünmesine dönüşmektedir (Şekil 9.3).
- 8) Ortalama hızın sabit değerlerinde, özellikle düşük hızlarda, konsantrasyon arttıkça basınç oranında önemli artışlar görülmüştür. Bunun nedeni, düşük hızlarda dönme hareketi yapan, kapsül sayısının artması (kapsüllerin boru ile temas eden toplam yüzey alanı büyür) buna bağlı olarak sürtünmeye bağlı basınç düşüşlerinin artmasıdır. Ortalama hız arttıkça, konsantrasyon artışına bağlı, basınç oranı artışı azalmıştır.
- 9) Ortalama hız artışı ile birlikte, kapsül gerçek hızları da doğru orantılı artmıştır (Şekil 9.1).

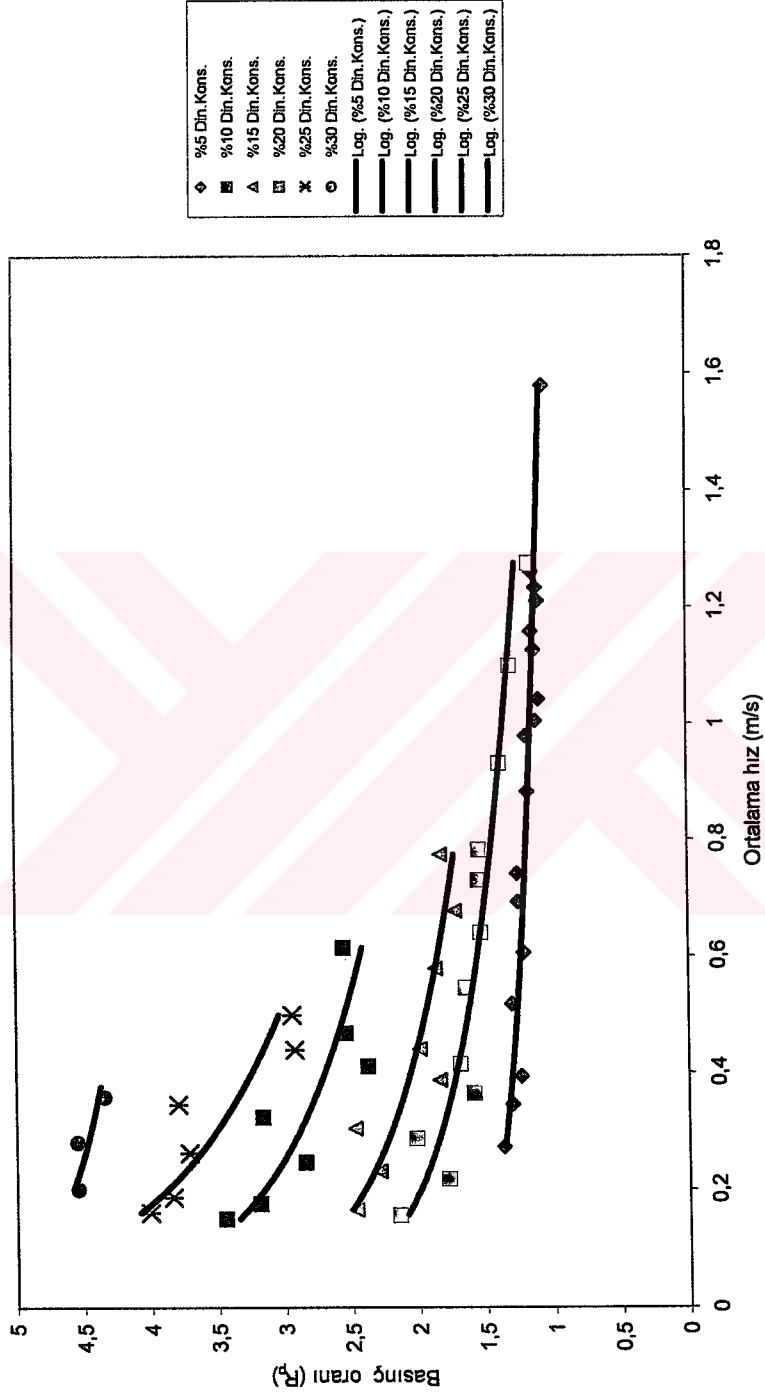


Şekil 9-1 Ortalama hıza bağlı kapsül gerçek hızlarının değişimi





Şekil 9-2 Ortalama hız ve konsantrasyona bağlı kapsül mesafeleri



Şekil 9-3 Ortalama hız ve konsantrasyona bağlı basınç oranı değişimi (Deneysel)

10) Sisteme ait bağımsız değişken parametreleri Eşitlik 9.1'deki gibi bulunmuştur.

$$V_{kp(G)} \text{ ya da } \left( \frac{\Delta P}{L} \right)_{kr} \text{ için } = f(V_{ort}, D, d, \rho_{kp}, \rho, \mu, l_{kp}, g, e_{kp}, e_b) \quad (9.1)$$

Buckingham'ın boyut analizi temel alınarak bulunan boyutsuz sayılar, kayma oranı ( $R_v = V_{kp(G)}/V_{ort}$ ) ya da boyutsuz basınç düşüşü ifadesinin fonksiyonu olarak yazılmıştır.

$$\frac{V_{kp(G)}}{V_{ort}} = f\left(\frac{d}{D}, \frac{\rho_{kp}}{\rho}, \frac{V_{ort}\rho D}{\mu}, \frac{e_{kp}}{d}, \frac{e_b}{D}, \frac{V_{ort}^2}{gd}, \frac{d}{l_{kp}}\right) \quad (9.2)$$

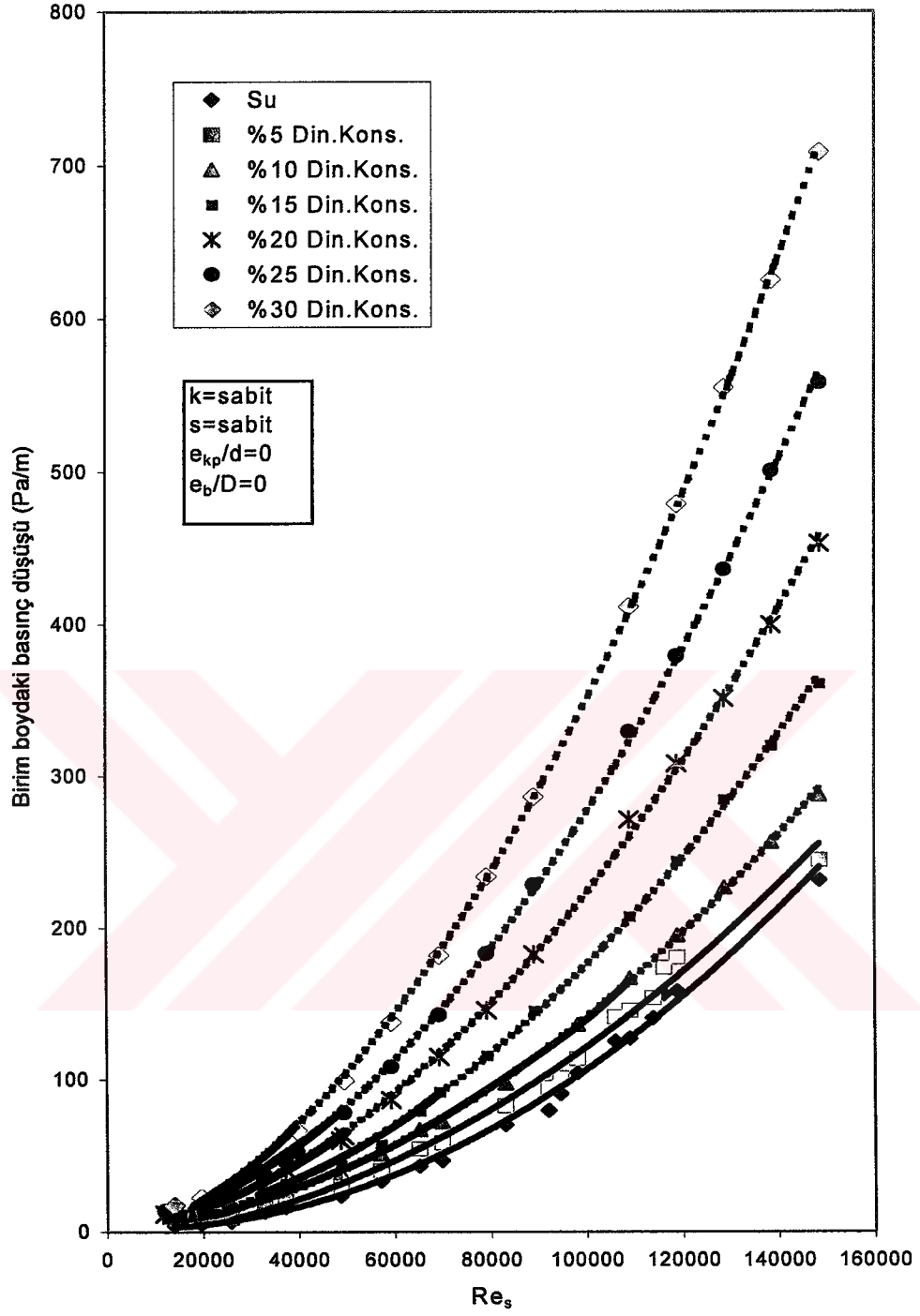
$$\frac{V_{ort}^2 \rho}{D} \left( \frac{\Delta P}{L} \right)_{kr}^{-1} = f\left(\frac{d}{D}, \frac{\rho_{kp}}{\rho}, \frac{V_{ort}\rho D}{\mu}, \frac{e_{kp}}{d}, \frac{e_b}{D}, \frac{V_{ort}^2}{gd}, \frac{d}{l_{kp}}\right) \quad (9.3)$$

11) "Kapsül su karışım akışında meydana gelen birim boydaki toplam basınç düşüşü tek faz karışım akışının oluşturduğu basınç düşüşü (homojen akış) ile kürelerin dönme hareketi sonucunda oluşan basınç düşüşünün toplamıdır" Teorik yaklaşımından hareketle, kapsül-su karışım akışındaki fiziksel olayı karakterize eden matematiksel bir ifade geliştirilmiştir.

$$\left( \frac{\Delta P}{L} \right)_{kr} = \lambda_b \frac{1}{D} \rho_{kr} \left[ 1 + Y \frac{C_{st}^2 \lambda_{kp}}{[1 + C_{st}(s-1)] k^5 \lambda_b} \right] \quad (9.4)$$

Eşitliğin sağ tarafında kalan birinci terim tek faz karışım akışında oluşan basınç düşüşünü ikinci ve boyutsuzlaştırılmış olan terim kapsüllerin dönme hareketine bağlı olarak oluşan basınç düşüşünü vermektedir.

Boyutsuz olan terimin önündeki katsayı (Y) deneysel bulgulara bağlı olarak belirlenmiştir. Teorik yaklaşımdaki kabuller dikkate alınarak yapılan hesaplarda, deneysel bulgulara göre, %5-20 kapsül konsantrasyonunda bu katsayı 6.4, %20-30 kapsül konsantrasyonunda 3.8 olarak bulunmuştur. Hesaplanan sonuçlar (Eşitlik 9.4'e göre) ile deneysel bulgular karşılaştırıldığında,  $2.5 \times 10^4 < Re < 1.5 \times 10^5$  için ortalama %8.6'lık bir sapma ile uyum sağlamaktadır.



Şekil 9-4 Eşitlik 9.5 ve deneysel bulgular dikkate alınarak bulunan  $(\Delta P/L)_{kr} - Re_s$  değişimi

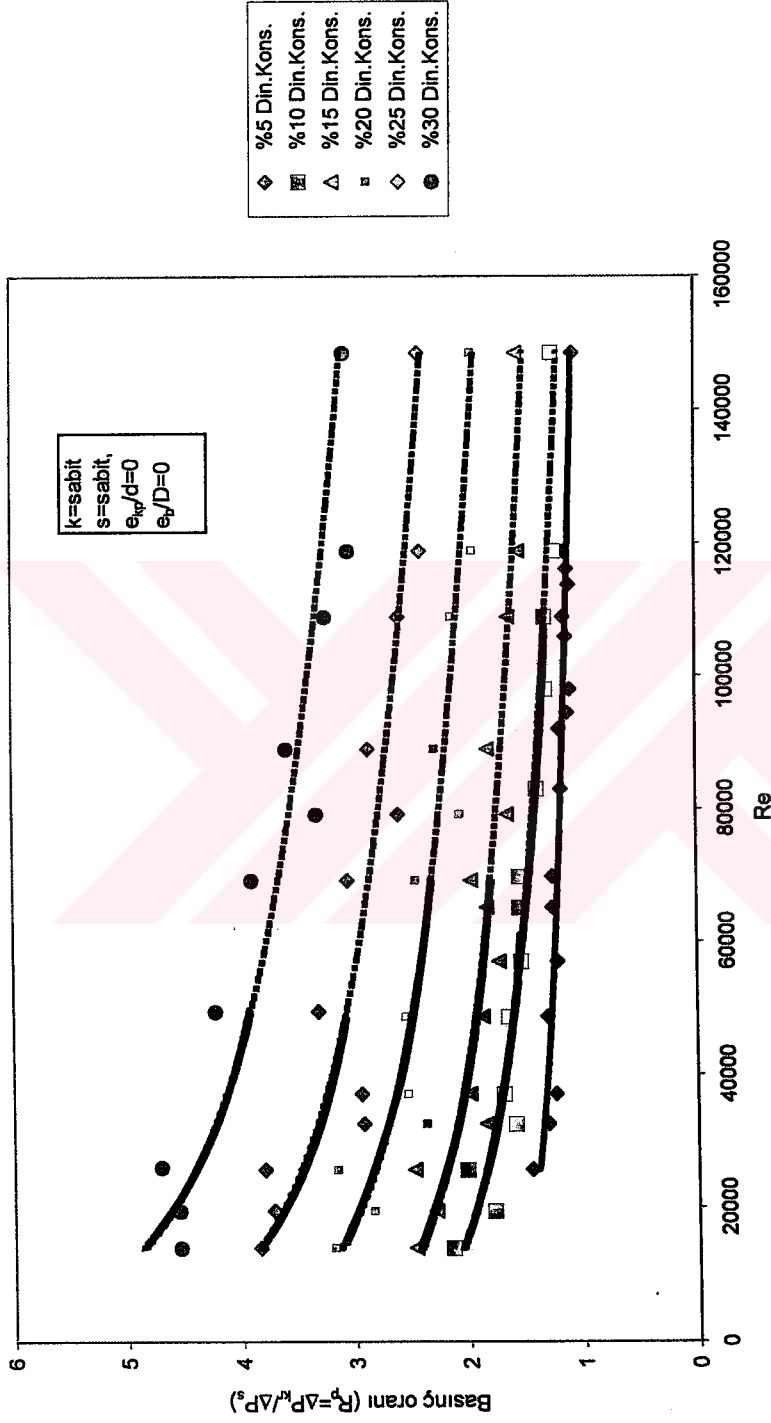
12) Darcy-Weisbach denklemi temel alınarak,  $2.5 \times 10^4 < Re < 1.5 \times 10^5$  aralığında (kapsüllü akışta) deneysel  $(\Delta P)_{kr}$  değerlerine göre ortalama %3.37'lik sapma ile aşağıdaki ifade (deneysel bulgu ifadesi) geliştirilmiştir.

$$(\Delta P)_{kr} = \lambda \frac{L}{D} \rho_{kr} \frac{V_{ort}^2}{2} (1 + C_{st})^{2.88} \left(1 + \frac{d}{D}\right)^{-0.02} \quad (9.5)$$

13) Kapsüllü akışta değişik akış şartlarında, deneysel bulgu ifadesi ile hesaplanacak basınç düşüşü değerleri,  $2.5 \times 10^4 < Re < 1.5 \times 10^5$  aralığında gerçek değerlerden ortalama %3.37 sapma göstermektedir (maks. sapma %4.96 min. sapma %1.70).

14) Akış hızının  $Re > 1.5 \times 10^5$  olduğu durumlarda kapsüller boru eksenine doğru hareket edeceklerinden, kapsüllü akışta oluşacak basınç düşüşü artışı azalacak homojen akış şartlarındaki basınç düşüşlerine yaklaşacaktır. Kapsüller tam eksende hareket ettiğinde (kapsüllerin akması durumu), dönme momentleri hiç oluşmayacağından, basınç düşüşleri homojen akış değeri olacaktır. Bu nedenle  $Re > 1.5 \times 10^5$  hız değerinden sonra extrapolasyona gidilmemesi öngörülmektedir (Şekil 9.4).

15) Eşitlik 9.5 (Şekil 9.4 ve 9.5'te noktalı çizgi ile gösterilen kısım) ve deneysel bulgular (Şekil 9.4 ve 9.5'te düz çizgi ile gösterilen kısım) dikkate alınarak bulunan grafikler boyutsuz sayılar kullanılarak oluşturulmuştur. Kapsül Froude sayısı etkisiz kabul edilmiş, bağıl yoğunluk, çap oranı, boru ve kapsül bağıl pürüzlülükleri sabit alınmıştır.



Şekil 9-5 Eşitlik 9.5 ve deneysel bulgular dikkate alınarak bulunan  $R_p$ -  $Re_s$  değişimi

### 9.1 Bu Alanda Yapılabilecek Diğer Çalışmalar ve Öneriler

- 1) Su yoğunluğundaki küresel kapsül trenlerinin akış karakteristiği ve akış parametreleri incelenebilir. Böylece kapsül treninin sadece kayma anındaki davranışları ve buna bağlı basınç düşüşleri bulunur.
- 2) Su yoğunluğundan daha düşük yoğunluktaki küresel kapsül treni akışında, bağlantı elemanlarının (değişik yarıçaplı dirsek) kayıp katsayıları araştırılabilir.
- 3) Su yoğunluğundan daha düşük yoğunluktaki küresel kapsül treni akışında değişik çap oranları ( $d/D$ ) için basınç düşüşünü minimum yapan akış şartları araştırılabilir.
- 4) Değişik akım şartlarında, akış parametreleri ve akış karakteristikleri kapsül yoğunluğuna göre incelenebilir.
- 5) Eğimli borular içinde, aşağı ya da yukarıya doğru olan akışlarda sistem karakteristiği araştırılabilir.
- 6) Gerçek buz kapsülleri oluşturularak, sistemden çevreye olan ısı transferi miktarı araştırılabilir. Küresel buz kapsül treninin bağlantı elemanlarından geçişi ve akış rejimleri incelenebilir.
- 7) Farklı çap oranlarında, akış özellikleri belirlenebilir.
- 8) Uygun paket programlarla analizler yapılabilir.

**KAYNAKLAR**

Advantech, Solution Guide, IA Vol.81

Agarwal V.C., Singh M.K., Mathur R., (2001), "Empirical Relation for the Effect of the Shape of the Capsules and the Nose Shape on the Velocity Ratio of Heavy Density Capsules in a Hydraulic Pipeline", Proc. Instn., Mech., Engrs., 215 Part E:147-155

Agarwal, V.C. ve Mishra, R., (1998), "Optimal Design of a Multi-Stage Capsule Handling Multi-Phase Pipeline", International Journal of Pressure Vessels and Piping, 75:27-35.

Andersson, V., (1997), Ice-Water Slurry Flow: A Literature Review, Norwegian University of Science and Technology, Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics, Trondheim, Norway.

Button, B.L. ve Ma, T.H., (1975), "Hydraulic Transport of Single Spheres in a Horizontal Pipe", Journal of Fluids Engineering, 97:243-245.

Cheng C.H., Chang M.H., (2003), "Shape Identification for Water-Ice Interface within the Cylindrical Capsule in Cold Storage System by Inverse Heat Transfer Method", International Journal of Refrigeration, 26:543-550

Chow, K.W., (1979), An Experimental Study of the Hydrodynamic Transport of Spherical and Cylindrical Capsules in a Vertical Pipeline, Master Thesis, Mc Master University, Canada.

Çetinkaya, N.M., (1984), Borularda Katı-Sıvı Karışımı Akımlarında Yük Kayıplarının Belirlenmesi, Yük. Lisans Tezi, İ.T.Ü., İstanbul.

Çeçen, K., Bayazıt, M., Sümer, M. ve Avcı, İ., (1976), Boru Hatlarının Teknik ve İşletme Karakteristikleri, Altyapı Maliyeti ve İşletme Giderleri, Ulaştırma Bakanlığı, Ulaştırma Koordinasyonu İdaresi (Yayın No:199.088), İstanbul.

Du H., Nair S.S., (2002), "Dynamics of a Large Scale Hydraulic Capsule Pipeline System", Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 124:191-195

Edis K., Karadoğan H., (1992), Akışkanlar Mekaniği Ders Notları, İ.T.Ü. Makine Fakültesi, İstanbul

Ellis, H.S., (1964a), "The Pipeline Flow of Capsules-Part 3-An Experimental Investigation of the Transport by Water of Single Cylindrical and Spherical Capsules with Density Equal to that of the Water", The Canadian Journal of Chemical Engineering, 42:1-8.

Ellis, H.S., (1964b), "The Pipeline Flow of Capsules-Part 5-An Experimental Investigation of the Transport by Water of Single Spherical Capsules with Density Greater than that of the Water", The Canadian Journal of Chemical Engineering, 42:155-161.

Ellis, H.S. ve Bolt, L.H., (1964), "The Pipeline Flow of Capsules-Part 7-An Experimental Investigation of the Transport by Two Oils of Single Cylindrical and Spherical Capsules with Density Equal to that of the Oil", The Canadian Journal of Chemical Engineering, 42:201-210.

Ellis, H.S. ve Kruyer, J., (1974), "Minimizing the Pressure Gradients in Capsule Pipelines", The Canadian Journal of Chemical Engineering, 52:457-462.

Ellis, H.S., Kruyer, J. ve Roehl, A.A., (1975), "The Hydrodynamics of Spherical Capsules",



The Canadian Journal of Chemical Engineering, 53:119-125.

Feng, J., Huang, P.Y. ve Joseph, D.D., (1995), "Dynamic Simulation of the Motion of Capsules in Pipelines", Journal of Fluid Mechanics, 286:201-227.

Gao B.X., Liu H., (2000), "Predicting Incipient Velocity of Capsules in Pipe", Journal of Hydraulic Engineering, June, 470-473

Garg, V.K., (1977), "Capsule Pipelining – An Improved Theoretical Analysis", Journal of Fluids Engineering, 99:763-771.

Genceli, O.F., (2000), Ölçme Tekniği, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Govier, G.W. ve Aziz, K., (1972), The Flow of Complex Mixtures in Pipes, Van Nostrand Reinhold Company, Canada.

Hochmuth, R.M. ve Sutera, S.P., (1970), "Spherical Caps in Low Reynolds Number Tube Flow", Chemical Engineering Science, 25:593-604.

Holman, J.P., (1994), Experimental Methods for Engineers, Mc Graw Hill International Editions, Singapore.

Kawada, Y., Takizawa, S. ve Shirakashi, M., (1997), "Characteristics of Ice-Water Mixture Flow in a Branching Pipe and Development of an Ice Fraction Control Technique", Snow Engineering: Recent Advances, A.A. Balkema, 1997, Rotterdam, 473-476.

Kawada, Y., Tsukada, Y., Kobayashi, M. ve Shirakashi, M., (1998), "Measurement of Properties of Ice Particles in Water Affecting Ice-Water Mixture Flow in Pipes", Proceedings of 4th KSME-JSME Fluids Engineering Conference, 18-21 October 1998, Pusan, Korea, 373-376.

Kawada, Y., Shirakashi, M. ve Yamada, S., (1999), "Flow Characteristics of Ice-Water Slurry in a Horizontal Circular Pipe", Proceedings of the 3rd ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conference, 18-23 July 1999, San Francisco, California, 1-5.

Kroonenberg, H.H., (1978), "A Mathematical Model for Concentric Horizontal Capsule Transport", The Canadian Journal of Chemical Engineering, 56:538-543.

Kruyer, J. ve Ellis, H.S., (1974), "Predicting the Required Liquid Throughput from the Capsule Velocity and Capsule Pressure Gradient in Capsule Pipelines", The Canadian Journal of Chemical Engineering, 52:215-221.

Latto, B., Round, G.F. ve Anzenavs, R., (1973), "Drag Coefficients and Pressure Drops for Hydrodynamically Suspended Spheres in a Vertical Tube with and without Polymer Addition", The Canadian Journal of Chemical Engineering, 51:536-541.

Latto, B. ve Lee, S.W., (1978), "The Drag and Pressure Drops for Hydrodynamically Suspended Cylinders in a Vertical Tube with and without Polymer Addition", The Canadian Journal of Chemical Engineering, 56:304-309.

Myska, J. ve Vlasak, P., (1983), "The Dependence of Coefficients in the Relation of Velocity Ratio on Parameters of a Capsule", Chemical Engineering Science, 38:547-555.

Özgür, C., (1998), Hidrolik ve Pnömatik Transport Ders Notları, İ.T.Ü. Makina Fakültesi, İstanbul.

Round, G.F. ve Bolt, L.H., (1965), "The Pipeline Flow of Capsules-Part 8-An Experimental

Investigation of the Transport in Oil of Single, Denser than Oil, Spherical and Cylindrical Capsules”, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 43:197-205.

Sellgren, A., (1986), “Hydraulic Behaviour of Ice Particles in Water”, 10th International Conference on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes, *Hydrotransport 10*, 29-31 October 1986, Innsbruck, Austria, 213-217.

Shook, C.A., (1985), “Experiments with Concentrated Slurries of Particles with Densities Near that of the Carrier Fluid”, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 63:861-869.

Snoek, C.W., Walosik, S. ve Gupta, R.P., (1993), “Ice Slurry Transport for District Cooling Networks”, *Hydrotransport 12*, 28-30 September 1993, Brugge, Belgium, 511-524.

Takahashi, H., Masuyama, T. ve Kawashima, T., (1991), “Flow Properties for Slurries of Particles with Densities Close to that of Water”, *Proceedings of the 1st ASME-JSME Fluid Engineering Conference, Liquid-Solid Flows, FED*, 118:103-108.

Vlasak, P., (1999), “An Experimental Investigation of Capsules of Anomalous Shape Conveyed by Liquid in a Pipe”, *Powder Technology*, 104:207-213.

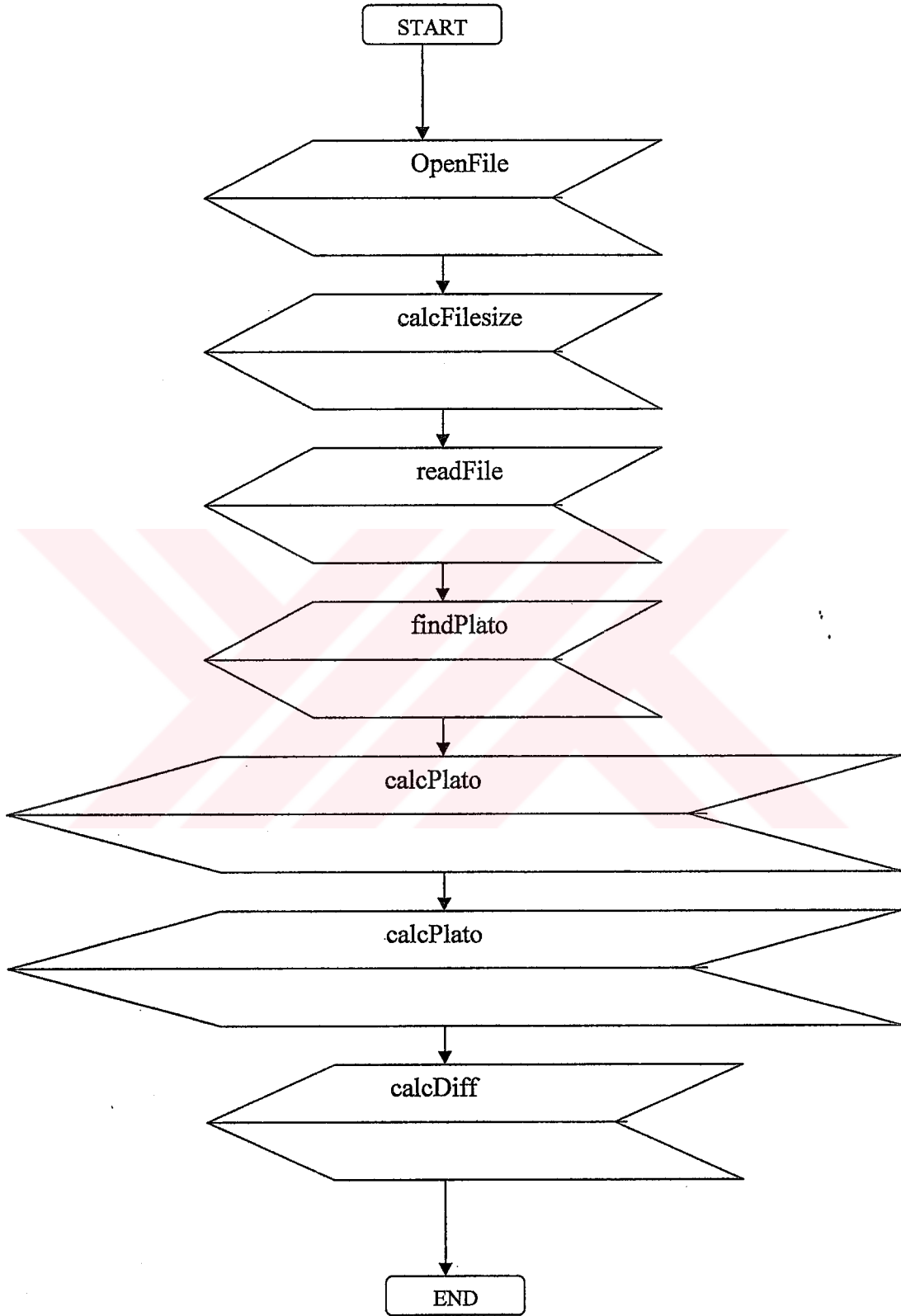
Yanaiida, K. ve Tanaka, M., (1997), “Drag Coefficient of a Capsule Inside a Vertical Angular Pipe”, *Powder Technology*, 94:239-243.

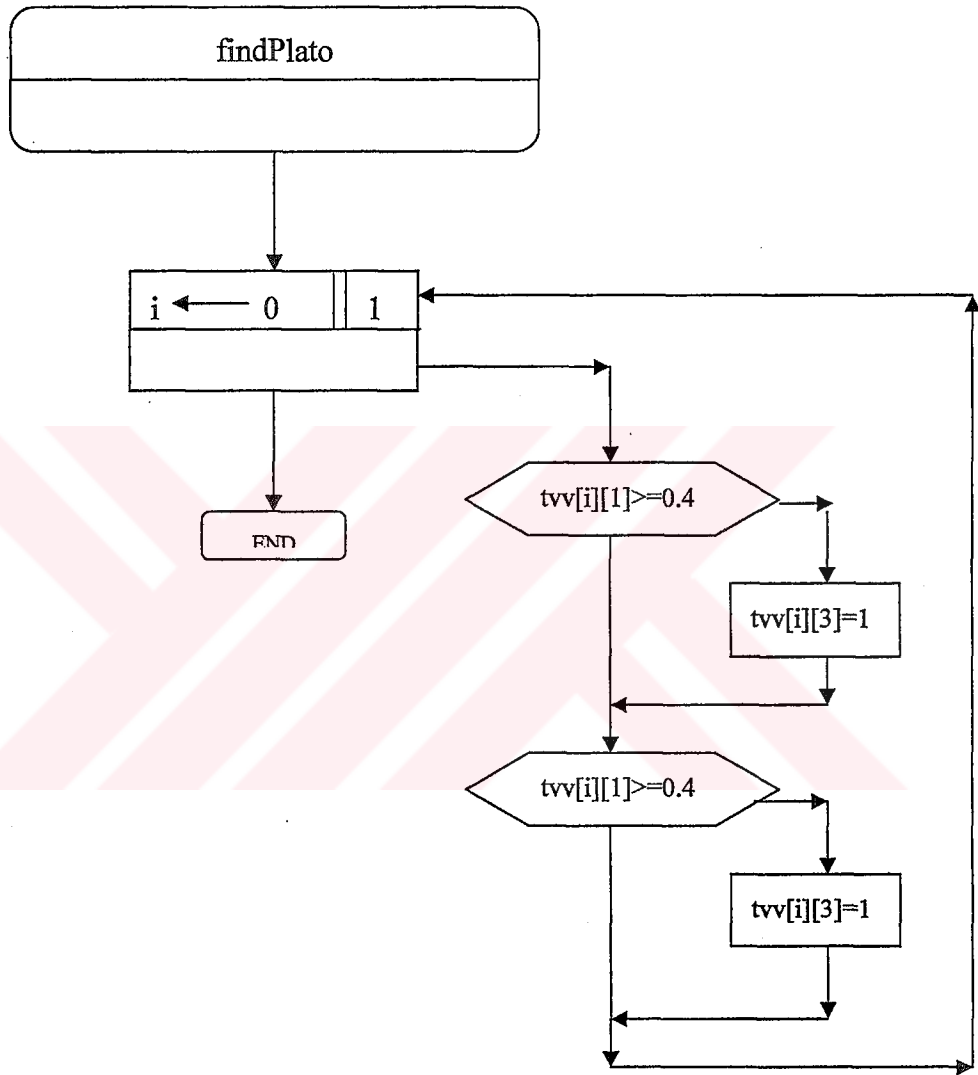
Zandi, I., (1971), *Advances in Solid-Liquid Flow in Pipes and Its Application*, Pergamon Press, New York.

**EKLER**

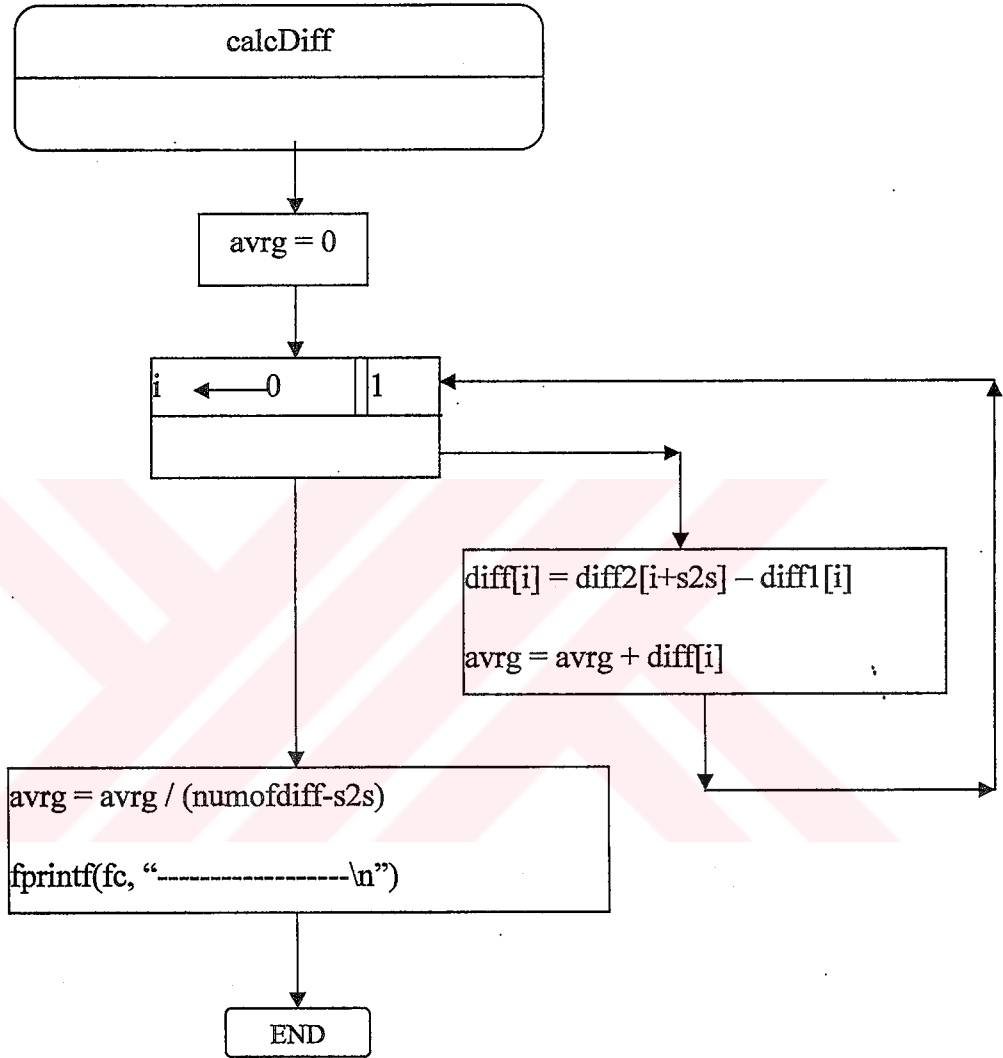
- Ek 1 Sensör Sinyal Değerlendirilmesinde Kullanılan Bilgisayar Programının Akışı
- Ek 2 Sensör Sinyal Değerlendirilmesinde Kullanılan Bilgisayar Programı
- Ek 3 Durand-Condolios İfadesi İle Birim Boydaki Basınç Düşüşleri
- Ek 4 Hayden-Stelson İfadesi İle Birim Boydaki Basınç Düşüşleri
- Ek 5 Newitt İfadesi İle Birim Boydaki Basınç Düşüşleri
- Ek 6 Zandi-Govatos İfadesi İle Birim Boydaki Basınç Düşüşleri
- Ek 7 Govier-Aziz İfadesi İle Birim Boydaki Basınç Düşüşleri
- Ek 8 Agarwal İfadesi İle Birim Boydaki Basınç Düşüşleri



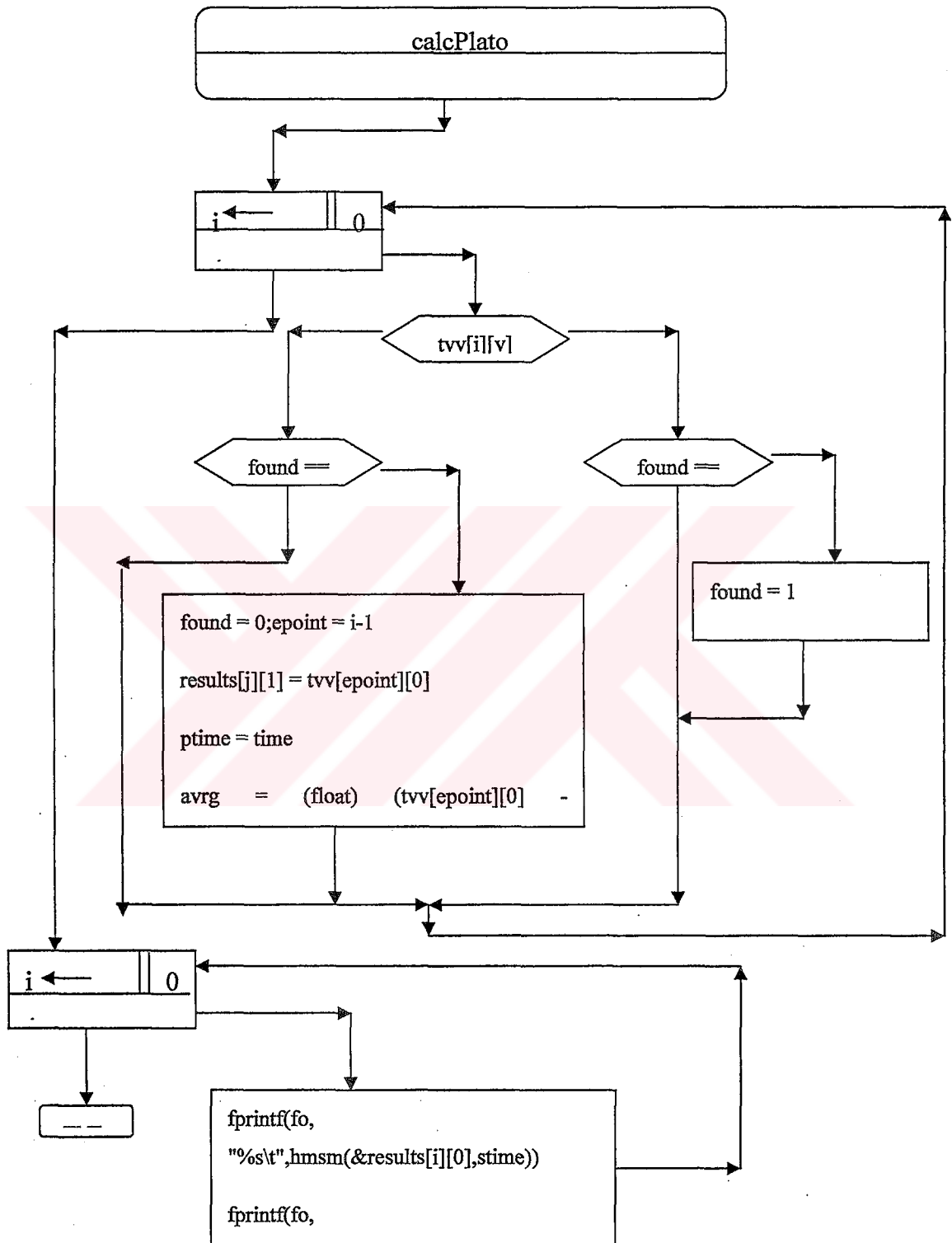
**Ek 1 Sensör Sinyal Değerlendirilmesinde Kullanılan Bilgisayar Programının Akışı**



(Bilgisayar programı akışının açılımı-1)



(Bilgisayar programı akışının açılımı-2)



(Bilgisayar programı akışının açılımı-3)

**Ek 2 Sensör Sinyal Değerlendirilmesinde Kullanılan Bilgisayar Programı**

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#define COLSIZE 7
#define LIMIT 4.0
FILE *openFile (char *, char *);
void readFile (FILE *, int, float **);
int convertMsec(int, int, int, int);
int calcFilesize (FILE *);
void printMatrix (float **, int);
void findPlato (float **, int);
void calcPlato (float **, int, int, FILE *, float *, int *, float *, float *);
char *hmsm (float *, char *);
void calcDiff(FILE *, float *, float *, int, int);
int main ( int argc, char *argv[] ) {
int s2s;
int i,numoflines,numofdiff,fnsiz;
float **tvv;
float *diff1, *diff2;
float stime1,stime2;
float ltime1,ltime2;
char *ofn1, *ofn2, *ofn3;
char *ofnex1="s1t2.txt";
char *ofnex2="s2t2.txt";
char *ofnex3="t1.txt";
FILE *fi,*fo,*fb, *fc;
fnsiz = strlen(argv[1]);
ofn1 = calloc(sizeof(char), fnsiz+4);
ofn2 = calloc(sizeof(char), fnsiz+4);
ofn3 = calloc(sizeof(char), fnsiz+2);
```



```

strncpy(ofn1,argv[1],fnsz-4);
strcpy((ofn1+fnsz-4),ofnex1);
printf("Output file name for sensor one : %s \n",ofn1);
strncpy(ofn2,argv[1],fnsz-4);
strcpy((ofn2+fnsz-4),ofnex2);
printf("Output file name for sensor two : %s \n",ofn2);
strncpy(ofn3,argv[1],fnsz-4);
strcpy((ofn3+fnsz-4),ofnex3);
printf("Output file name for sensor d1 : %s \n",ofn3);
fi = openFile(argv[1],"r");
numoflines=calcFilesize (fi);
tvv = calloc(sizeof(int *), numoflines);
for(i=0;i<numoflines;i++)
tvv[i] = calloc(sizeof(int), COLSIZE);
printf("-> # of lines...: %d \n",numoflines);
readFile (fi,numoflines,tvv);
diff1 = calloc (sizeof(float),numoflines);
diff2 = calloc (sizeof(float),numoflines);
findPlato (tvv, numoflines);
fo = openFile(ofn1,"w");
calcPlato (tvv, numoflines, 3, fo, diff1, &numofdiff, &stime1, &ltime1);
//                                printf("first time : %f - last time : %f \n", stime1, ltime1);
fb = openFile(ofn2,"w");
calcPlato (tvv, numoflines, 4, fb, diff2, &numofdiff, &stime2, &ltime2);
//                                printf("first time : %f - last time : %f \n", stime2, ltime2);
fc = openFile(ofn3,"w");
s2s=0;
if(stime1>stime2)
s2s=1;

calcDiff(fc, diff1, diff2, numofdiff, s2s);

```

```

return 0;
}
FILE *openFile (char *fname, char *fmode) {
FILE *fi;
fi = fopen(fname,fmode);
if(fi==NULL) {
printf("Can not open file : %s !!!\n",fname);
exit(-1);
}
return fi;
}
int calcFileSize (FILE *fi) {
int i=0;
char stmp[100];
fgets(stmp, 100, fi);
while(!feof(fi)) {
i++;
fgets(stmp, 100, fi);
}
return i;
}
void readFile (FILE *fi, int numoflines, float **tvv) {
int hour,minute,second,msec,i;
float v1=0,v2=0,tmp=0;
char stmp[100];
fseek(fi,0,SEEK_SET);
for(i=0;i<numoflines;i++) {
fgets(stmp, 100, fi);
sscanf(stmp, "%d:%d:%d.%d;%f;%f;%f", &hour,&minute,&second,&msec,&tmp,&v1,&v2);
msec = convertMsec(hour, minute, second, msec);
tvv[i][0]=msec;tvv[i][1]=v1;tvv[i][2]=v2;
}
}

```

```

}
}
int convertMsec(int hour, int minute, int second, int msec) {
minute = minute + (hour*60);
second = second + (minute*60);
msec = msec + (second*100);
return msec;
}
void printMatrix (float **tvv, int numoflines) {
int i;
printf("Time\t\t Value 1\t Value 2\t P11\t\t P12\n");
printf("-----\n");
for(i=0;i<numoflines;i++)
printf("%f\t%f\t%f\t%f\t%f\n",tvv[i][0],tvv[i][1],tvv[i][2],tvv[i][3],tvv[i][4]);
}
void findPlato (float **tvv, int numoflines) {
int i;
for(i=0;i<numoflines;i++) {
if(tvv[i][1]>=0.4)
tvv[i][3]=1;
if(tvv[i][2]>=0.4)
tvv[i][4]=1;
}
}
void calcPlato (float **tvv, int numoflines, int v, FILE *fo, float *diff, int *numofdiff, float
*firsttime, float *lasttime) {
int i=0,j=0,found=0;
int spoint=0,epoint=0;
float avrg=0;
float time=0,ptime=0;
float **results;

```

```

char *stime = calloc (sizeof(char),12);
results = calloc(sizeof(float *),1);
results[0] = calloc(sizeof(float),5);
for(i=0;i<numoflines;i++) {
if(tv[v][i]==1) {
if (found == 0) {
found = 1;spoint = i;
results[j][0] = tvv[spoint][0];
}
}
else {
if (found == 1) {
found = 0;epoint = i-1;
results[j][1] = tvv[epoint][0]; ptime = time;
avrg = (float) (tvv[epoint][0] - tvv[spoint][0])/2;
time = tvv[spoint][0]+avrg;
results[j][2] = avrg; results[j][3] = time; results[j][4] = time-ptime;
j++;
results = realloc(results, sizeof(float *)*(j+1));
results[j] = calloc(sizeof(float),5);
}
}
}
avrg = 0;
fprintf(fo,"Start Time\t End Time\t Average \t Avrg. Time\t #t1\n");
for(i=0;i<j;i++) {
fprintf(fo, "%s\t",hmsm(&results[i][0],stime));
fprintf(fo, "%s\t",hmsm(&results[i][1],stime));
fprintf(fo, "%s\t",hmsm(&results[i][2],stime));
fprintf(fo, "%f\t",results[i][3]);
fprintf(fo, "%s\n",hmsm(&results[i][4],stime));
}
}

```

```

diff[i] = results[i][3];
avrg = avrg + results[i][4];
}
*firsttime = results[0][0];
*lasttime = results[j-1][0];
*numofdiff = j;
avrg = avrg - results[0][4];
avrg = avrg / (j-1);
fprintf(fo,"Average.....: %f sn\n",avrg/100);
}
char *hmsm (float *mSec, char *time) {
int msec=0,sec=0,min=0,hour=0;
sec = (int) *mSec / 100;
msec = (int) *mSec - sec*100;
min = sec / 60;
sec = sec - min*60;
hour = min / 60;
min = min - hour*60;
sprintf(time, "00:00:00:00");
sprintf(time, "%02d:%02d:%02d:%02d",hour,min,sec,msec);
return time;
}
void calcDiff (FILE *fc, float *diff1, float *diff2, int numofdiff, int s2s) {
int i;
float avrg;
float *diff = calloc (sizeof(float), numofdiff);
char *stime = calloc (sizeof(char),12);
avrg = 0.0;
for (i=0;i<numofdiff-s2s;i++) {
diff[i] = diff2[i+s2s] - diff1[i];
avrg = avrg + diff[i];
}
}

```

```
fprintf(fc,"%f sn\n",diff[i]/100);  
}  
avrg = avrg / (numofdiff-s2s);  
fprintf(fc, "-----\n");  
fprintf(fc, "Average...: %f sn\n",avrg/100);  
}
```



**Ek 3 Durand-Condolios İfadesi İle Birim Boydaki Basınç Düşüşleri**

D (m)	d (m)	$(C_D)^{1/2}$	$V_o$ (m/s)	s-1	g (m/s <sup>2</sup> )	$V_{kr}$ (m/s)	$C_{din}$	$i_s$ (Pa/m)	$i_{kr}$ (Pa/m)
0,1	0,08	0,6633	0,55	0,13	9,81	0,2724	0,05	6,5237	210,5960
0,1	0,08	0,6633	0,55	0,13	9,81	0,3468	0,05	12,7702	206,3563
0,1	0,08	0,6633	0,55	0,13	9,81	0,3944	0,05	16,0484	181,4488
0,1	0,08	0,6633	0,55	0,13	9,81	0,5169	0,05	23,5528	131,3825
0,1	0,08	0,6633	0,55	0,13	9,81	0,6091	0,05	33,2520	126,2913
0,1	0,08	0,6633	0,55	0,13	9,81	0,6907	0,05	43,3820	126,6267
0,1	0,08	0,6633	0,55	0,13	9,81	0,7427	0,05	46,6529	118,6564
0,1	0,08	0,6633	0,55	0,13	9,81	0,8814	0,05	70,4081	135,4238
0,1	0,08	0,6633	0,55	0,13	9,81	1,0055	0,05	90,8460	147,3494
0,1	0,08	0,6633	0,55	0,13	9,81	1,0405	0,05	104,2955	162,8357
0,1	0,08	0,6633	0,55	0,13	9,81	1,1232	0,05	125,4405	181,4138
0,1	0,08	0,6633	0,55	0,13	9,81	1,1522	0,05	127,0738	179,6014
0,1	0,08	0,6633	0,55	0,13	9,81	1,2068	0,05	140,5037	191,0509
0,1	0,08	0,6633	0,55	0,13	9,81	1,2330	0,05	156,1700	208,8473
0,1	0,08	0,6633	0,55	0,13	9,81	1,2597	0,05	158,1151	208,1286
0,1	0,08	0,6633	0,55	0,13	9,81	1,5745	0,05	231,3066	268,7758

**Ek 4 Hayden-Stelson İfadesi İle Birim Boydaki Basınç Düşüşleri**

D (m)	d (m)	C <sub>D</sub>	V <sub>o</sub> (m/s)	s-1	g (m/s <sup>2</sup> )	V <sub>kr</sub> (m/s)	C <sub>din</sub>	i <sub>s</sub> (Pa/m)	i <sub>kr</sub> (Pa/m)
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	0,2724	0,05	6,5237	140,4179
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	0,3468	0,05	12,7702	152,6647
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	0,3944	0,05	16,0484	141,8848
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	0,5169	0,05	23,5528	114,9633
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	0,6091	0,05	33,2520	117,4762
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	0,6907	0,05	43,3820	122,6261
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	0,7427	0,05	46,6529	117,2154
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	0,8814	0,05	70,4081	138,6392
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	1,0055	0,05	90,8460	153,3520
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	1,0405	0,05	104,2955	169,9472
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	1,1232	0,05	125,4405	190,1635
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	1,1522	0,05	127,0738	188,4350
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	1,2068	0,05	140,5037	200,6551
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	1,2330	0,05	156,1700	219,3972
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	1,2597	0,05	158,1151	218,6616
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	1,5745	0,05	231,3066	280,9003



**Ek 5 Newitt İfadesi İle Birim Boydaki Basınç Düşüşleri**

D (m)	d (m)	C <sub>D</sub>	V <sub>o</sub> (m/s)	s-1	g (m/s <sup>2</sup> )	V <sub>kr</sub> (m/s)	C <sub>din</sub>	i <sub>s</sub> (Pa/m)	i <sub>kr</sub> (Pa/m)
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	0,2724	0,05	6,5237	1251,6318
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	0,3468	0,05	12,7702	1193,8984
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	0,3944	0,05	16,0484	1025,2070
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	0,5169	0,05	23,5528	681,4549
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	0,6091	0,05	33,2520	600,9134
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	0,6907	0,05	43,3820	551,2832
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	0,7427	0,05	46,6529	485,9683
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	0,8814	0,05	70,4081	467,0889
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	1,0055	0,05	90,8460	435,5905
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	1,0405	0,05	104,2955	461,4672
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	1,1232	0,05	125,4405	466,9510
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	1,1522	0,05	127,0738	447,5607
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	1,2068	0,05	140,5037	448,9075
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	1,2330	0,05	156,1700	477,5703
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	1,2597	0,05	158,1151	463,2626
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	1,5745	0,05	231,3066	459,9179

Ek 6 Zandi-Govatos İfadesi İle Birim Boydaki Basınç Düşüşleri

D (m)	D (m)	C <sub>D</sub>	V <sub>o</sub> (m/s)	s-1	g (m/s <sup>2</sup> )	V <sub>kr</sub> (m/s)	C <sub>din</sub>	N <sub>j</sub>	C.N <sub>j</sub>	i <sub>s</sub> (Pa/m)	i <sub>kr</sub> (Pa/m)
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	0,2724	0,05	2,5601	0,1280	6,5237	4833,5020
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	0,3468	0,05	4,1495	0,2075	12,7702	3733,0484
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	0,3944	0,05	5,3668	0,2683	16,0484	2861,8201
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	0,5169	0,05	9,2184	0,4609	23,5528	1493,7581
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	0,6091	0,05	12,8002	0,6400	33,2520	1134,8004
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	0,6907	0,05	16,4596	0,8230	43,3820	927,9611
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	0,7427	0,05	19,0312	0,9516	46,6529	765,4780
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	0,8814	0,05	26,8032	1,3402	70,4081	630,6024
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	1,0055	0,05	34,8822	1,7441	90,8460	525,5515
0,1	0,08	0,44	0,55	0,13	9,81	1,0405	0,05	37,3529	1,8676	104,2955	541,6114

**Ek 7 Govier-Aziz İfadesi İle Birim Boydaki Basınç Düşüşleri**

D	d	$\rho_{kr}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$V_{ort}$ (m/s)	Re	f	$\Delta H$ (mSS)	$i_{kr}$ (Pa/m)
0,1	0,08	994,24	1000	0,000001	0,2724	27240	0,00588	0,0034674	8,5038
0,1	0,08	994,24	1000	0,000001	0,3468	34680	0,00555	0,0053092	13,0209
0,1	0,08	994,24	1000	0,000001	0,3944	39440	0,00545	0,0067430	16,5371
0,1	0,08	994,24	1000	0,000001	0,5169	51690	0,00513	0,0108915	26,7114
0,1	0,08	994,24	1000	0,000001	0,6091	60910	0,00488	0,0143858	35,2811
0,1	0,08	994,24	1000	0,000001	0,6907	69070	0,00480	0,0182138	44,6694
0,1	0,08	994,24	1000	0,000001	0,7427	74270	0,00475	0,0208402	51,1106
0,1	0,08	994,24	1000	0,000001	0,8814	88140	0,00455	0,0281150	68,9521
0,1	0,08	994,24	1000	0,000001	1,0055	100550	0,00450	0,0361874	88,7497
0,1	0,08	994,24	1000	0,000001	1,0405	104050	0,00445	0,0383200	93,9798
0,1	0,08	994,24	1000	0,000001	1,1232	112320	0,00413	0,0413923	101,5146
0,1	0,08	994,24	1000	0,000001	1,1522	115220	0,00405	0,0427653	104,8820
0,1	0,08	994,24	1000	0,000001	1,2068	120680	0,00400	0,0463353	113,6373
0,1	0,08	994,24	1000	0,000001	1,2330	123300	0,00398	0,0480667	117,8836
0,1	0,08	994,24	1000	0,000001	1,2597	125970	0,00395	0,0498554	122,2705
0,1	0,08	994,24	1000	0,000001	1,5745	157450	0,00393	0,0773938	189,8083

%5 Dinamik kapsül konsantrasyonu için, karışım yoğunluğu hesabında Eşitlik 6.24 kullanılmıştır.

**Ek 8 Agarwal İfadesi İle Birim Boydaki Basınc Düşüşleri**

D	d	$\rho_{kr}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu$ (Ns/m <sup>2</sup> )	$V_{ort}$ (m/s)	Re	f	$\Delta H$ (mSS)	$i_{kr}$ (Pa/m)
0,1	0,08	994,24	1000	0,001003	0,2724	27002	0,061491	0,0093	22,8138
0,1	0,08	994,24	1000	0,001003	0,3468	34377	0,060595	0,0580	142,1637
0,1	0,08	994,24	1000	0,001003	0,3944	39096	0,060140	0,0744	182,4860
0,1	0,08	994,24	1000	0,001003	0,5169	51239	0,059230	0,1259	308,7074
0,1	0,08	994,24	1000	0,001003	0,6091	60378	0,058708	0,1732	424,8772
0,1	0,08	994,24	1000	0,001003	0,6907	68467	0,058322	0,2213	542,7534
0,1	0,08	994,24	1000	0,001003	0,7427	73621	0,058105	0,2549	625,2169
0,1	0,08	994,24	1000	0,001003	0,8814	87370	0,057608	0,3560	873,0168
0,1	0,08	994,24	1000	0,001003	1,0055	99672	0,057241	0,4603	1128,9136
0,1	0,08	994,24	1000	0,001003	1,0405	103141	0,057147	0,4921	1206,8990
0,1	0,08	994,24	1000	0,001003	1,1232	111339	0,056941	0,5714	1401,3042
0,1	0,08	994,24	1000	0,001003	1,1522	114214	0,056874	0,6005	1472,8438
0,1	0,08	994,24	1000	0,001003	1,2068	119626	0,056752	0,6574	1612,2745
0,1	0,08	994,24	1000	0,001003	1,2330	122223	0,056695	0,6856	1681,3764
0,1	0,08	994,24	1000	0,001003	1,2597	124870	0,056640	0,7149	1753,2607
0,1	0,08	994,24	1000	0,001003	1,5745	156075	0,056078	1,1058	2711,8639

%5 Dinamik kapsül konsantrasyonu için, karışım yoğunluğu hesabında Eşitlik 6.24 kullanılmıştır.

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	28.01.1970	
Doğum yeri	Balıkesir	
Lise	1984-1987	Balıkesir Lisesi
Lisans	1987-1991	Uludağ Üniversitesi Balıkesir Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Isı Proses Programı
Yüksek Lisans	1991-1994	Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalı, Isı Proses Programı
Doktora	1996-2003	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalı, Isı Proses Programı

**Çalıştığı kurumlar**

1992-1994	Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fak. Makine Mühendisliği Bölümü
1994-Devam ed.	Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fak. Makine Mühendisliği Bölümü