

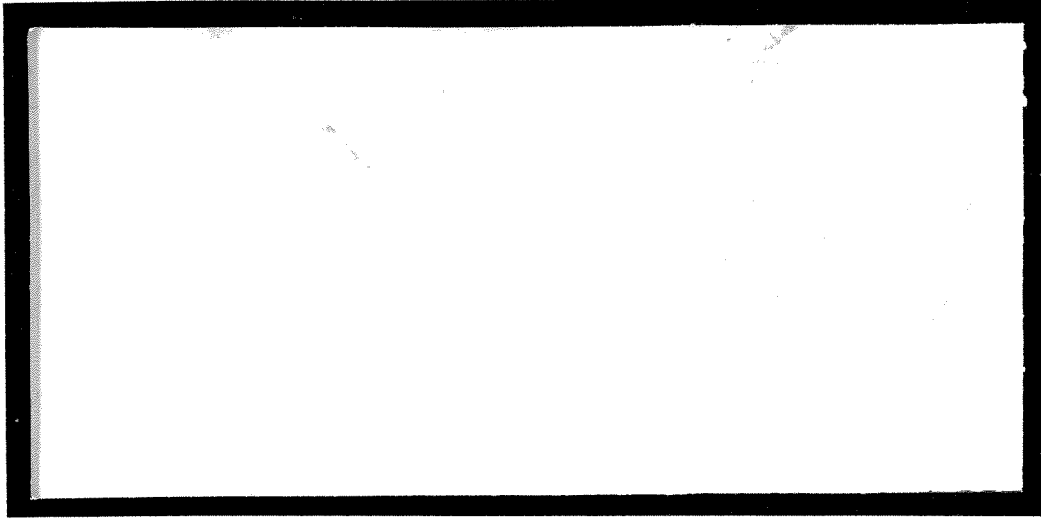
2004-444

DMP



TÜRKİYE BİLİMSEL VE
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY



**Makina, Kimyasal Teknolojiler, Malzeme ve İmalat Sistemleri
Araştırma Grubu**

**Mechanical Engineering, Chemical Technologies, Material
Sciences and Manufacturing Systems Research Grant
Committee**

**İKİ FAZLI KATI-SIVI AKIŞLARIN
HİDRODİNAMİK AÇIDAN
İNCELENMESİ
PROJE NO: MİSAG-226**

**Prof. Dr. TÜLAY A. ÖZBELGE
GÜLDEN CAMÇI**

**Eylül 2004
ANKARA**

ÖNSÖZ

Bu proje çalışması, TÜBİTAK (Proje No: MİSAG-226) ve ODTÜ-AFP (Proje No: BAP-2003-07-02-00-104) tarafından desteklenmiştir. Projenin tamamlanması için gerekli olan ekonomik desteği sağladığından dolayı her iki kuruma da teşekkür ederiz. Yüksek lisans öğrencisi olarak bu proje kapsamında tez çalışmasını yapmış olan Gülden Camçı'ya da TÜBİTAK'ın MİSAG-226 No'lu proje bütçesinden sağladığı maddi destek için de teşekkürlerimizi sunarız. Ayrıca, yapılan çalışmada kullanılan katı maddeyi (feldspat) ücretsiz olarak sağlayan Çanakkale Seramik Firması'na; deneylerde kullanılan manometre sıvılarını sağlayan ODTÜ Kömür Araştırma Laboratuvarı çalışanlarına; deney düzeneğinin kurulması ve teknik aksaklıkların giderilmesindeki özverili çalışmalarından dolayı ODTÜ Kimya Mühendisliği Atölyesi görevlilerine; eğik manometrelerin eğim açısını hassas bir şekilde seviye belirleme aleti (nivo) ile ayarlamamıza yardımcı olan ODTÜ İnşaat Mühendisliği Öğretim Görevlilerinden Sayın Bahattin Coşkun'a teşekkürlerimizi sunarız.

TÜBİTAK MİSAG-226 No'lu proje kapsamında, araştırmacı tez öğrencisi Gülden Camçı 'Application of Isokinetic Sampling Technique for Local Solid Densities in Upward Liquid-Solid Flows Through an Annulus' konulu Yüksek Lisans tezini tamamlamıştır (Eylül, 2003). Ayrıca tezini bitirdikten sonra proje raporu ile ilgili çalışmalarına devam etmiş ve tez danışmanı Prof. Dr. Tülay A. Özbelge ile birlikte yazdığı 'Determination of Local Solid Densities in Upflow of Dilute Slurries through Vertical Annulus Section of a Closed-Loop System by Isokinetic Sampling Technique' adlı makale Chemical Engineering Communications adlı mecmuada yayınlanmak üzere derginin editörüne gönderilmiştir.

SEMBOLLER

- A_{ann} : Annulus'un akış alanı, m^2
 A_p : Örnekleme sondasının akış alanı, m^2
BKB : Başlangıç katı besleme konsantrasyonu, % hacim/hacim
BRU : Boyutsuz radyal uzaklık
 C_o : Orifis metre katsayısı
 D_e : Annulus'un hidrolik (eş) çapı, m
 d_p : Ortalama parçacık çapı, μm
ESHB: Eksenel sürtünmeli hidrodinamik basınç
LKF : Lokal katı-faz
 f : Sürtünme katsayısı
 f_c : Korelasyondan hesaplanan sürtünme katsayısı
 f_e : Basınç kaybı verisinden hesaplanan deneysel sürtünme katsayısı
 f_m : Sıvı-katı karışımı için sürtünme katsayısı
 f_w : Su için sürtünme katsayısı
 g : Yerçekimi ivmesi, m^2/s
 h : Simpson kuralı için aralık genişliği, m
 ΔH : Manometre diferansiyeli, m
 ΔH_{CCl_4} : Manometre diferansiyeli (karbonteraklorür için), m
 ΔH_{Hg} : Manometre diferansiyeli (cıva için), m
 ΔH_{im} : Manometre diferansiyeli (eğik manometre için), m
 ID_p : Örnekleme sondasının iç çapı, m
 ID_1 : Annulus'un dış borusunun iç çapı, m
 ID_2 : Annulus'un iç borusunun iç çapı, m
 K : Pitot tüp katsayısı
 L : Test bölgesinin uzunluğu, m
LSD : LKF yoğunluğu, kg/m^3
 \dot{m} : Suyun kütleli akış hızı, kg/s
 m_w : Suyun kütlesi, kg
 N : Simpson kuralı'nda kullanılan nokta sayısı

- OD_p : Örnekleme sondasının dış çapı, m
 OD_1 : Annulus'un dış borusunun dış çapı, m
 OD_2 : Annulus'un iç borusunun dış çapı, m
 ΔP : Basınç kaybı, Pa
 ΔP_c : Korelasyondan hesaplanan aksenal basınç kaybı, Pa
 ΔP_{esh} : Durgun basıncı da içeren korelasyondan hesaplanan aksenal basınç kaybı, Pa
 ΔP_e : Deneysel aksenal basınç kaybı, Pa
 ΔP_{esh} : Durgun basıncı da içeren deneysel aksenal basınç kaybı, Pa
 ΔP_{im} : Eğik manometreden elde edilen pitot tüpteki basınç kaybı, Pa
 ΔP_{ip} : İki-faz aksenal hidrodinamik basınç kaybı, Pa
 ΔP_T : Deneysel iki-faz bileşik (hidrostatik+hidrodinamik) basınç kaybı, Pa
 ΔP_w : Su için basınç kaybı, Pa
 Q : Suyun hacımsal debisi, m³/s
 R : Boruların merkezinden alınan radyal uzaklık, m
 R_1 : İç borunun dış yarıçapı, m
 R_2 : Dış borunun iç yarıçapı, m
 Re : Reynolds sayısı
 Re_m : Sıvı-katı karışımı için Reynolds sayısı
 Re_w : Su için Reynolds sayısı
 s : Pitot tüp katsayısı için standart sapma
 s_D : LKF yoğunluğu için standart sapma
 s_v : Hız verileri için standart sapma
 t : süre, s
 T : Sıcaklık, °C
 TF : Manometre sıvısı olarak (Benzen+CCl₄) karışımı
 U_{ann} : Annulusun içindeki ortalama hız, m/s
 U_0 : Orifismetredeki hız, m/s
 U_S : Simpson kuralı kullanılarak bulunan hız, m/s
 V_L : Lokal hız, m/s
 $V(etki)$: Etkinin varyansı
 v/v : hacim/hacim, %

W_p : Katı parçacıkların ağırlığı, g

W_t : Dara, g

W_{t+s} : (Dara+feldspat), g

W_w : Suyun ağırlığı, g

W_{t+w+s} : (Dara+su+feldspat), g

Latin Semboller

α : Eğim açısı, $^{\circ}$

κ : Annulus'un iç çapının dış çapına oranı (aspect ratio)

φ_a : Laminar akışta hidrolik çap kullanmak için düzeltme faktörü (Denklem-7)

$\bar{\phi}_s$: Katı madde hacminin karışımın hacmine oranının kesit alanı üzerindeki ortalaması (hacim/hacim)

λ : Boyutsuz radyal uzaklık $(R-R_1)/(R_2-R_1)$

ρ : Yoğunluk, kg/m^3

ρ_{lf} : (Benzen+ CCl_4) karışımının yoğunluğu, kg/m^3

ρ_p : Katı parçacıkların yoğunluğu, kg/m^3

ρ_w : Suyun yoğunluğu, kg/m^3

ρ_{CCl_4} : Karbontetraklorür'ün yoğunluğu, kg/m^3

$\bar{\rho}_m$: Sıvı-katı karışımının test bölgesindeki ortalama taşınım yoğunluğu, kg/m^3

$\bar{\rho}_s$: Katı fazın test akış alanı üzerindeki ortalama yoğunluğu, kg/m^3

μ : Viskozite, Pa.s

μ_w : Suyun viskozitesi, Pa.s

$\bar{\mu}_m$: Sıvı-katı karışımının ortalama taşınım viskozitesi, Pa.s

ν : Birleştirilmiş (pooled) varyans değerleri için serbestlik derecesi (degrees of freedom)

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
SEMBOLLER	ii
İÇİNDEKİLER	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
TABLO LİSTESİ	x
ÖZET	xvii
ABSTRACT	xix
A. GİRİŞ	1
A.1. Kaynak Araştırma	2
B. GELİŞME	3
B.1. DENEYSEL ÇALIŞMA	3
B.1.a. Deney Düzenegi	4
B.1.b. Deney Parametreleri	11
B.1.c. Deney Yöntemi	12
C. SONUÇLAR ve İRDELEME	16
D. DEĞERLENDİRME	39
E. ÖNERİLER	40
KAYNAKLAR	40
EK 1. Sonuçlar ve İrdeleme’de kullanılan veriler	43
EK 2. İstatistiksel analizin sonuçları	77
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU	94

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil B.1.	Deney düzeneği	5
Şekil B.2.	Örnekleme sondası	6
Şekil B.3.	İzokinetik örnekleme ünitesinin şeması	9
Şekil B.4	İzokinetik örnekleme ünitesinin fotoğrafı	10
Şekil C.1.	Tek-faz deneyler için teorik ve deneysel hidrodinamik basınç kayıpları (ΔP_w)	19
Şekil C.2.	Tek-faz (su) deneylerinde değişik Reynolds sayılarında radyal hız dağılımları	20
Şekil C.3.a.	Parçacık büyüklüğü $d_p=72 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%1$ (v/v) olan su-felsspat karışımlarının <i>izokinetik olmayan şartlarda</i> ve değişik Reynolds sayılarında ölçülen boyutsuz radyal uzaklık parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s * 10^{-1}$)	22
Şekil C.3.b.	Parçacık büyüklüğü $d_p=72 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%1$ (v/v) olan su-felsspat karışımlarının <i>izokinetik olmayan şartlarda</i> ve değişik boyutsuz radyal uzaklıklarda ölçülen karışımın Reynolds sayısı parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s * 10^{-1}$)	22
Şekil C.4.a.	Parçacık büyüklüğü $d_p=72 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%1$ (v/v) olan su-felsspat karışımlarının <i>izokinetik şartlarda</i> ve değişik Reynolds sayılarında ölçülen boyutsuz radyal uzaklık parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s * 10^{-1}$)	23
Şekil C.4.b.	Parçacık büyüklüğü $d_p=72 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%1$ (v/v) olan su-felsspat karışımlarının <i>izokinetik şartlarda</i> ve değişik boyutsuz radyal uzaklıklarda ölçülen karışımın Reynolds sayısı parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s * 10^{-1}$)	23

- Şekil C.5.a. Parçacık büyüklüğü $d_p=72 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%2$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik olmayan şartlarda* ve değişik Reynolds sayılarında ölçülen boyutsuz radyal uzaklık parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s * 10^{-1}$) 24
- Şekil C.5.b. Parçacık büyüklüğü $d_p=72 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%2$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik olmayan şartlarda* ve değişik boyutsuz radyal uzaklıklarda ölçülen karışımın Reynolds sayısı parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s * 10^{-1}$) 25
- Şekil C.6.a. Parçacık büyüklüğü $d_p=72 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%2$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik şartlarda* ve değişik Reynolds sayılarında ölçülen boyutsuz radyal uzaklık parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s * 10^{-1}$) 25
- Şekil C.6.b. Parçacık büyüklüğü $d_p=72 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%2$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik şartlarda* ve değişik boyutsuz radyal uzaklıklarda ölçülen karışımın Reynolds sayısı parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s * 10^{-1}$) 26
- Şekil C.7.a. Parçacık büyüklüğü $d_p=138 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%1$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik olmayan şartlarda* ve değişik Reynolds sayılarında ölçülen boyutsuz radyal uzaklık parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s * 10^{-1}$) 27
- Şekil C.7.b. Parçacık büyüklüğü $d_p=138 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%1$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik olmayan şartlarda* ve değişik boyutsuz radyal uzaklıklarda ölçülen karışımın Reynolds sayısı parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s * 10^{-1}$) 27

- Şekil C.8.a. Parçacık büyüklüğü $d_p=138 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%1$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik şartlarda* ve değişik Reynolds sayılarında ölçülen boyutsuz radyal uzaklık parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s * 10^{-1}$) 28
- Şekil C.8.b. Parçacık büyüklüğü $d_p=138 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%1$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik şartlarda* ve değişik boyutsuz radyal uzaklıklarda ölçülen karışımın Reynolds sayısı parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s * 10^{-1}$) 28
- Şekil C.9.a. Parçacık büyüklüğü $d_p=138 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%2$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik olmayan şartlarda* ve değişik Reynolds sayılarında ölçülen boyutsuz radyal uzaklık parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s * 10^{-1}$) 29
- Şekil C.9.b. Parçacık büyüklüğü $d_p=138 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%2$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik olmayan şartlarda* ve değişik boyutsuz radyal uzaklıklarda ölçülen karışımın Reynolds sayısı parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s * 10^{-1}$) 30
- Şekil C.10.a. Parçacık büyüklüğü $d_p=138 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%2$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik şartlarda* ve değişik Reynolds sayılarında ölçülen boyutsuz radyal uzaklık parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s * 10^{-1}$) 30
- Şekil C.10.b. Parçacık büyüklüğü $d_p=138 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%2$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik şartlarda* ve değişik boyutsuz radyal uzaklıklarda ölçülen karışımın Reynolds sayısı parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s * 10^{-1}$) 31
- Şekil C.11.a. Parçacık büyüklüğü $d_p= 72$ mikron ve 138 mikron olan su-felspat karışımlarının *izokinetik şartlarda* karışım hızına (U_{ann})

	karşılık gelen, test bölgesindeki iki-faz aksenal hidrodinamik basınç değişimleri ($\Delta P_{ip}/L$).	33
Şekil C.11.b.	Parçacık büyüklüğü $d_p = 72$ mikron ve 138 mikron olan su-felspat karışımlarının <i>izokinetik şartlarda</i> karışımlarının karışım hızına karşılık gelen ve test bölgesindeki hidrostatik basıncı da içeren iki-faz aksenal bileşik basınç değişimleri ($\Delta P_T / L$).	34
Şekil C.12.a.	Karışım hızına karşılık gelen ortalama katı-faz yoğunluğu ($\rho_s * 10^{-1}$)	35
Şekil C.12.b.	Karışım hızına karşılık gelen ortalama seyreltik çamur (katı-su) taşınım yoğunluğu (ρ_m)	35
Şekil C.13.	Parçacık büyüklüğü $d_p = 72$ mikron ve 138 mikron olan su-felspat karışımlarının <i>izokinetik şartlarda</i> iki-faz deneysel sürtünme katsayısına karşılık karışım hızı	36
Şekil 1.1.	Orifis metre için kalibrasyon eğrisi	45
Şekil 1.2.	Pitot tüp katsayısı	46

TABLO LİSTESİ

Tablo B.1.	Deneysel parametrelerin çalışma aralıkları	16
Tablo C.1.	Tek-faz deneyler için sürtünme katsayıları	18
Tablo 1.1.	Orifis metre'nin kalibrasyonu	43
Tablo 1.2.a.	Lokal (noktasal) hız ölçümlerindeki ($K=1$) manometre farkları ($Re_w = 24067$)	47
Tablo 1.2.b.	$Re_w = 24067$ için yaklaşık ($K = 1$) hız değerleri	47
Tablo 1.2.c.	Noktasal hız ölçümlerindeki ($K=1$) manometre farkları ($Re_w = 20167$)	48
Tablo 1.2.d.	$Re_w = 20167$ için yaklaşık ($K=1$) hız değerleri	48
Tablo 1.2.e.	Noktasal hız ölçümlerindeki ($K=1$) manometre farkları ($Re_w = 15115$)	49
Tablo 1.2.f.	$Re_w = 15115$ için yaklaşık ($K=1$) hız değerleri	49
Tablo 1.2.g.	Noktasal hız ölçümlerindeki ($K=1$) manometre farkları ($Re_w = 10116$)	50
Tablo 1.2.h.	$Re_w = 10116$ için yaklaşık ($K=1$) hız değerleri	50
Tablo 1.3. a.	$Re_w = 24067$ için değişik radyal pozisyonlarda yaklaşık ($K=1$) ve doğru ($K=1.6823$) hız değerleri	51
Tablo 1.3.b.	$Re_w = 20167$ için değişik radyal pozisyonlarda yaklaşık ($K=1$) ve doğru ($K=1.6823$) hız değerleri	51
Tablo 1.3.c.	$Re_w = 15115$ için değişik radyal pozisyonlarda yaklaşık ($K=1$) ve doğru ($K=1.6823$) hız değerleri	52
Tablo 1.3.d.	$Re_w = 10116$ için değişik radyal pozisyonlarda yaklaşık ($K=1$) ve doğru ($K=1.6823$) hız değerleri	52
Tablo 1.4.	Orifis metre kalibrasyonundan ve Simpson kuralı'ndan ($K=1$) elde edilen ortalama hız değerleri	53
Tablo 1.5.	Laminar akış bölgesindeki hız dağılımlarının katsayıları (Denklem C.1 için)	53
Tablo 1.6.	Laminar akış bölgesindeki doğru noktasal hızlar ($K=1.6823$)	53

Tablo 1.7.	İzokinetik şartlarda ölçülen iki-faz aksenal sürtünmeli basınç değişimleri için manometre farkları	54
Tablo 1.8.a.	İzokinetik olmayan şartlarda $d_p=72 \mu\text{m}$ ve $C_f = \%1$ (v/v) için katı-faz yoğunluğu hesaplamalarında gerekli veriler	54
Tablo 1.8.b.	İzokinetik şartlarda $d_p=72 \mu\text{m}$ ve $C_f = \%1$ (v/v) için katı-faz yoğunluğu hesaplamalarında gerekli veriler	56
Tablo 1.9.a.	İzokinetik olmayan şartlarda $d_p=72 \mu\text{m}$ ve $C_f = \%2$ (v/v) için katı-faz yoğunluğu hesaplamalarında gerekli veriler	57
Tablo 1.9.b.	İzokinetik şartlarda $d_p=72 \mu\text{m}$ ve $C_f = \%2$ (v/v) için katı-faz yoğunluğu hesaplamalarında gerekli veriler	59
Tablo 1.10.a.	İzokinetik olmayan şartlarda $d_p=138 \mu\text{m}$ ve $C_f = \%1$ (v/v) için katı-faz yoğunluğu hesaplamalarında gerekli veriler	60
Tablo 1.10.b.	İzokinetik şartlarda $d_p=138 \mu\text{m}$ ve $C_f = \%1$ (v/v) için katı-faz yoğunluğu hesaplamalarında gerekli veriler	62
Tablo 1.11.a.	İzokinetik olmayan şartlarda $d_p=138 \mu\text{m}$ ve $C_f = \%2$ (v/v) için katı-faz yoğunluğu hesaplamalarında gerekli veriler	63
Tablo 1.11.b.	İzokinetik şartlarda $d_p=138 \mu\text{m}$ ve $C_f = \%2$ (v/v) için katı-faz yoğunluğu hesaplamalarında gerekli veriler	65
Tablo 1.12.a.	Boyutsuz radyal uzaklık (BRU) parametre olarak alındığında izokinetik olmayan şartlarda ölçülen karışım hızına (U_{ann}) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=72 \mu\text{m}$ ve $C_f = 1\%$ (v/v) için)	67
Tablo 1.12.b.	Karışım hızı (U_{ann}) parametre olarak alındığında izokinetik olmayan şartlarda ölçülen boyutsuz radyal uzaklığa (BRU) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=72 \mu\text{m}$ ve $C_f = 1\%$ (v/v) için)	67
Tablo 1.13.a.	Boyutsuz radyal uzaklık (BRU) parametre olarak alındığında izokinetik şartlarda ölçülen karışım hızına (U_{ann}) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=72 \mu\text{m}$ ve $C_f = 1\%$ (v/v) için)	68

Tablo 1.13.b. Karışım hızı (U_{ann}) parametre olarak alındığında izokinetik şartlarda ölçülen boyutsuz radyal uzaklığa (BRU) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=72 \mu\text{m}$ ve $C_f = \%1$ (v/v) için)	68
Tablo 1.14.a. Boyutsuz radyal uzaklık (BRU) parametre olarak alındığında izokinetik olmayan şartlarda ölçülen karışım hızına (U_{ann}) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=72 \mu\text{m}$ ve $C_f = \%2$ (v/v) için)	69
Tablo 1.14.b. Karışım hızı (U_{ann}) parametre olarak alındığında izokinetik olmayan şartlarda ölçülen boyutsuz radyal uzaklığa (BRU) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=72 \mu\text{m}$ ve $C_f = \%2$ (v/v) için)	69
Tablo 1.15.a. Boyutsuz radyal uzaklık (BRU) parametre olarak alındığında izokinetik şartlarda ölçülen karışım hızına (U_{ann}) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=72 \mu\text{m}$ ve $C_f = \%2$ (v/v) için)	70
Tablo 1.15.b. Karışım hızı (U_{ann}) parametre olarak alındığında izokinetik şartlarda ölçülen boyutsuz radyal uzaklığa (BRU) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=72 \mu\text{m}$ ve $C_f = \%2$ (v/v) için)	70
Tablo 1.16.a. Su-felapat karışımlarının izokinetik şartlarda karışım hızlarına karşılık iki-faz aksenal sürtünmeli basınç değişimi ($d_p=72 \mu\text{m}$ için)	71
Tablo 1.16.b. Su-felapat karışımlarının izokinetik şartlarda karışım hızlarına karşılık durgun basıncı da içeren iki-faz aksenal sürtünmeli basınç değişimi ($d_p=72 \mu\text{m}$ için)	71
Tablo 1.16.c. Su-felapat karışımlarının izokinetik şartlarda karışım hızlarına karşılık iki-faz deneysel sürtünme katsayısı ($d_p=72 \mu\text{m}$ için)	71
Tablo 1.17.a. Boyutsuz radyal uzaklık (BRU) parametre olarak alındığında izokinetik olmayan şartlarda ölçülen karışım hızına (U_{ann}) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=138 \mu\text{m}$ ve $C_f = \%1$ (v/v) için)	72

Tablo 1.17.b. Karışım hızı (U_{ann}) parametre olarak alındığında izokinetik olmayan şartlarda ölçülen boyutsuz radyal uzaklığa (BRU) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=138 \mu\text{m}$ ve $C_f = \%1$ (v/v) için)	72
Tablo 1.18.a. Boyutsuz radyal uzaklık (BRU) parametre olarak alındığında izokinetik şartlarda ölçülen karışım hızına (U_{ann}) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=138 \mu\text{m}$ ve $C_f = 1\%$ (v/v) için)	73
Tablo 1.18.b. Karışım hızı (U_{ann}) parametre olarak alındığında izokinetik şartlarda ölçülen boyutsuz radyal uzaklığa (BRU) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=138 \mu\text{m}$ ve $C_f = \%1$ (v/v) için)	73
Tablo 1.19.a. Boyutsuz radyal uzaklık (BRU) parametre olarak alındığında izokinetik olmayan şartlarda ölçülen karışım hızına (U_{ann}) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=138 \mu\text{m}$ ve $C_f = 2\%$ (v/v) için)	74
Tablo 1.19.b. Karışım hızı (U_{ann}) parametre olarak alındığında izokinetik olmayan şartlarda ölçülen boyutsuz radyal uzaklığa (BRU) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=138 \mu\text{m}$ ve $C_f = \%2$ (v/v) için)	74
Tablo 1.20.a. Boyutsuz radyal uzaklık (BRU) parametre olarak alındığında izokinetik şartlarda ölçülen karışım hızına (U_{ann}) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=138 \mu\text{m}$ ve $C_f = 2\%$ (v/v) için)	75
Tablo 1.20.b. Karışım hızı (U_{ann}) parametre olarak alındığında izokinetik şartlarda ölçülen boyutsuz radyal uzaklığa (BRU) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=138 \mu\text{m}$ ve $C_f = \%2$ (v/v) için)	75
Tablo 1.21.a. Su-felspat karışımlarının izokinetik şartlarda karışım hızlarına karşılık iki-faz aksenal sürtünmeli basınç değişimi ($d_p=138 \mu\text{m}$ için)	76

Tablo 1.21.b.	Su-felspat karışımlarının izokinetik şartlarda karışım hızlarına karşılık durgun basıncı da içeren iki-faz aksel sürtünmeli basınç değişimi ($d_p=138 \mu\text{m}$ için)	76
Tablo 1.21.c.	Su-felspat karışımlarının izokinetik şartlarda karışım hızlarına karşılık iki-faz deneysel sürtünme katsayısı ($d_p=138 \mu\text{m}$ için)	76
Tablo 2.1.a.	2^3 Faktöriyel Tasarımı ($U_{\text{ann}}= 0.227 \text{ m/s}$ ve $U_{\text{ann}}= 0.11 \text{ m/s}$ için)	77
Tablo 2.1.b.	$\bar{\rho}_s$ ölçümlerinde bağımsız parametrelerin sonuçlara temel etkileri ve bu parametreler arasındaki etkileşimler (Tablo 2.1.a için)	77
Tablo 2.1.c.	Yates Algoritması ile bulunan, $\bar{\rho}_s$ ölçümlerindeki bağımsız parametrelerin sonuçlara temel etkileri ve bu parametreler arasındaki etkileşimler ($U_{\text{ann}}= 0.227 \text{ m/s}$ ve $U_{\text{ann}}= 0.11 \text{ m/s}$ için)	78
Tablo 2.2.a.	2^3 Faktöriyel Tasarımı ($U_{\text{ann}}= 0.11 \text{ m/s}$ ve $U_{\text{ann}}= 0.024 \text{ m/s}$ için)	79
Tablo 2.2.b.	$\bar{\rho}_s$ ölçümlerinde bağımsız parametrelerin sonuçlara temel etkileri ve bu parametreler arasındaki etkileşimler (Tablo 2.2.a için)	79
Tablo 2.2.c.	Yates Algoritması ile bulunan, $\bar{\rho}_s$ ölçümlerindeki bağımsız parametrelerin sonuçlara temel etkileri ve bu parametreler arasındaki etkileşimler ($U_{\text{ann}}= 0.11 \text{ m/s}$ ve $U_{\text{ann}}= 0.024 \text{ m/s}$ için)	80
Tablo 2.3.a.	2^3 Faktöriyel Tasarımı ($U_{\text{ann}}= 0.227 \text{ m/s}$ ve $U_{\text{ann}}= 0.11 \text{ m/s}$ için)	81
Tablo 2.3.b.	$\Delta P/L$ ölçümlerinde bağımsız parametrelerin sonuçlara temel etkileri ve bu parametreler arasındaki etkileşimler (Tablo 2.3.a için)	81
Tablo 2.3.c.	Yates Algoritması ile bulunan $\Delta P/L$ ölçümlerindeki bağımsız parametrelerin sonuçlara temel etkileri ve bu parametreler	

	arasındaki etkileşimler ($U_{ann}= 0.227$ m/s ve $U_{ann}= 0.11$ m/s için)	82
Tablo 2.4.a.	2^3 Faktöriyel Tasarımı ($U_{ann}= 0.11$ m/s ve $U_{ann}= 0.024$ m/s için)	83
Tablo 2.4.b.	$\Delta P/L$ ölçümlerinde bağımsız parametrelerin sonuçlara temel etkileri ve bu parametreler arasındaki etkileşimler (Tablo 2.4.a için)	83
Tablo 2.4.c.	Yates Algoritması ile bulunan, $\Delta P/L$ ölçümlerindeki bağımsız parametrelerin sonuçlara temel etkileri ve bu parametreler arasındaki etkileşimler ($U_{ann}= 0.11$ m/s ve $U_{ann}= 0.024$ m/s için)	84
Tablo 2.5.a.	İzokinetik olmayan şartlarda 2^3 Faktöriyel Tasarımı ($U_{ann}= 0.227$ m/s ve $U_{ann}= 0.11$ m/s için)	85
Tablo 2.5.b.	\bar{p}_S ölçümlerinde bağımsız parametrelerin sonuçlara temel etkileri ve bu parametreler arasındaki etkileşimler (Tablo 2.5.a için)	85
Tablo 2.5.c.	Yates Algoritması ile bulunan izokinetik olmayan şartlarda \bar{p}_S ölçümlerindeki bağımsız parametrelerin sonuçlara temel etkileri ve bu parametreler arasındaki etkileşimler ($U_{ann}= 0.227$ m/s ve $U_{ann}= 0.11$ m/s için)	86
Tablo 2.6.a.	İzokinetik olmayan şartlarda 2^3 Faktöriyel Tasarımı ($U_{ann}= 0.11$ m/s ve $U_{ann}= 0.024$ m/s için)	87
Tablo 2.6.b.	\bar{p}_S ölçümlerinde bağımsız parametrelerin sonuçlara temel etkileri ve bu parametreler arasındaki etkileşimler (Tablo 2.6.a için)	87
Tablo 2.6.c.	Yates Algoritması ile bulunan izokinetik olmayan şartlarda \bar{p}_S ölçümlerindeki bağımsız parametrelerin sonuçlara temel etkileri ve bu parametreler arasındaki etkileşimler ($U_{ann}= 0.11$ m/s ve $U_{ann}= 0.024$ m/s için)	88
Tablo 2.7.a.	F-testi sonuçları ($d_p = 138$ μm , $C_f = \%1$, $U_{ann} = 0.227$ m/s ve $U_{ann} = 0.11$ m/s için)	89

Tablo 2.7.b.	F-testi sonuçları ($d_p = 138 \mu\text{m}$, $C_f = \%1$, $U_{\text{ann}} = 0.11 \text{ m/s}$ ve $U_{\text{ann}} = 0.024 \text{ m/s}$ için)	89
Tablo 2.8.a.	İzokinetik şartın sağlandığı ve sağlanmadığı durumlarda (diğer parametreler aynı kalarak) yapılan $\bar{\rho}_s$ ölçüm değerlerinin karşılaştırmasını içeren istatistiksel Blok Analizi ($C_f = \%1$, $d_p=72 \mu\text{m}$ için)	90
Tablo 2.8.b.	İzokinetik şartın sağlandığı ve sağlanmadığı durumlarda (diğer parametreler aynı kalarak) yapılan $\bar{\rho}_s$ ölçüm değerlerinin karşılaştırmasını içeren istatistiksel Blok Analizi ($C_f = \%2$, $d_p=72 \mu\text{m}$ için)	91
Tablo 2.8.c.	İzokinetik şartın sağlandığı ve sağlanmadığı durumlarda (diğer parametreler aynı kalarak) yapılan $\bar{\rho}_s$ ölçüm değerlerinin karşılaştırmasını içeren istatistiksel Blok Analizi ($C_f = \%1$, $d_p=138 \mu\text{m}$ için)	92
Tablo 2.8.d.	İzokinetik şartın sağlandığı ve sağlanmadığı durumlarda (diğer parametreler aynı kalarak) yapılan $\bar{\rho}_s$ ölçüm değerlerinin karşılaştırmasını içeren istatistiksel Blok Analizi ($C_f = \%2$, $d_p=138 \mu\text{m}$ için)	93

ÖZET

Endüstrinin değişik alanlarında katı-sıvı karışımlarının akışlarıyla sıkça karşılaşılmaktadır. Bu alanlar kısaca şöyle sıralanabilir: Konserve işlemleri, çevrimli akışkan yataklar, mineral ve cevherlerin hidrolik taşınım işlemleri, ve madenlerin zenginleştirilmesi. Bu tür sistemlerde lokal katı-faz yoğunlukları değişik yöntemlerle belirlenebilir. Yapılacak çalışmada izokinetik örnekleme yöntemi, ekonomik nedenlerle ve mevcut düzeneğe en uygun olması nedeniyle seçilmiştir.

Bu çalışmada, eşmerkezli iki boru arasında (annulus) yukarı doğru akan su-feldspat karışımlarının lokal katı-faz yoğunluk dağılımları incelenmiştir. Lokal katı-faz yoğunluk ölçümleri annulus'un tam gelişmiş akış bölgesindeki bir kesitte yapılmıştır; annulus'un dahil olduğu kapalı-devre sistemde bir besleme tankı, bir hızı ayarlanabilen çamur pompası, bir orifismetre, bir ısı değiştirici, bir sıcaklık sondası ve bir boşaltma hattı yer almaktadır. Çamur karışımları, 72 ve 138 μm olmak üzere iki değişik boyutta katı parçacık kullanılarak ve hacımsal katı madde yüzdesi %1 ve 2 olmak üzere, iki değişik katı besleme konsantrasyonunda hazırlanmıştır. Değişik çalışma koşullarında radyal yöndeki katı yoğunluk profillerini ve test bölgesindeki eksenel sürtünmeli hidrodinamik basınç kayıplarını elde etmek için gerçekleştirilen deneylerde, bağımlı değişkenler; lokal katı-faz yoğunluğu, lokal karışım hızı ve test bölgesindeki eksenel sürtünmeli hidrodinamik basınç kaybıdır.

Lokal katı-faz yoğunlukları bir örnekleme sondası kullanılarak ölçülmüştür. Bu sonda başlangıçta bölgesel hızları bulmak için bir pitot tüp olarak kullanılmıştır. Bu veriler yardımıyla, lokal (bölgesel) katı yoğunlukları aynı örnekleme sondasıyla izokinetik şartlarda ve karşılaştırma yapmak amacıyla izokinetik olmayan şartlarda da gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, numuneleri izokinetik şartlarda alabilmek için bir izokinetik örnekleme ünitesi tasarlanmış ve kurulmuştur. Bu şekilde, sondadaki örnekleme hızıyla annulus'taki akışın gerçek lokal hızını çok yakın olarak eşitlemek mümkün olmaktadır. Hızları eşitlemek için gerekli olan sabit dengeleyici basınç, Azot gazı ile sağlanmıştır. Test alanındaki radyal yönde yedi değişik noktada izokinetik ve izokinetik olmayan şartlarda alınan numunelerin içindeki katı miktarları gravimetrik yöntemle bulunmuştur.

Hacımsal olarak % 1 katı besleme konsantrasyonunda elde edilen bölgesel katı yoğunlukları, % 2 katı besleme konsantrasyonuna göre daha tekdüze bir davranış

göstermiştir. Artan katı parçacık besleme konsantrasyonu ve parçacık büyüklüğü, radyal katı-faz yoğunluk profillerinin şekillerini değiştirmekte etken olmuştur. Bölgesel katı yoğunlukları genellikle literatürdeki çalışmalara benzer olarak annulus'un dış duvarı civarında iç duvar yakınındakilere göre daha fazla bulunmuştur. Katı yoğunlukları $\lambda=0.4$ olan boyutsuz bir radyal uzaklıkta, hız profillerinin maksimum olduğu noktada, genel olarak azalan bir trend takip etmiştir. Test bölümü boyunca tam gelişmiş akış bölgesinde iki-faz aksenal sürtünmeli basınç değişimlerinin sabit bir karışım hızında, artan katı besleme konsantrasyonu ve parçacık büyüklüğüyle arttığı gözlemlenmiştir. İzokinetik örnekleme sonuçları, bölgesel katı yoğunluklarının artan karışım hızıyla her radyal uzaklıkta arttığını göstermektedir. Bu davranış, izokinetik olmayan şartlarda yapılan ölçümlerde net olarak gözlenememiştir.

Kargaşalı akış bölgesinde izokinetik şartlarda gerçekleştirilen ölçümlerde, yaklaşık $\lambda \approx (R-R_1)/(R_2-R_1) = 0.4$ olan boyutsuz bir radyal uzaklıkta lokal katı -faz (LKF) yoğunlukları lokal minimum değerler vermişler, daha sonra annulus'un iç ve dış duvarlarına doğru tekrar artmışlardır. Annulus'un duvarlarında bu değerlerin sıfır olduğu düşünülmektedir. Katı parçacık çapı 138 μm olan feldspat %1 hacimsal konsantrasyonda kullanıldığında ise, $\lambda \approx 0.4$ olan radyal uzaklıkta, LKF yoğunlukları maksimum değere ulaşmışlardır. Bu davranışın nedeni, iki-faz akış karakteristiğinin deney parametrelerinin bu kombinasyonunda değişim göstermesinden dolayı olduğu düşünülmektedir. LKF yoğunlukları bu deney şartlarında da iç ve dış duvara doğru artmıştır. Laminar akış bölgesinde izokinetik şartlarda gerçekleştirilen ölçümlerde, yaklaşık $\lambda \approx 0.35$ ve 0.7 olan boyutsuz radyal uzaklıklarda LKF yoğunlukları küçük azalışlar vermiş ve duvarlara doğru tekrar artmışlardır.

Bölgesel katı yoğunluklarındaki radyal uzaklık boyunca gerçekleşen değişimler izokinetik örnekleme şartlarında daha açık olarak izlenebilmiştir. İzokinetik olmayan şartlarda yapılan ölçümlerde bu değişimler daha yüksek deneysel hatanın etkisiyle açıkça gözlenememiştir. İlâveten, deneysel verilerin değişik istatistiksel tekniklerle analizi yapılmıştır.

Anahtar Sözcükler: İzokinetik örnekleme; Annular (eş-merkezli iki-boru arasında) akış; Lokal (bölgesel) katı-faz yoğunluğu; İki-fazlı aksenal sürtünmeli hidrodinamik basınç kaybı; Radyal katı-faz yoğunluk profili (dağılımı).

ABSTRACT

Liquid-solid flows are encountered in many different industrial areas; such as in canned food operations, circulating fluidized beds, hydraulic transportation of mineral and ores, and mining and beneficiation plants. Local solid concentrations in such systems might be determined by several methods. Isokinetic sampling was chosen since it was the best for the present set-up.

In this study, radial solid density distributions in upward flowing water-feldspar mixtures through a concentric annulus were investigated. Local solid density measurements were performed at a test cross-section in the fully developed flow region of a concentric annulus; it is a part of a closed-loop system consisting of a head tank, a variable speed slurry pump, an orificemeter, a heat exchanger, an annulus, a temperature probe, and a drain line. The solid particles with mean diameters of 72 and 138 μm at two different feed solid concentrations of 1 and 2 % v/v were used in the prepared slurries. The dependent variables being local solid-phase density, local mixture velocity, and axial frictional hydrodynamic pressure drop along the test-section, an experimental work was performed to obtain the radial solid density profiles and axial pressure gradients at different operating conditions.

To determine the local solid-phase densities, a sampling probe was used. At the beginning, this probe was used as a pitot tube to measure the local velocities in the test cross-section. Making use of these data, local solid-phase densities were measured with the same probe under isokinetic and nonisokinetic conditions to compare both. For this purpose, an isokinetic sampling unit was designed and constructed to withdraw the samples under isokinetic conditions, at which the sampling velocity in the probe was equated to the true local flow velocity in the annulus very closely. The required constant back-pressure was supplied by pressurized Nitrogen gas to equate these velocities to each other. The amounts of solids in the slurry samples collected at seven different radial locations in the test area under isokinetic and non-isokinetic conditions were determined by the gravimetric method.

Local solid-phase densities showed more uniform trends at the feed solid concentration of 1% v/v than those at 2% v/v. Increasing the feed solid concentration

and particle size changed the shape of these profiles. The obtained local solid densities were generally higher near the outer wall than those near the inner wall; this result was consistent with the literature. As a general trend, local solid densities showed a decreasing trend at around a dimensionless radial distance of $\lambda=0.4$, where the slurry velocity profile had its maximum value. It was observed that the two-phase axial frictional hydrodynamic pressure gradients along the test section in the fully developed flow region increased with the increasing feed solid concentration and particle size at a constant slurry flow rate. Isokinetic sampling results showed that the local solid-phase densities increased consistently with the increasing slurry velocity at all radial distances in the annular gap, while this trend was not observed clearly in the non-isokinetic measurements.

In turbulent slurry flows, the general trend in the radial solid density profiles, determined by isokinetic sampling technique, showed a local minimum at a dimensionless radial distance of $\lambda \approx (R-R_1)/(R_2-R_1) = 0.4$, then increasing trends towards the inner and the outer walls of the annulus where they were supposed to become zero. On the contrary, a local maximum solid density at $\lambda \approx 0.4$ with two minima at both sides of this maximum value was observed at high Reynolds numbers of the slurry containing 138 μm feldspar particles at the low level of the feed solid concentration, namely 1% v/v. This was attributed to the change in two-phase flow characteristics at this combination of the experimental parameters. The increasing trends towards the walls were also observed here. In laminar slurry flows, although the local solid densities were very low, the radial solid density profiles (RSDPs) indicated slight minima at $\lambda = 0.35$ and 0.7 with the increasing local densities in the vicinities of the walls to decrease again to become zero at the walls.

Variations of the local solid densities along the radial distance were more obvious in the isokinetic results while these variations were obscured under nonisokinetic conditions by the experimental error at a higher level. In addition, experimental data were analyzed by different statistical techniques.

Keywords: Isokinetic sampling; Annular flow; Local solid-phase density; Two-phase axial frictional hydrodynamic pressure drop; Radial solid-phase density profile (distribution).

A. GİRİŞ

Annulus geometrisinin endüstride pek çok alanda uygulamaları vardır; örneğin: çift borulu ısı değiştiriciler, nükleer reaktör soğutucuları, akışkan yataklar, biyolojik sistemler, atıksu temizleme sistemlerindeki ısı değiştiricileri, çamur reaktörleri, gıda endüstrisindeki sıvı-katı sistemler.

Bu çalışmanın amacı, düşey bir annulus'ta yukarı yönde akan su-feldspat karışımlarının radyal yönde lokal katı-faz (LKF) konsantrasyon dağılımları ile aksel sürtünmeli hidrodinamik basınç (ESHB) farklarının bulunmasıdır. Önceki çalışmada (Özbelge ve Beyaz, 1999, 2001), karışımın değişik akış hızlarında radyal yönde LKF konsantrasyonlarının ölçümlerinde, izokinetik numune alma şartlarının sağlanamamış olması nedeniyle verilerde istenilen hassasiyet elde edilememiştir. İzokinetik şartlarda örnekleme, annulus'ta numunenin alındığı noktadaki akışkanın hızı ile örnekleme sondasının içindeki numunenin çekilme hızı arasındaki eşitliğin, ilave bir düzende gerektiği duruma göre geri-basınç veya vakum uygulanmasıyla sağlanmasından sonra numuneyi alarak gerçekleştirilmiştir. Bu proje çalışmasında izokinetik şartlarda radyal yönde alınan su-feldspat numunelerindeki katı konsantrasyonları gravimetrik yöntemle saptanmıştır.

Hidrolik taşınım sistemlerinin tasarımında, bu sistemlerde akıştan dolayı oluşan sürtünmeli hidrodinamik basınç kayıplarının önceden tahmin edilmesi büyük önem taşımaktadır. Böylece, gerekli pompalama gücüne bağlı olarak işletme masrafları saptanabilecektir. Ayrıca hız ve konsantrasyon profilleri kullanılarak yapılabilecek olan doğru ısı transferi tahminleri de teknolojiye geniş kullanım alanlarına sahiptir. Örneğin, gıda endüstrisinde kullanılabilecek olan ısı transfer tahminleri elde edilecek ürünün kalitesini değiştirecektir. Bu sistemlerin hidrodinamiğinin bilinmesi aynı sistemlerdeki kütle ve ısı transferi çalışmalarını da mümkün kılacaktır. Ayrıca hidrolik taşınım sistemlerinde sürtünme katsayılarının ve basınç kayıplarının önceden tahmin edilebilir olması, bu sistemlerin tasarımında işletme masraflarının önceden tahmin edilebilmesini sağlayacaktır. Sonuçlar, benzer sistemlerin tasarımında ve modelleme çalışmalarında literatürdeki eksiklikleri gidereceği için yararlı olacaktır.

A.1. Kaynak Araştırma

Literatürde, yatay borularda sıvı-katı karışımlarının akış özelliklerini inceleyen araştırma sayısı oldukça fazladır. Ancak, yukarı veya aşağı yönde akışlarla ilgili çalışmalar daha azdır. Özbelge ve Beyaz (1999) kapalı devre bir düzenekte, eş-merkezli iki boru arasında (annulus'da) sıvı-katı yukarı akışlarının özelliklerini incelemiş ve radyal yönde lokal katı faz (LKF) konsantrasyonlarını ve iki-faz aksel basınç kayıplarını deneysel olarak elde etmişlerdir. Bu çalışmada, deney düzeneğinde bazı değişiklikler yapılarak düzeneğin yetersiz kalan yönleri geliştirilmiştir. Yukarı yönlü sıvı-katı akışlarla ilgili deneysel çalışmalar senelerdir yapılmaktadır. Fakat, bu karışımlarla ilgili 'annulus' geometrisinde yapılmış çalışmalar oldukça nadirdir. Endüstride değişik uygulama alanları olmasına rağmen, bu geometride deney ve analizler yaparken ortaya çıkan karmaşıklıklar deneysel veri elde etmeyi zorlaştırmaktadır. Bu tür sistemlerde katı konsantrasyonları değişik yöntemlerle bulunabilir. Bu çalışmada, hazırda bulunan deney düzeneğine en uygun method olarak izokinetik örnekleme yöntemi seçilmiştir. Katı parçacıkların konsantrasyon dağılımlarını deneysel olarak saptamak modelleme çalışmaları için de önemle gerekmektedir (Karabelas,1977).

Akışkan-katı karışımlarına endüstrinin değişik alanlarında rastlanabilir. Örneğin, küçük parçacıklar halindeki gıda maddelerinin sterilizasyonunda (Faderani ve arkadaşları, 1997; Alajbegovic ve arkadaşları, 1994; Lareo ve arkadaşları, 1997) hız, basınç kaybı ve ısı transferi ürün kalitesini etkilemektedir ve yukarıda bahsedilen parametreler karışımın katı konsantrasyonuna bağlıdır. Çevrimli akışkan yataklar (circulating fluidized-beds), mineral ve cevherlerin hidrolik taşınımı, mineral ve kimyasal işlem endüstrileri ve fosil enerji uygulamaları sayılabilecek diğer örneklerdir (Nasr-EI-Din ve arkadaşları, 1987). Bu tür karışımların akışları tam olarak anlaşılıp yorumlanmazsa, zaman zaman aletin kullanımında yetersizlikler ortaya çıkabilir ya da aletlerin doğru olarak tasarlanamamış olması nedeniyle aletin operasyonu sırasında sorunlarla karşılaşılabilir. Eldeki deneysel veriler yeterli olmadığında bu tür eksiklikler görülmektedir. Sıvı-katı ya da çok-fazlı diğer sistemlerde akış biçimleri sistemin geometrisinden, çalışma şartlarından ve fazların fiziksel özelliklerinden etkilenir ve aletlerin çalışma performansları akış biçimine

bağlıdır (Brauner ve arkadaşları, 1991). Bu olay lokal katı-faz konsantrasyonlarının bilinmesiyle açıklanabilir.

Gaz-katı karışımlarının bölgesel akış hızlarının belirlenmesinde izokinetik sondaların kullanılması Rao ve Dukler (1971) tarafından incelenmiştir. Ohashi ve arkadaşları (1980), düşey ve yatay borularda iki-fazlı sıvı-katı akışlarının incelenmesi ve ortalama parçacık hızlarının bulunması konularında çalışmışlardır. Dutta ve Sastry (1990) boru akışlarında hız dağılımlarını bulmuşlardır. Michaelides ve Farmer (1984) çamur akışlarını kargaşalı rejimde modellemiştir. Borulardaki sıvı-katı kargaşalı akışlarda, LKF konsantrasyon profilleri Furuta ve arkadaşları (1978) tarafından elde edilmiştir. Karabelas (1977) seyreltik sıvı-katı kargaşalı akışlarında yatay borunun eksenine dik yöndeki çapı boyunca katı faz dağılımlarını izokinetik şartlarda elde etmiştir. İki fazlı sistemlerin basınç kayıplarının teorik hesaplama yöntemleri Soliman ve Collier (1990) tarafından çalışılmıştır. Lareo ve arkadaşları (1997) sıvı-katı karışımlarının borularda düşey yukarı yönlü akışlarında katı parçacıkların hız ve konsantrasyon profillerini bulmuşlardır. Mankad ve Fryer da (1997) aynı konuda çalışmışlardır. Borulardaki yukarı yönlü katı-sıvı akışlarında faz dağılımları Alajbegovic ve arkadaşları (1994) tarafından incelenmiştir.

Bu çalışmanın asıl amacı, değişik katı besleme konsantrasyonlarında hazırlanan feldspat-su karışımlarının annulus'da yukarıya doğru akışlarında, akışın tam gelişmiş olduğu bölgede akışa dik olan bir kesitteki LKF yoğunluklarını izokinetik şartlarda hassas olarak ölçmek ve eksenel yöndeki sürtünmeli basınç farklarını da deneysel olarak saptamaktır. Sonuçlar benzer sistemlerin tasarım ve modelleme çalışmalarında kullanılabilir.

B. GELİŞME

B.1. Deneysel Çalışma

Düşey eşmerkezli iki boru (annulus) arasında yukarı yönlü akan sıvı-katı karışımlarının hidrodinamiği incelenmiştir. Karışımın değişik hızlarında, annulus'da akışın tam gelişmiş olduğu test bölgesindeki bir kesit alanında LKF yoğunlukları ve test bölgesi boyunca hidrodinamik basınç kayıpları, iki değişik katı besleme

konsantrasyonunda, iki değişik parçacık boyutunda ve karışımın değişik Reynolds sayılarında ölçülmüştür.

B.1.a. Deney Düzeneği

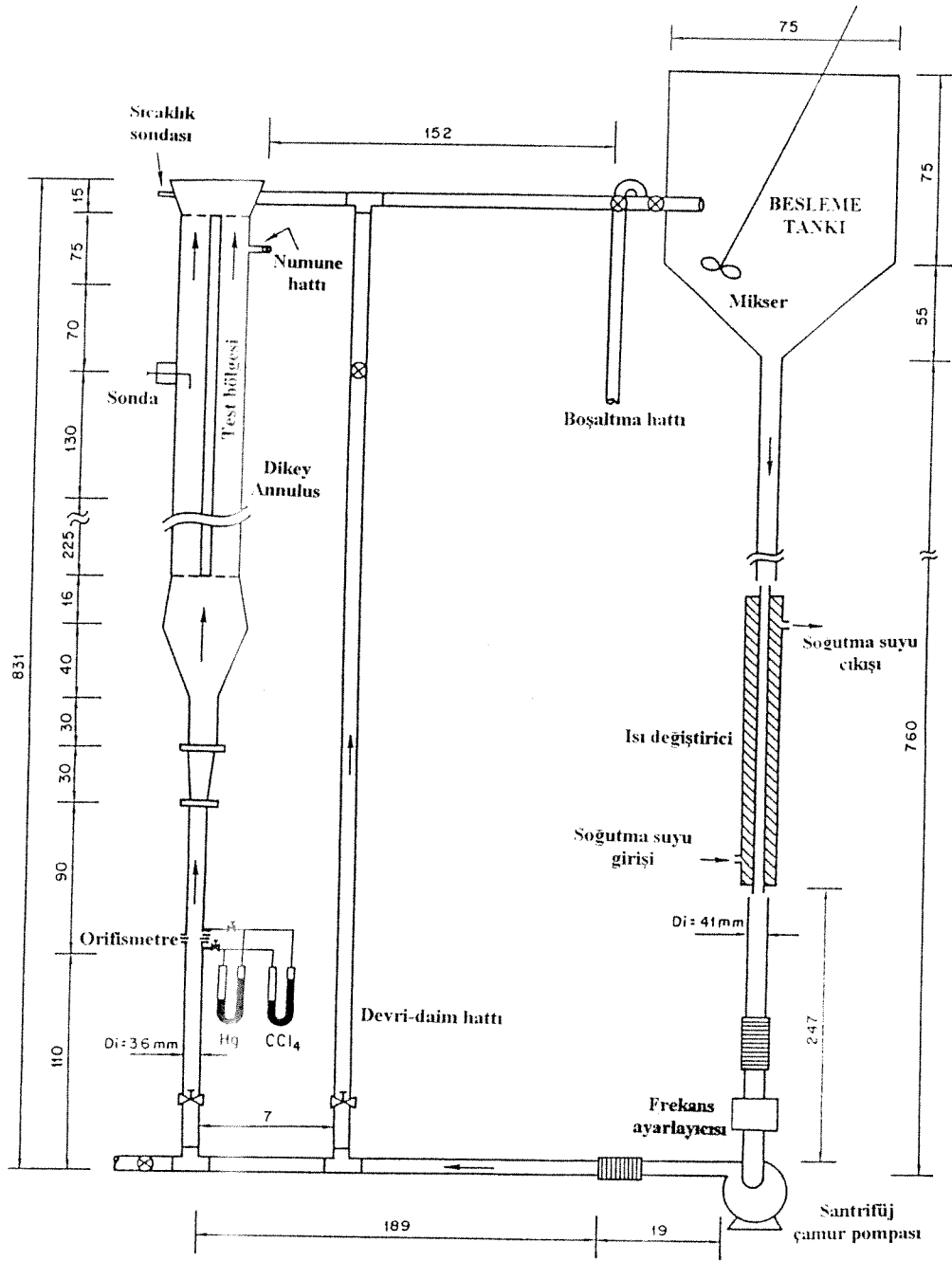
Deneyler, ODTÜ Kimya Mühendisliği Bölümü'nün Temel İşlemler Laboratuvarı'nda kurulmuş olan deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde, iç içe yerleştirilmiş düşey eş merkezli iki boru seti (annulus), devri-daim hattı, paslanmaz çelikten yapılmış besleme tankı, ısı değiştirici, U-tüp manometre, örnekleme sondası, sıcaklık sondası, orifis metre, santrifüj çamur pompası, boşaltma hattı ve özel olarak tasarlanmış bir izokinetik örnekleme ünitesi yer almaktadır. Deney düzeneği Şekil B.1'de verilmiştir.

Annulus'un toplam uzunluğu 5 m olup test bölgesi 2 m'dir. Tam gelişmiş akış koşullarını sağlamak için 2.25 m'lik giriş mesafesi bırakılmıştır. Annulus'un iç ve dış boruları çelikten yapılmıştır. İç ve dış boruların çapları sırasıyla 43.2 mm (D_1) ve 123 mm (D_2) dir. Hidrolik çap (D_2-D_1) 79.8 mm olarak hesaplanmıştır.

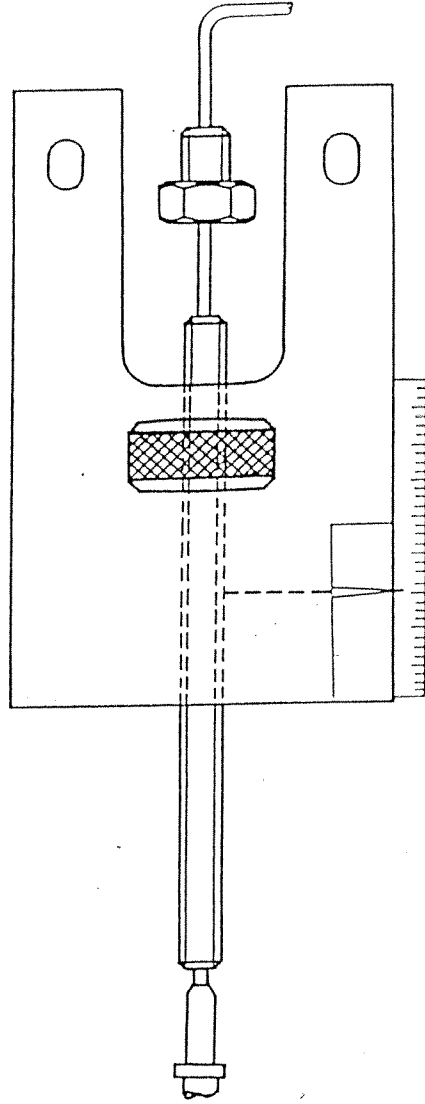
Seyreltik sıvı-katı karışımını annulus'a istenilen hızda pompalamak için, frekans ayarlayıcısıyla hızı değiştirilebilen bir santrifüj çamur pompası (Standard Pompa-PC-40/160-VX E.M.P. (2/1450)) kullanılmıştır. Akış hızı, çamur pompasının üzerine monte edilen frekans ayarlayıcısı ile istenilen değere sabitlenebilmiştir. Annulus'un giriş ve çıkış kısımlarına çamurun homojen dağılmasını sağlamak için karıştırıcı kanatlar yerleştirilmiştir.

Annulus'un üzerinde 2 m aralığındaki test bölgesi boyunca oluşan aksel hidrodinamik basınç kayıpları U-tüp manometre ile ölçülmüştür. Özgül ağırlılığı 1.59 olan CCl_4 (karbontetraklorür) manometre sıvısı olarak kullanılmıştır. İki boru arasındaki akışa dik bir kesit alanında radyal yöndeki değişik noktalarda LKF yoğunlukları, daha önce Özbelge ve Somer (1988) tarafından tasarlanmış bir örnekleme sondasıyla ölçülmüştür; bu sonda Şekil B.2'de görülmektedir. LKF yoğunluk ölçümleri annulus'un çapı boyunca yedi değişik noktada, iki değişik parçacık boyutu ve katı besleme konsantrasyonunda ve karışımın değişik akış hızlarında, izokinetik ve izokinetik olmayan şartlarda gerçekleştirilmiştir.

Örnekleme sondası LKF yoğunluklarının ölçüldükleri noktalardaki karışımın hızlarını saptamakta da kullanılmıştır. Bu sonda, halkasal boşluğa yatay olarak monte



Şekil B.1. Deney düzeneği



Şekil B.2. Örnekleme sondası [Özbelge & Somer, 1988]

edilmiş olup, ucu akışı karşılayacak şekilde aşağıya doğru 90° kıvrılarak yerleştirilmiştir. Örnekleme sondasının iç ve dış çapları sırasıyla 3.4 ve 4.9 mm'dir. Sondanın annulus'un akışa dik kesit alanında çap boyunca hareketi, üzerine monte edilen vidalı bir mekanizma ile gerçekleştirilmiştir. Bu mekanizma üzerinde sondanın uç kısmının pozisyonunu gösteren ve cetvel üzerinde hareket edebilen bir iğne bulunmaktadır. Örnekleme sondası annulus'un üst kısmından 1.45 m aşağıya kaynakla monte edilmiştir.

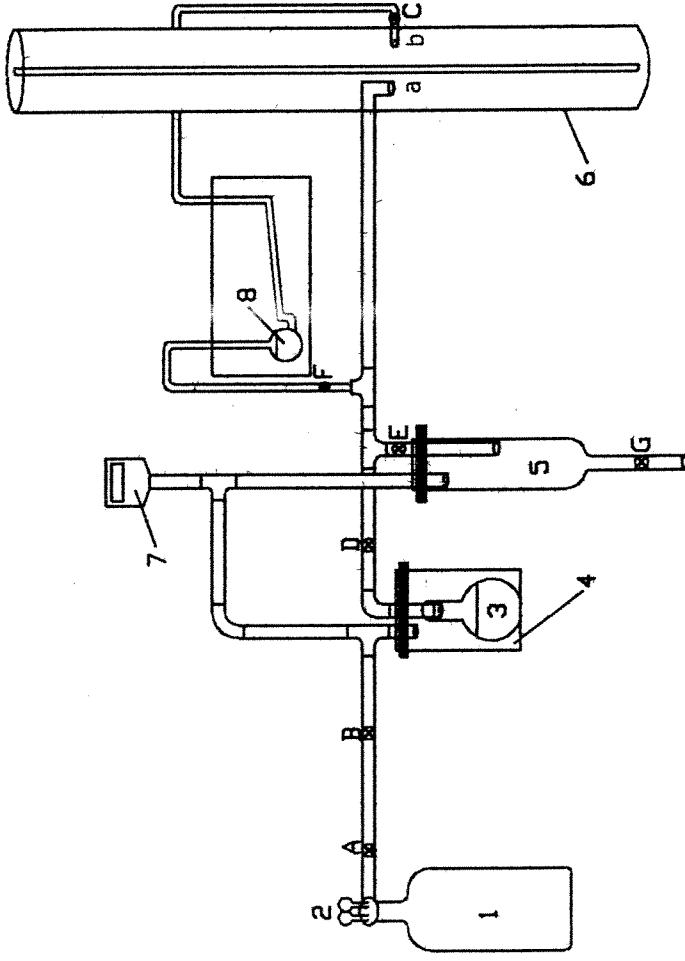
Sıvı-katı karışımının akış hızı önceden kalibre edilmiş bir orifismetre (orifisin delik çapının boru çapına oranı, $D_o/D_p = \beta = 0.65$) ile ölçülmüştür. Kalibrasyon eğrisi Ek.1'de verilmiştir. Orifismetre deliğinin çapı 20.65 mm'dir. Orifismetre deney düzeneğinin en alt kısmından 1.1 m yukarı monte edilmiştir. Küçük akış hızları (<40 L/dak) hassas olarak CCl₄-manometresi ile ölçülmüştür. 40 L/dak'dan büyük hız ölçümleri için Hg-manometresi kullanılmıştır. Manometre farkları önce m-Hg cinsinden okunup, sonra bu değerler m-CCl₄'e çevrilmiştir.

Karışımın deney esnasındaki sıcaklığı, annulus'un en üst kısmına yerleştirilmiş bir sıcaklık sondası ve ona bağlı dijital sıcaklık ölçerle takip edilmiştir (Cole-Parmer 1997-1998 Catalogue Number: 93821-00). Bu sıcaklığı sabit tutabilmek için, besleme tankından çıkış hattı üzerine küçük bir ısı değiştirici konmuştur; böylece sistemde sürtünmeden dolayı zamanla oluşacak sıcaklık artışları giderilmiştir. Çift borulu ısı değiştiricinin iç borusunda akmakta olan karışım, iki boru arasından geçen soğutma suyuyla soğutulmuştur.

Besleme tankı paslanmaz çelikten yapılmış olup üst kısmı silindirik, alt kısmı ise konik biçimdedir. Karışımı besleme tankından santrifüjlü çamur pompasına taşıyan düşey boru galvanizli demir'den yapılmıştır. Karışımı sistemden boşaltmak için, besleme tankının yatay giriş hattına T-bağlantısıyla dik olarak bağlanmış olan düşey bir boşaltma hattı kullanılmıştır. Seyreltik çamur, besleme tankında istenilen konsantrasyonda hazırlanıp annulus'a çamur pompası ile gönderilmiştir. Katıların tankta ve dolayısıyla kapalı devre deney düzeneğinde homojen dağılımını sağlamak amacıyla besleme tankının içine bir mikser (karıştırıcı) monte edilmiştir. Katı parçacıkların deney sırasındaki aşınmalarını görmek için bazı deneylerden sonra boşaltma hattından numuneler alınmış ve parçacık boyut-dağılımları bulunmuştur.

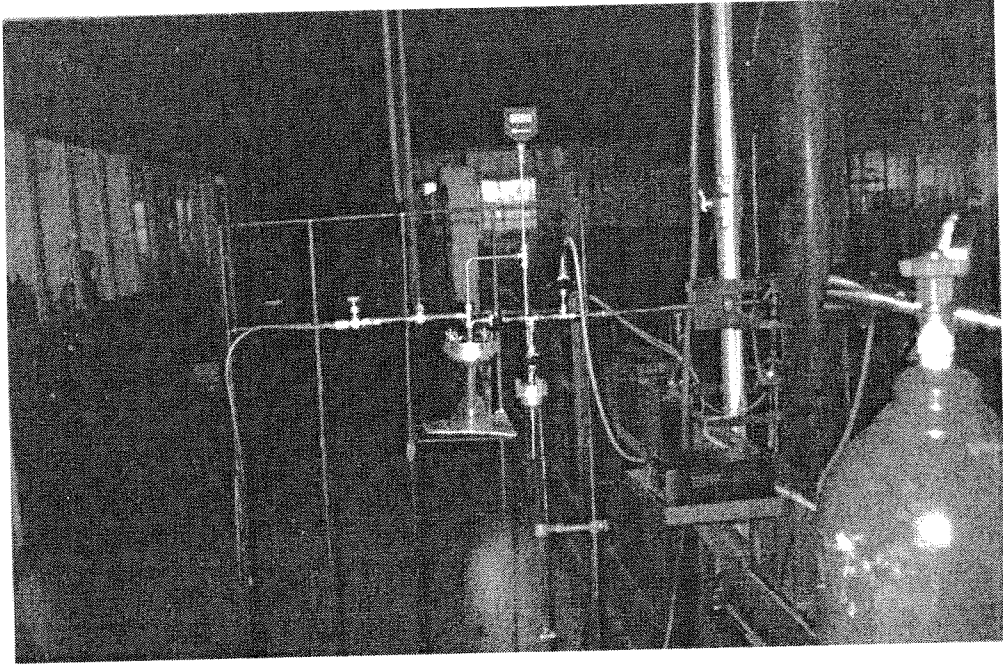
Deneyleerde seyreltik su-feldspat ($K_2O.Al_2O_3.6SiO_2$) karışımları kullanılmıştır. Besleme çamurunu hazırlamak için ortalama parçacık çapları 72 ve 138 mikron olan feldspat tozları kullanılmıştır. Katı malzeme olarak feldspat'ın seçilme nedeni bu maddenin ufalanmaya karşı dirençli oluşu ve suya karşı eylemsiz oluşudur. Tekdüze katı parçacık boyutu elde etmek için ASTM standart elekleri kullanılmıştır. Ardarda gelen iki eleğin delik çaplarının ortalaması alınarak katı parçacıkların ortalama çapları bulunmuştur. Her parçacık boyutundaki feldspat ile %1 ve %2 (hacimsal yüzde, % v/v) konsantrasyonlarında hazırlanan su-feldspat karışımlarının (seyreltik çamur) annulus'da 0.012-0.227 m/s aralığındaki hızlarda akışları incelenmiştir. Bu hız aralığına karşılık gelen karışım Reynolds sayısı (Re_m) aralığı 934-20131'dir.

Şekil B.3 de görülen 'izokinetik örnekleme ünitesi', ölçüm yapılan noktadaki akışkanın hızı ile sonda içindeki numunenin akış hızını eşitlemek üzere tasarlanmış ve sisteme monte edilmiştir. Çünkü, karışım annulus'un içinde akarken örnekleme sondasına girdiğinde akış alanı birden küçüldüğünden hız artmakta ve bozulmamış akış alanındaki hızdan çok daha büyük bir değere ulaşmaktadır. Bu nedenle bahsedilen iki hızı eşitlemek, LKF yoğunluk ölçümlerinden doğru sonuç alabilmek için son derece önemlidir. Örnekleme ünitesinde (Şekil B.3); bir azot tübü (1), bir basınç regülatörü (2), bir numune toplama kabı (erlen) (3), bir örnekleme kutusu (4), kalibre edilmiş bir hacim-ölçer (5), bir dijital elektronik basınç göstergesi (7), bir eğik manometre (8), ve bazı gerekli bağlantı elemanları (A, B, C, D, E, F, G) yer almaktadır. İzokinetik şartlarda örnekleme mümkün kılacak olan gerekli sabit dengeleyici geri-basınç azot gazı ile sağlanmıştır. İki-kademeli basınç regülatörü (2) (Cole-Parmer 2001-2002 Catalogue Number U-03270-13), izokinetik ölçüm sistemindeki çalışma basıncını hassas bir şekilde göstermektedir. Sisteme uygulanan basınç ayarlandıktan sonra dijital basınç göstergesi (7) sisteme uygulanan basınç değerini iki ondalık basamağa kadar göstermektedir. Örnekleme kutusunun (4) çapı 80 mm' dir ve camdan yapılmıştır. Cam kutunun üzerindeki flanjlara alüminyum malzemeden yapılmış olup cam kutuya 'metal epoksi' adı verilen özel bir yapıştırıcıyla sabitlenmiştir. Derecelendirilmiş hacim-ölçer (5) kalibre edilmiş olup üzerindeki çizgiler önceden tespit edilen belirli hacimleri göstermektedir. İzokinetik örnekleme ünitesinin fotoğrafı Şekil B.4 de verilmiştir.



- | | | |
|------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| 1. Azot tüpü | A. Igne vana | 5. Derecelendirilmiş hacim-ölçer |
| 2. Basiç regülatörü | B. Açma-kapama vanası | 6. Annulus |
| 3. Numune toplama kabı | C, D, E, F, G: Küresel vanalar | 7. Dijital basıç göstergesi |
| 4. Örnekleme kutusu | | 8. Egik manometre |

Şekil B.3. İzokinetik örnekleme ünitesi



Şekil B.4. İzokinetik örnekleme ünitesinin fotoğrafı

Karışımın örnekleme hızını ‘annulus’taki lokal akış hızına eşitlemek için, raporun ‘Deney Yöntemi’ kısmında açıklanan deneme-yanılma metodu uygulanmıştır. Bu hızlar, Şekil B.3 deki, hacim-ölçer (5)’de eşitlendikten sonra, bunu sağlayan sabit dengeleyici basınç örnekleme kutusuna da (4) aynen uygulanarak numune toplama işlemine geçilmiştir.

Annulus’ta yukarı yönlü akan karışımın lokal (noktasal) hızı ile örnekleme sondasının içindeki hızı birbirine eşitlemek için basınç ya da vakuma ihtiyaç vardır (Karabelas, 1977). Çalışılan deney düzeneğinde ise, test kesit alanının üzerindeki yüksek su basıncı nedeniyle vakuma gerek kalmamıştır. Ancak, ileriki çalışmalarda annulus’un düşey test bölgesi boyunca ($L = 2$ m), değişik yüksekliklerdeki test-kesit alanlarından numune alabilmek için (örneğin, bu çalışmadaki test alanının daha yükseğindeki bir alanda çalışabilmek için) vakum uygulaması gerekebilecektir. Literatürde, yatay borularda izokinetik örnekleme tekniğini uygulayabilmek için zaman zaman vakum gerekmiştir (Karabelas, 1977).

B.1.b. Deney Parametreleri

Deneysel çalışmadaki bağımsız değişkenler, ortalama parçacık boyutu (72 ve 138 μm), katı besleme konsantrasyonu (1 ve 2 %v/v) ve karışımın annulus’daki ortalama hızıdır (0.012-0.227 m/s). Esasen %1 ve %2 (%v/v) olarak amaçlanan katı besleme konsantrasyon değerleri, kapalı-devre akış düzeneğinin toplam hacminin yaklaşık hesabına göre gereken katı madde miktarlarının tanka ilave edilmesi ile elde edilmiştir. Ancak, sistemdeki seyreltik çamurun akış karakteristiğine bağlı olarak deney sırasında tank içindeki çamurun yoğunluğu bu değerlerden farklı bulunmuştur. Örneğin çok düşük debilerde, katıların büyük bir miktarının sistemin alt kısımlarında çökmesi nedeniyle, tanktan deney sırasında alınan numunedeki katı konsantrasyonu pompa çalıştırılmadan önce besleme tankında hazırlanan su-feldspat karışımının başlangıç katı madde konsantrasyonundan daha küçük bulunmuştur. Deneylerde bağımlı değişkenler ise; test bölgesindeki aksenal iki-faz hidrodinamik basınç farkları ($\Delta P_{ip}/L$), ve annulus’un akışa dik bir kesitindeki LKF yoğunluklarıdır (ρ_s).

B.1.c. Deney Yöntemi

Her deneyde, başlangıçta ortalama katı konsantrasyonu %1 (v/v) veya %2 (v/v) olan seyreltik su-feldspat karışımı besleme tankında hazırlanmıştır. İstenilen katı besleme konsantrasyonu, gerekli miktardaki katı maddenin yaklaşık hacmi bilinen sisteme besleme tankında ilavesiyle elde edilmiştir ve mikser çalıştırılarak katıların sisteme homojen olarak dağılımı sağlanmıştır. Pompa çalıştırılmış ve istenilen hıza frekans ayarlayıcısıyla ulaşılmıştır. Akış hızı, orifisetre'nin kalibrasyon eğrisi kullanılarak belirlenmiştir. Orifisetre kalibrasyonu su ile yapılmıştır. Katı madde miktarının kısıtlı oluşu nedeniyle, kalibrasyon seyreltik çamur ile tekrarlanmamıştır. Deneylerde kullanılan su-feldspat karışımlarının çok seyreltik olması nedeniyle aradaki hata payının ihmal edilebileceği düşünülmüştür. İleriki çalışmalarda, bu tip sistemlerde çok hassas ölçüm yapan, fakat maliyeti yüksek manyetik bir akış ölçerin kullanılması tavsiye edilebilir. Çamurun sıcaklığını sabit tutabilmek için tankın altındaki ısı değiştirici soğutma suyu açılarak çalıştırılmıştır.

DeneySEL çalışmanın ilk kısmında, lokal hız değerleri örnekleme sondasının önce bir pitot tüp gibi kullanılmasıyla ölçülmüştür. Bu amaçla, manometre sıvısı CCl_4 ve benzen karışımı (özgül ağırlık~1.22) olan ve eğim açısı 0.94° olarak yapılan bir eğik manometre sondaya Şekil B.3 de görüldüğü gibi bağlanmıştır. Sonda ucunun bulunduğu noktadaki lokal hız değeri, F ve C vanaları açılarak eğik manometreden ($P_a - P_b$) farkının ölçülmesiyle, Denklem (1) den hesaplanmıştır. Başlangıçta her nokta hızı, pitot tüp katsayısı $K=1$ alınarak hesaplanmıştır. Kesit alanındaki çap boyunca radyal yönde 10 değişik noktada hız değerleri ölçülerek, her akış Reynolds sayısı için bir hız dağılım grafiği çizilmiştir. Denklem (2) deki Simpson kuralı (Fogler, 1992, sayfa 814-815) kullanılarak Denklem (3) den ortalama hız elde edilmiştir.

$$V_L = K \sqrt{\frac{2 \Delta P_{im}}{\rho_w}} \quad (1)$$

$$\int_{x_0}^{x_n} f(x) dx = \frac{3}{8} h \left[f(x_0) + 3f(x_1) + 3f(x_2) + 2f(x_3) + 3f(x_4) + 3f(x_5) + 2f(x_6) + 3f(x_7) + 3f(x_8) + f(x_9) \right] \quad (2)$$

$$\bar{U}_{ann} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} V(r) r d\theta dr}{\int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} r d\theta dr} = \frac{2 \int_{R_1}^{R_2} V(r) r dr}{R_2^2 - R_1^2} \quad (3)$$

Orifismetre kalibrasyonundan elde edilen gerçek ortalama hızın pitot tüp ölçümlerinden elde edilen ortalama hıza oranı alınarak iki değer karşılaştırılmıştır. Bu işlem değişik Reynolds sayılarındaki akışlar için tekrarlanmıştır. Hesaplanan oranlardan pitot tüp katsayısı standart sapmayla birlikte $K=1.6823 \pm 0.0714$ olarak elde edilmiştir. Pitot tüp katsayısı olan K değeri 1'den büyüktür. Bunun nedeni, pitot tüp ölçümlerinden elde edilen noktasal hız değerlerinin gerçek değerlerden küçük oluşlarıdır. Sonuç olarak, başlangıçta pitot tüp katsayısı $K=1$ alınarak hesaplanan noktasal hızlar gerçek pitot tüp katsayısı olan $K=1.6823$ ile çarpılarak düzeltilmiştir. Böylece oldukça doğru lokal hız değerlerine ulaşılmıştır. Hız deneylerindeki hata yüzdesi yaklaşık %5 tir. Bu işlemten sonra eğik manometre, F ve C vanalarının kapatılmasıyla devreden çıkarılmıştır.

Deneysel çalışmanın ikinci kısmında, izokinetik örnekleme ünitesiyle LKF yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle göre, karışımın her noktasal hız değerinde diğer bir deyişle her radyal pozisyonda, örnekleme kabı olan erlene karışımın sürekli akışına izin verecek sabit dengeleyici bir basıncın (izokinetik örnekleme ünitesine) uygulanması gerekmektedir. Her radyal pozisyonda istenen gerçek lokal hızı sağlayacak olan dengeleyici basınç, deneme-yanılma metodu izlenerek saptanmıştır. Bu durumda, önce azot gazı kullanılarak belirli miktarda basınç Şekil B.3 de görülen B vanasının açılmasıyla sisteme uygulanmıştır. Bu şartlar altında, derecelendirilmiş hacim-ölçerde (5) toplanan çamur numunesinin hacmi ölçülerek bu hacim, kronometre ile belirlenen numunenin sonda yardımıyla alınma süresine bölünmüştür. Bulunan hacımsal akış hızı, örnekleme sondasının akış alanına bölünerek numunenin sonda içindeki hızı elde edilmiştir. Şayet elde edilen hız değeri daha önceden pitot tüp ölçümüyle bulunmuş olan ve ölçüm yapılan noktadaki gerçek lokal hızdan büyükse, sisteme uygulanan sabit dengeleyici basınç biraz daha artırılarak işlemler birbirine çok yakın hızlar elde edilinceye kadar

yinelenmiştir. Sisteme sabit bir dengeleyici basıncın uygulanması, sondadan alınan numunenin miktarını ve içindeki katı madde yüzdesini etkilediğinden çok önemlidir. Numune alma suresince sabit kalması gereken dengeleyici basıncın, örnekleme kutusunda (4) numune toplama esnasında yükseldiği gözlenmiştir ve bunun da nedeni örnekleme kutusu (4) ile derecelendirilmiş hacim-ölçerin (5) hacımlarının aynı olmayışıdır. Aynı dengeleyici basıncı örnekleme kutusuna da uyguladıktan sonra, örnekleme kutusundaki erlene toplanan numune ile hacim-ölçerde (5) toplanan numunedeki katı madde konsantrasyonlarının farklı olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, annulus'un akış alanındaki lokal hız ile sondadan akan numunenin hızı birbirine eşitlendikten sonra, numuneleri hacim-ölçerde (5) toplamanın daha doğru neticeler vereceğine karar verilmiştir. Sonuçta, gerekli dengeleyici basıncı sabit olarak sağladıktan sonra numune alma işlemi derecelendirilmiş hacim-ölçerde (5) yapılmıştır. Bu yöntem, iki boru arasındaki halkasal boşluğun ilk yarısındaki kesit alanında ve çap boyunca her yedi nokta için tekrarlanarak bu noktalardaki LKF yoğunlukları ölçülmüştür.

Böylece alınan çamur numunelerindeki LKF yoğunlukları gravimetrik bir yöntem izlenerek bulunmuştur. Bunun için, önce erlenler ve tıparları tek tek tartılarak numaralandırılmıştır. Her nokta için yapılan ölçümlerde, bir miktar numune erlenin içinde toplanmış ve kendi kapağı ile kapatılarak tartılmıştır. Daha sonra tıpası çıkartılarak etüve konmuş ve yaklaşık 105 °C sıcaklıkta kurutulmuştur. Etüvden çıkartılan erlen, kurutulmuş numunenin nem kapmasını önlemek amacıyla, derhal kapağı ile kapatılarak desikatörde soğutulmuştur. Yine kapağı ile birlikte soğutulmuş olan erlen ± 0.0001 g hassasiyetle çalışan hassas terazide tartılmıştır. Böylece numunenin içindeki katı miktarı bulunup LKF yoğunluğu hesaplanmıştır.

Erlenin darası, $W_t = a$ gram

Çamur+dara, $W_{t+w+s} = b$ gram

Felspat+dara, $W_{t+s} = c$ gram

Numunedeki felspat'ın ağırlığı = $e = (c-a)$ gram

Numunedeki feldspat'ın hacmi = $f = (e/2.4)$ cm³

Numunedeki suyun ağırlığı = $g = (b-c)$ gram

Numunedeki suyun hacmi = $j = (g / \rho_w) \text{ cm}^3$; burada ' ρ_w ' saf suyun deney sıcaklığındaki özgül ağırlığıdır.

Radyal yöndeki değişik noktalarda alınan numuneler için bu işlemler aynen tekrarlanmıştır. Daha sonra LKF yoğunluk değerlerinin kesit alanı üzerindeki ortalama değeri Simpson kuralı uygulanarak aşağıdaki Denklem (4) den hesaplanmıştır:

$$\bar{\rho}_s = \frac{\int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} \rho_s(r) r d\theta dr}{\int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} r d\theta dr} = \frac{2 \int_{R_1}^{R_2} \rho_s(r) r dr}{R_2^2 - R_1^2} \quad (4)$$

Karışımın ortalama taşınım yoğunluğu, $\bar{\rho}_m$, yukarıda bulunan değer kullanılarak aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanmıştır:

$$\bar{\phi}_s = \frac{\bar{\rho}_s}{\rho_r} \quad (5)$$

$$\bar{\rho}_m = \bar{\rho}_s + (1 - \bar{\phi}_s) \rho_w \quad (6)$$

Ayrıca, test bölgesinden çıkışta, annulus'un dış boru duvarında bulunan ve üzerinde küresel bir vana ihtiva eden yatay bir numune toplama hattından yaklaşık 100 mL çamur numunesi alınmıştır. Bu numunedeki katı madde yüzdesi gravimetrik yöntemle tayin edilerek karışımın ortalama taşınım yoğunluğu hesaplanmıştır. Bu değer, Denklem (6) dan hesaplanan sonuçla karşılaştırılmıştır. Deneyler sırasında besleme tankından da aynı amaçla numuneler alınarak kontroller yapılmıştır.

Eksenel sürtünmeli basınç kayıpları U-tüp manometre ile ölçülmüştür. Manometre sıvısı, özgül ağırlığı 1.59 olan CCl_4 'dür. U-tüp manometre, tek-faz deneylerinde, daha hassas sonuç alabilmek için yatayla 2.126° açı yapan bir düzlem üzerinde kullanılmıştır. İki-faz deneylerinde sürtünmeden dolayı hidrodinamik basınç farkları arttığından, U-tüp manometrenin düzlemi dik hale getirilmiştir.

DeneySEL veriler, tasarım ve modelleme çalışmalarında kullanışlı ve pratik korelasyonlar elde etmekte kullanılabilir ve literatürdeki önemli bir boşluğu

doldurması nedeniyle değerli olacaktır. Deneysel parametrelerin çalışma aralıkları Tablo B.1’de verilmiştir.

Tablo B.1. Deneysel Parametrelerin alışma Aralıkları

Ortalama parçacık çapı (μm)	72-138
Katı besleme konsantrasyonu (% v/v)	1-2
Halkasal boşluktaki (Annulus’daki) karışım hızı (U_{ann} , m/s)	0.012-0.227

C. SONUÇLAR ve İRDELEME

Bu çalışmada seyreltik su-feldspat karışımlarının düsey bir annulus içinde yukarı yönlü akışları incelenmiştir. Radyal LKF yoğunlukları deneysel olarak izokinetik örnekleme yöntemi ile llmştir. İzokinetik olmayan şartlarda da llen LKF yoğunlukları izokinetik şartlardaki değerlerle karşılaştırılmıştır. Literatürde bu tür sistemler için deneysel veriler, çok-fazlı akışların karmaşıklığından ve deneysel zorluklardan dolayı oldukça kısıtlıdır.

nce tek-faz (su) ile deneyler yapılarak, deney düzeneğinin hassasiyeti saptanmıştır. Tek-faz deneylerinde, yatayla 2.126° açı yapan bir düzlem üzerine sabitlenen U-tp manometrenin iki ucu test bölgesinin giriş ve çıkışı arasına bağlanarak eksenel sürtünmeli basınç kayıpları değişik su hızlarında llmştir. Deneysel şartlarındaki teorik sürtünme katsayıları da hidrodinamik basınç kayıpları kullanılarak aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Laminar akış için:

$$f_w = \frac{16}{\text{Re}_w} \phi_a \quad (7)$$

Denklem (7) deki ϕ_a düzeltme faktörü, hidrolik çap yaklaşımını laminar akış bölgesinde kullanmaktan oluşacak hatayı gidermektedir. ϕ_a ’nın sayısal değeri iç boru

çapının dış boru çapına oranı 0.345 olan bir annulus için, $\phi_a = 1.48$ dir (McCabe, 1993).

$$\Delta P_w = \frac{32 \mu_w L U_{ann}}{D_e^2} \quad (8)$$

Türbülanslı (kargaşalı) akış için:

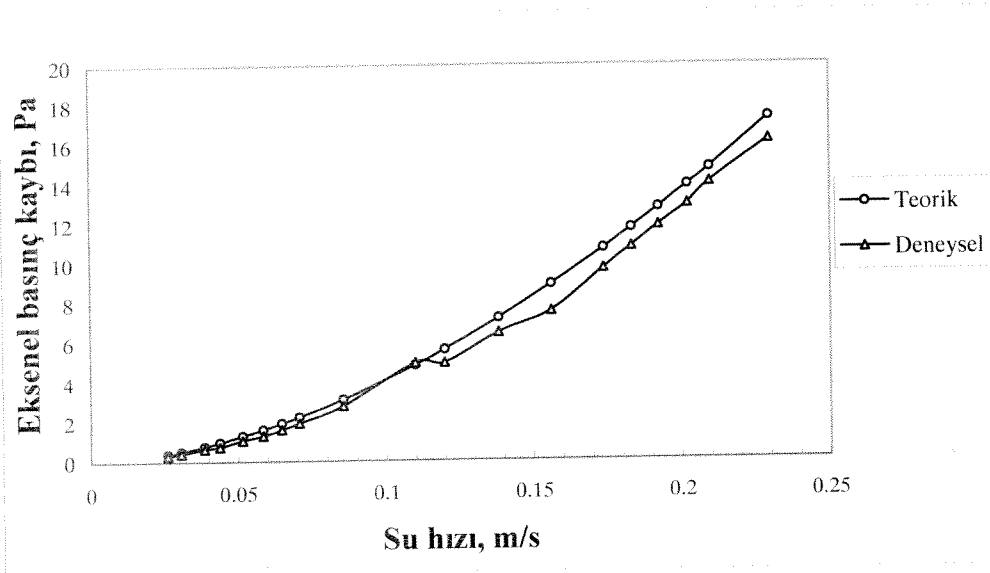
$$f_w = \frac{0.0791}{Re_w^{0.25}} \quad (9)$$

$$\Delta P_w = \frac{2 f_w L U_{ann}^2 \rho_w}{D_e} \quad (10)$$

Teorik ve deneysel sürtünme katsayıları arasındaki hata %7 ile %19 arasında değişmektedir (Tablo C.1). Düşük Reynolds sayılarında eksenel hidrodinamik basınç kayıplarının değerleri de çok küçük olduğundan, bu basınç kayıplarının ölçümlerindeki hata yüzdesi daha fazladır. Karışım hızına karşılık eksenel hidrodinamik basınç kaybı grafiği Şekil C.1 de verilmiştir.

Tablo C.1. Tek-faz deneyler için sürtünme katsayıları

$U_{ann} \times 10^3$, m/s	f_c (Denklem-7 veya 9'dan) $\times 10^3$	f_p (hidrodinamik basınç kaybı verilerinden, Denklem-10 kullanılarak) $\times 10^3$	Sürtünme katsayısındaki % hata
26.2	11.5	9.4	19
30.8	11.1	9.1	18
38.7	10.5	8.6	18
43.9	10.1	7.8	23
51.6	9.7	8.1	17
58.5	9.4	7.5	20
64.8	9.2	7.7	16
70.7	9.0	7.8	14
85.5	8.5	7.7	10
110.0	8.0	8.2	2
120.0	7.8	6.9	12
138.2	7.5	6.8	10
156.1	7.3	6.2	15
173.7	7.1	6.4	9
183.1	7.0	6.4	8
192.2	6.9	6.4	7
202.1	6.8	6.3	7
209.5	6.7	6.4	5
229.6	6.6	6.1	7



Şekil C.1. Tek-faz deneyler için teorik ve deneysel hidrodinamik basınç kayıpları (ΔP_w).

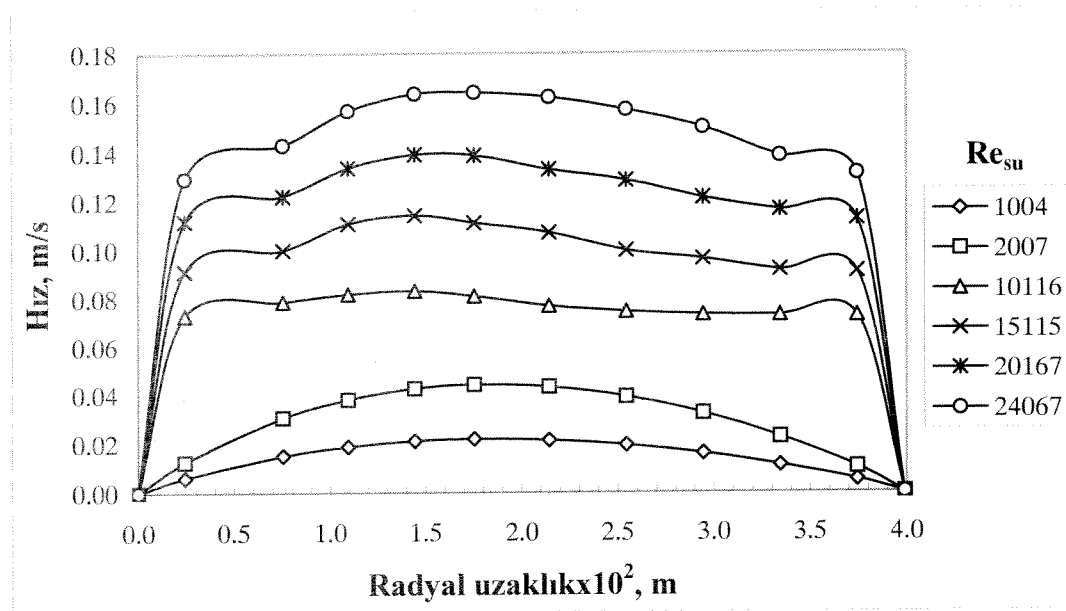
İki-faz eksenel sürtülmeli basınç kayıpları denklem (11) den hesaplanmıştır:

$$\Delta P_{tp} = g (\rho_{CCl_4} - \bar{\rho}_m) \Delta H_{tp} \quad (11)$$

Denklem (11) de, ΔP_{tp} iki-faz eksenel sürtülmeli basınç kaybını, $\bar{\rho}_m$ karışımın akış anında ve test bölgesindeki ortalama yoğunluğunu, ve ΔH_{tp} ise manometre diferansiyelini ifade etmektedir. Burada, akış sırasında test kesitinde ölçülen noktasal LKF yoğunluklarının kesit alanı üzerindeki ortalama değeri $\bar{\rho}_s$ Denklem (4) den hesaplandıktan sonra Denklem (5) ve (6) da yerine konarak elde edilen $\bar{\rho}_m$ değeri Denklem (11) de kullanılmıştır. Test kesitinde bulunan bu değer 2 m uzunluğundaki test bölgesinin her kesitinde aynı olduğu varsayılmıştır. Deney düzeneğinde, manometre kollarının katı parçacıklarla tıkanmaması için, manometrelere cam balonlar bağlanmıştır. Aralıklarla cam balonların altındaki plastik borular açılarak biriken katılar temizlenmiştir. Böylece manometre bağlantılarında oluşabilecek tıkanıklıklar önlenmiştir.

Annulus'un test kesitindeki noktasal hızlar, örnekleme sondasının bir pitot tüp olarak kullanılmasıyla daha önce 'Deney Yöntemi' bölümünde de açıklandığı

gibi ölçülmüştür. Noktasal hızlar literatürde yer alan pitot tüp denkleminden (Denklem 1) hesaplanmıştır (McCabe, 1993). Bu denklemdeki ΔP_{im} (pitot tübün uç noktasındaki basınç ile aynı düzlemdeki statik basınç arasındaki fark) değerlerini daha hassas ölçebilmek için manometre sıvısı özgül ağırlığı karbondioksitten daha küçük olan karbondioksit ve benzen karışımı (%50 +%50 hacimsel) seçilmiştir. Bu karışım, suda çözünmediği için amaca uygun bulunmuştur. Karışımın yoğunluğu piknometre ile 1218.5 kg/m^3 olarak ölçülmüştür. Pitot tübün uç noktasındaki basınç ile aynı düzlemdeki statik basınç arasındaki fark, test kesitinde çap boyunca 10 değişik noktada ölçüldükten sonra Denklem (1) den o noktalardaki lokal hızlar bulunmuştur. Önce radyal uzaklığa karşılık pitot tüp katsayısı $K=1$ alınarak hesaplanan noktasal hızların grafikleri değişik debiler için çizilmiştir (Şekil C.2). Bu grafiklerden akış alanındaki ortalama hızların elde edilme yöntemi Bölüm B.1.c de verilmiştir. Ayrıca aynı bölümde, pitot tüp katsayısının bulunması ve doğru noktasal hızların hesaplanması açıklanmıştır.



Şekil C.2. Tek-faz (su) deneylerinde değişik Reynolds sayılarında radyal hız dağılımları

İzokinetik yöntemle LKF yoğunluk ölçümlerinde kullanılan dijital basınç göstergesi (7), sisteme uygulanan sabit dengeleyici basıncı iki ondalık basamağa kadar göstermektedir. Üç ya da tercihen dört ondalık basamak gösteren bir basınç

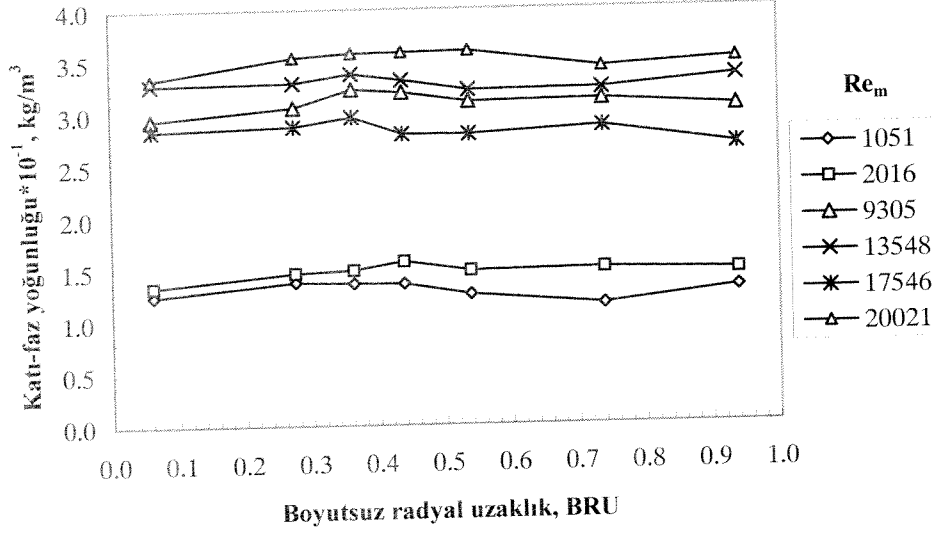
göstergesinin, LKF yoğunluğu ölçümlerindeki hassasiyeti arttıracığı düşünülmektedir. Ayrıca bu şekilde, annulus'un çapı boyunca her noktadaki hız ile örnekleme sondasi içindeki numune toplama hızlarının eşitlenmesinde uygulanan deneme-yanılma metodundaki gerekli sınıma sayısı azalacağından deneyler daha seri olarak yapılabilecektir.

Radyal yönde LKF yoğunlukları, kapalı-devre düzeneğin alt kısmından 6.71 m yukarıda ve tam gelişmiş akış bölgesindeki bir kesitte annulus'un çapı boyunca yedi değişik noktada; iki değişik katı-parçacık boyutu, iki değişik katı besleme konsantrasyonu ve altı değişik Reynolds sayısı için ölçülmüştür. Sonuçlar Şekil C.3.a ve C.10.b arasında sunulmuştur. Reynolds sayısı parametre alınarak, boyutsuz radyal uzaklığa $\lambda=(R-R_1)/(R_1-R_2)$ karşılık gelen LKF yoğunlukları, Şekil C.3.a ve C.10.a arasında gösterilmiştir. Radyal uzaklık parametre alınarak, Reynolds sayısına karşılık LKF yoğunlukları Şekil C.3.b ve C.10.b arasında verilmiştir.

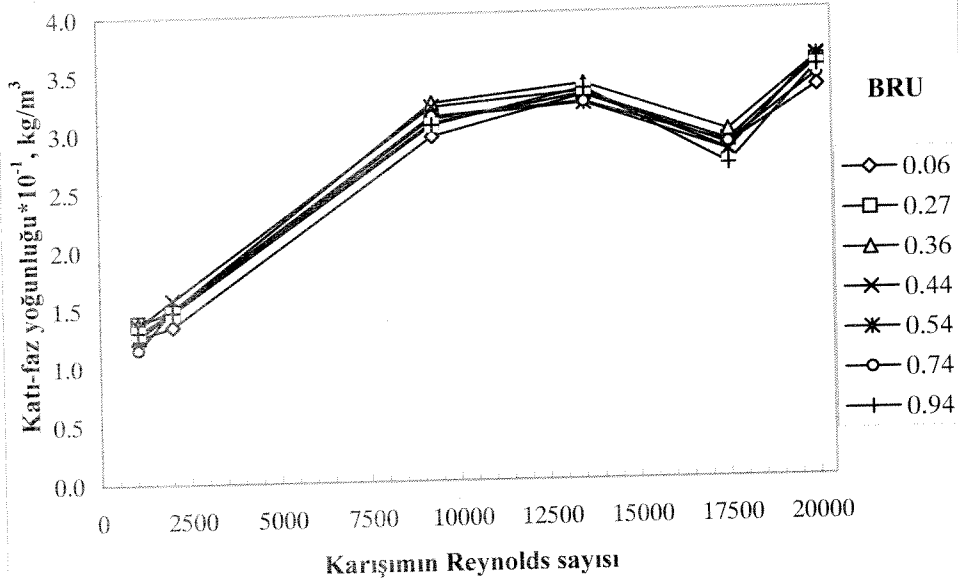
Parçacık çapı 72 μm olan katıların düşük katı besleme konsantrasyonunda (%1 v/v) ve *izokinetik olmayan şartlarda* ölçülen LKF yoğunluklarının, sabit karışım Reynolds sayısında, test kesiti boyunca radyal yönde fazla değişmediği gözlemlenmiştir. Radyal uzaklık sabit tutulduğunda ise, her noktada LKF yoğunlukları karışımın Reynolds sayısının artışı ile artan değerler göstermiştir. $Re_m=13548$ 'den sonra ise noktasal yoğunlukların $Re_m=17546$ 'ya kadar azaldığı ve tekrar arttığı görülmüştür (Şekil C.3.a ve C.3.b).

Aynı şartlarda ($d_p = 72 \mu\text{m}$ ve $C_f = \%1 \text{ v/v}$) *izokinetik* yöntem uygulanarak yapılan deneylerde, LKF yoğunlukları artan karışım Reynolds sayısı ile artmaktadır (Şekil C.4.a ve C.4.b). Bu davranışı şöyle açıklamak mümkündür: pompanın hızı arttırıldıkça deney düzeneğinin alt kısımlarında çökelen katı madde miktarı azalmakta ve daha fazla katı madde yukarı bölgeye taşınabilmektedir (Özbelge ve Beyaz, 2001). LKF yoğunluk değerlerinde daha yüksek Reynolds sayılarında $\lambda=0.44$ civarında görülen azalma, Re_m sayısı 13674 iken $\lambda=0.36$ olan boyutsuz radyal uzaklıkta görülmüştür. Bu durum, proje yöneticisinin aynı sistem için yaptığı modelleme çalışmalarıyla uyumlu bulunmuştur (Eraslan ve Özbelge, 2003). Ayrıca her iki duvara yakın bölgelerde, lokal katı-faz yoğunlukları artarak yüksek değerlere ulaşmaktadır. Sondanın et kalınlığı nedeniyle duvarlarda ölçülemeyen yoğunluk değerlerinin $\lambda=0$ ve $\lambda=1$ de sıfır olduğu farzedilebilir. Bu sonuca, literatürde de düşey

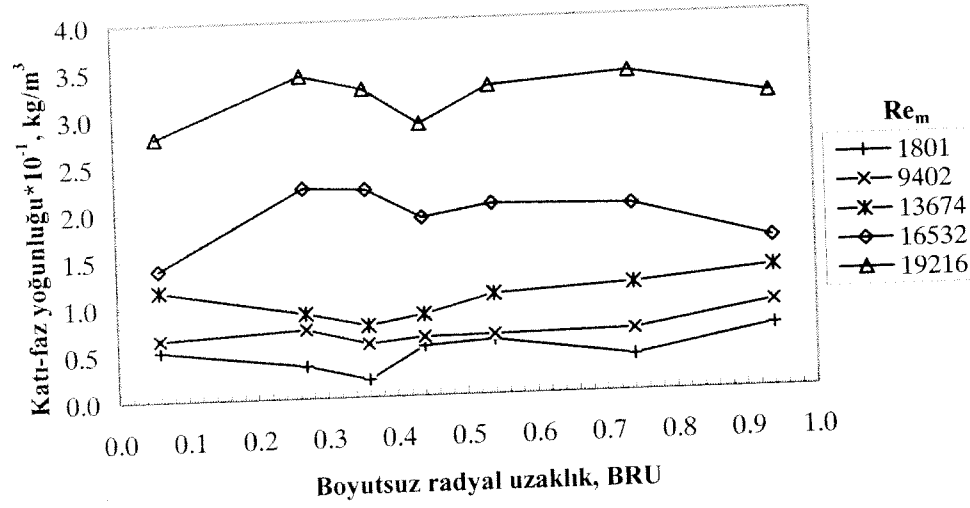
borulardaki yukarı yönlü katı-sıvı akışlarında benzer şekillerdeki radyal katı-faz dağılımları gözlemlenerek ulaşılmıştır (Alajbegoviç ve arkadaşları, 1994; Furuta ve arkadaşları, 1978).



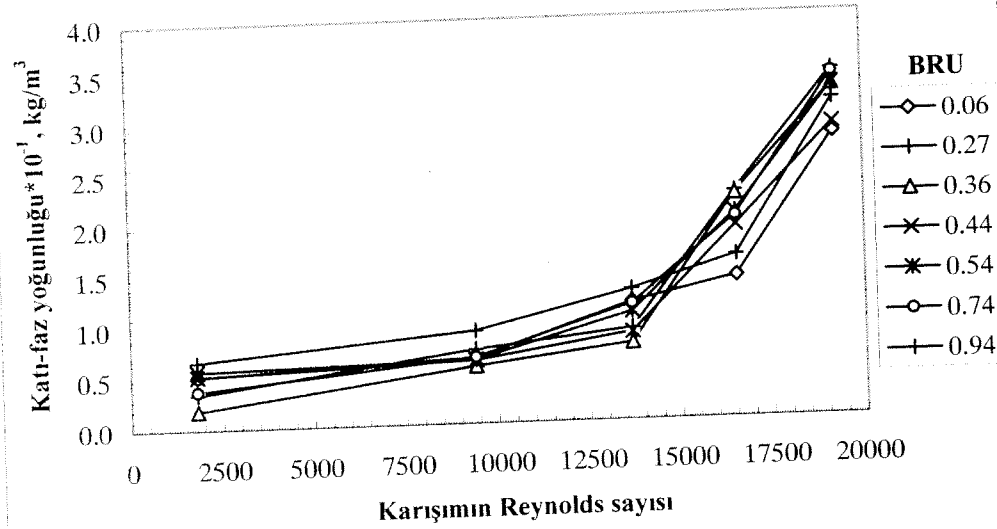
Şekil C.3.a. Parçacık büyüklüğü $d_p=72 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%1$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik olmayan şartlarda* ve değişik Reynolds sayılarında ölçülen boyutsuz radyal uzaklık parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$)



Şekil C.3.b. Parçacık büyüklüğü $d_p=72 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%1$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik olmayan şartlarda* ve değişik boyutsuz radyal uzaklıklarda ölçülen karışımın Reynolds sayısı parametresine karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$)

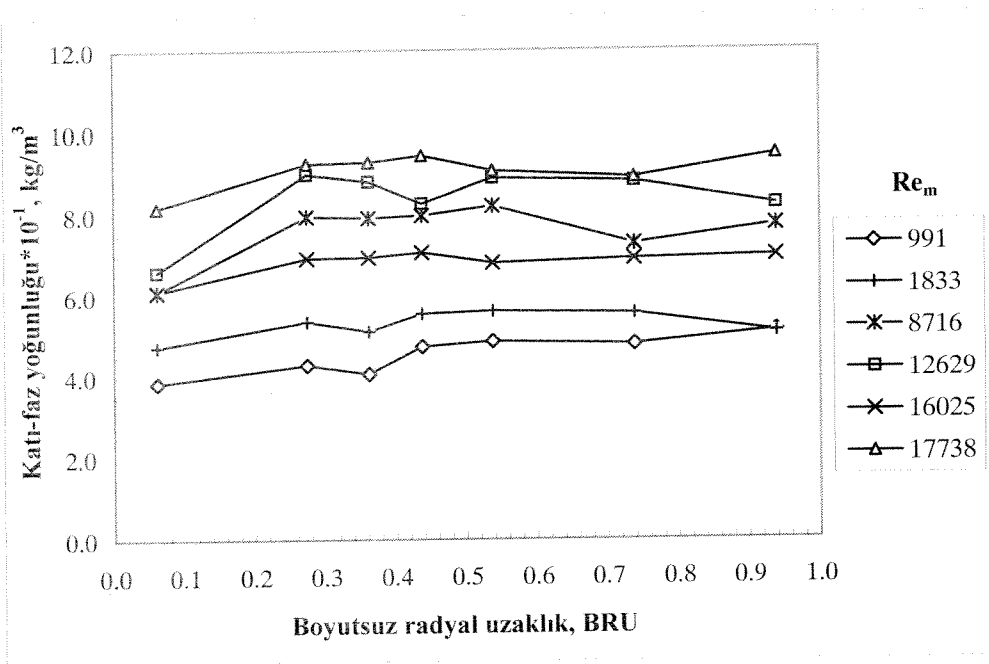


Şekil C.4.a. Parçacık büyüklüğü $d_p=72 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%1$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik şartlarda* ve değişik Reynolds sayılarında ölçülen boyutsuz radyal uzaklık parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$)

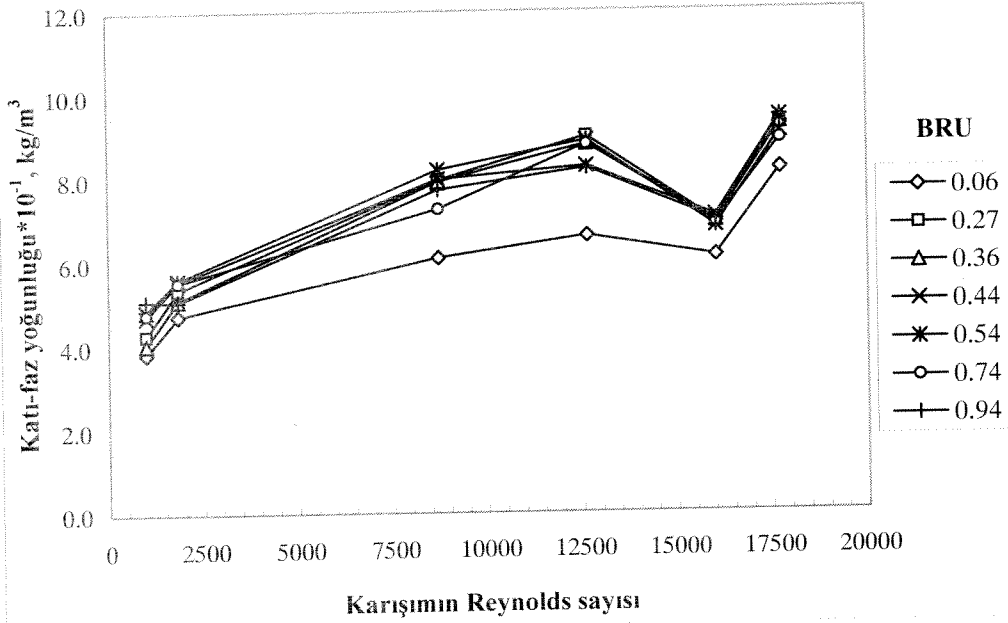


Şekil C.4.b. Parçacık büyüklüğü $d_p=72 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%1$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik şartlarda* ve değişik boyutsuz radyal uzaklıklarda ölçülen karışımın Reynolds sayısı parametresine karşılık olan lokal-katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$)

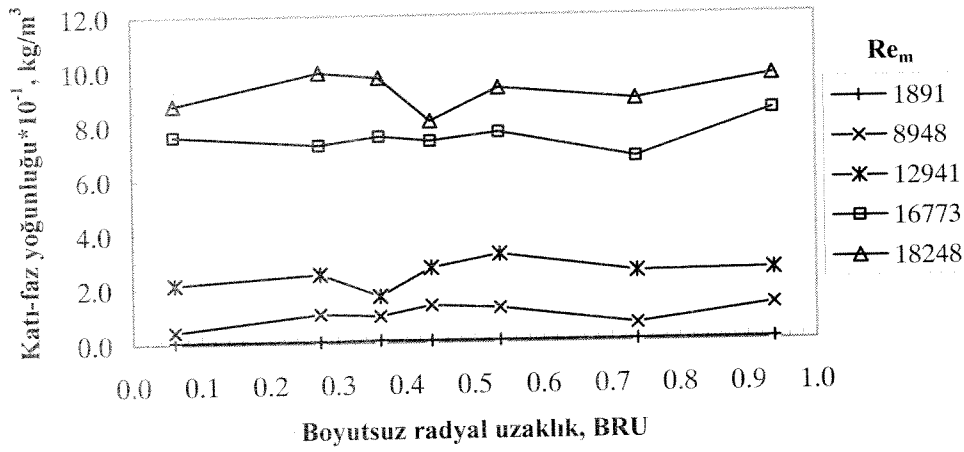
Parçacık çapı 72 μm ve katı besleme konsantrasyonu %2 (v/v) iken *izokinetik olmayan şartlarda*, Şekil C.5.a ve C.5.b de görüldüğü gibi, LKF yoğunlukları karışım Reynolds sayısı ile $Re_m=12629$ 'a kadar artmış, $Re_m=16025$ 'te bir düşme göstermiş ve sonra tekrar artmıştır. Aynı davranış önceden %1 (v/v) konsantrasyonunda da gözlenmiştir. LKF yoğunlukları genel trendi takip ederek $\lambda=0.44$ olan boyutsuz radyal uzaklıkta minimum vermiştir. Parçacık çapı 72 μm ve katı besleme konsantrasyonu %2 (v/v) iken *izokinetik şartlarda*, LKF yoğunluğu artan karışım Reynolds sayısı ile artmıştır. Şekil C.6.a ve C.6.b de görüldüğü gibi LKF yoğunlukları yaklaşık $\lambda=0.44$ olan boyutsuz bir radyal uzaklıkta azalmış, annulus'un iç ve dış duvarlarına yaklaşırken artmış ve her iki duvara çok yakın bölgelerde tekrar azalmıştır. Re_m sayısı 12941 iken, daha önce Şekil C.4.a. da açıklandığı gibi katı-faz yoğunluğu $\lambda=0.36$ olan boyutsuz radyal uzaklıkta azalma göstermiştir.



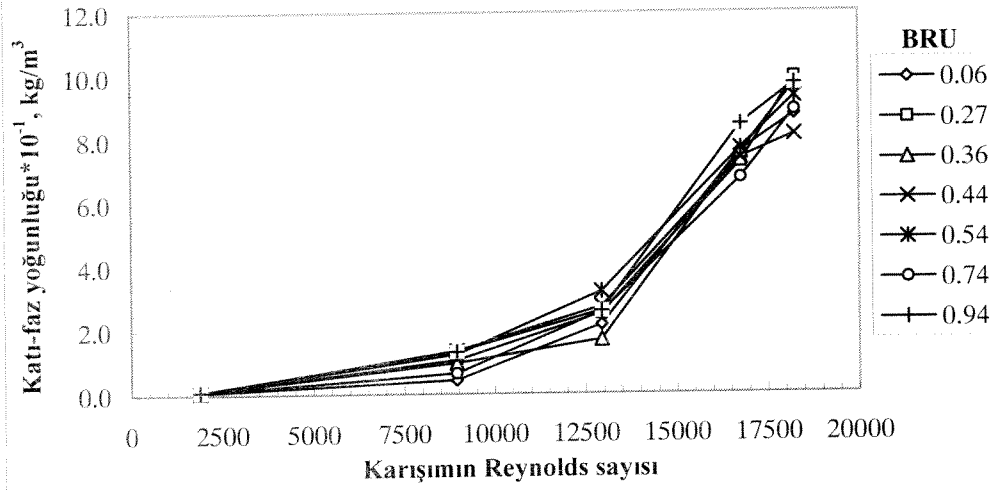
Şekil C.5.a. Parçacık büyüklüğü $d_p=72 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_r = \%2$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik olmayan şartlarda* ve değişik Reynolds sayılarında ölçülen boyutsuz radyal uzaklık parametresine karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$)



Şekil C.5.b. Parçacık büyüklüğü $d_p=72 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%2$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik olmayan şartlarda* ve değişik boyutsuz radyal uzaklıklarda ölçülen karışımın Reynolds sayısı parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$)

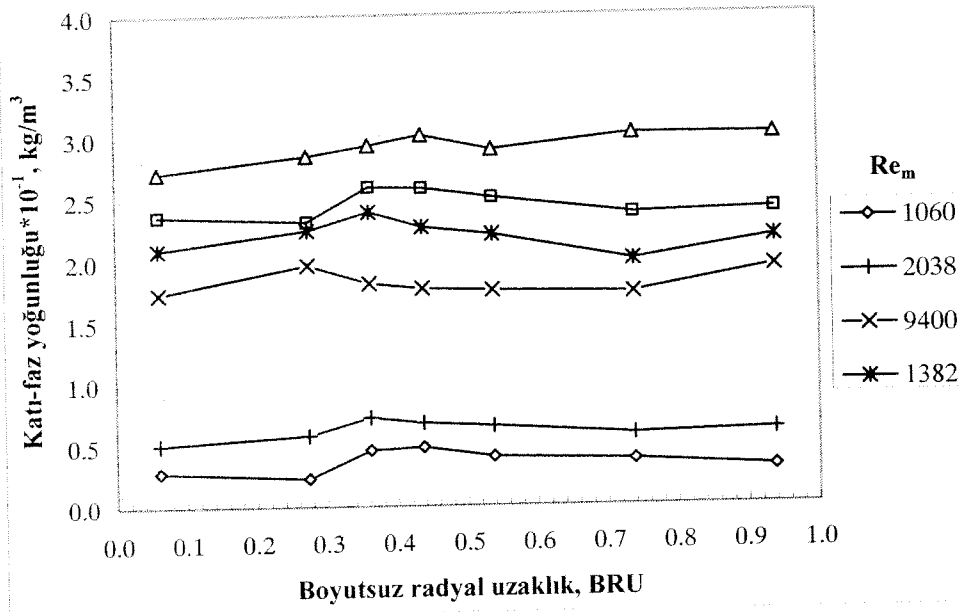


Şekil C.6.a. Parçacık büyüklüğü $d_p=72 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%2$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik şartlarda* ve değişik Reynolds sayılarında ölçülen boyutsuz radyal uzaklık parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$)

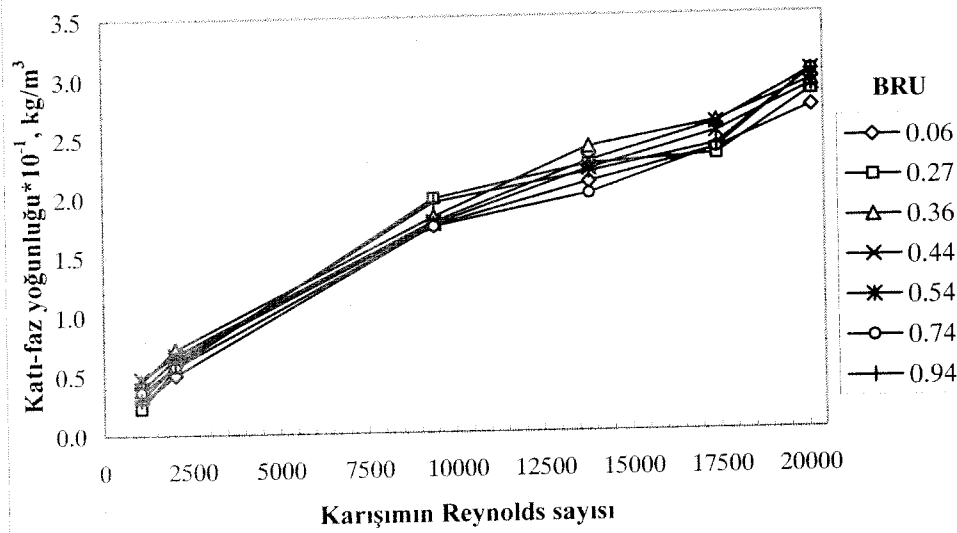


Şekil C.6.b. Parçacık büyüklüğü $d_p=72 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%2$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik şartlarda* ve değişik boyutsuz radyal uzaklıklarda ölçülen karışımın Reynolds sayısı parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$)

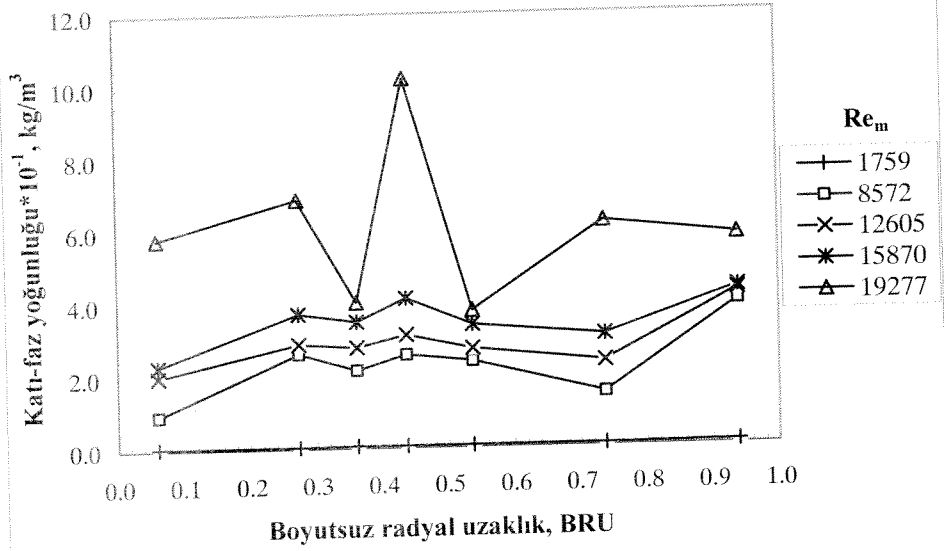
Parçacık çapı $138 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $\%1$ (v/v) iken *izokinetik olmayan şartlarda*, katı-faz yoğunlukları sabit karışım Reynolds sayısında radyal yönde pek değişmemiştir (bkz. Şekil C.7.a). Şekil C.7.b de bahsedilen LKF yoğunlukları $Re_m=13824$ e kadar artmış, $Re_m=17443$ te azalarak $Re_m=20131$ de tekrar artmıştır. Şekil C.8.a da görüldüğü gibi, parçacık çapı $138 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $\%1$ (v/v) iken *izokinetik şartlarda*, karışım Reynolds sayısı parametre alındığında, LKF yoğunlukları değişik bir trend izleyerek, yaklaşık $\lambda=0.36$ ve 0.54 olan boyutsuz radyal uzaklıklarda azalmış ve $\lambda=0.44$ te belirgin bir artış göstermiştir. Bu eğilim, karışımın ($138 \mu\text{m}$ parçacıkların 1% v/v katı besleme yüzdesinde) türbülanslı akış karakteristiğinin deneysel parametrelerin diğer kombinasyonlarındaki durumlarından farklı olduğunu göstermektedir. Bu da parçacık-parçacık ve parçacık-türbülanslı akış etkileşimlerinin diğer deney şartlarındakilerden farklı olmasından kaynaklanabilir. Şekil C.8.b'de boyutsuz radyal uzaklık parametre olarak alındığında ise, LKF yoğunlukları artan karışım Reynolds sayısı ile artmıştır.



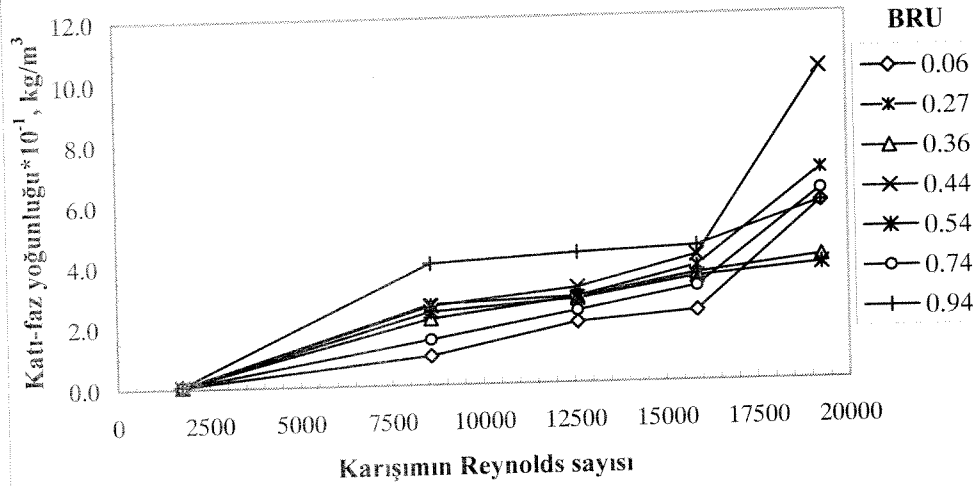
Şekil C.7.a. Parçacık büyüklüğü $d_p=138 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%1$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik olmayan şartlarda* ve değişik Reynolds sayılarında ölçülen boyutsuz radyal uzaklık parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$)



Şekil C.7.b. Parçacık büyüklüğü $d_p=138 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%1$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik olmayan şartlarda* ve değişik boyutsuz radyal uzaklıklarda ölçülen karışımın Reynolds sayısı parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$)



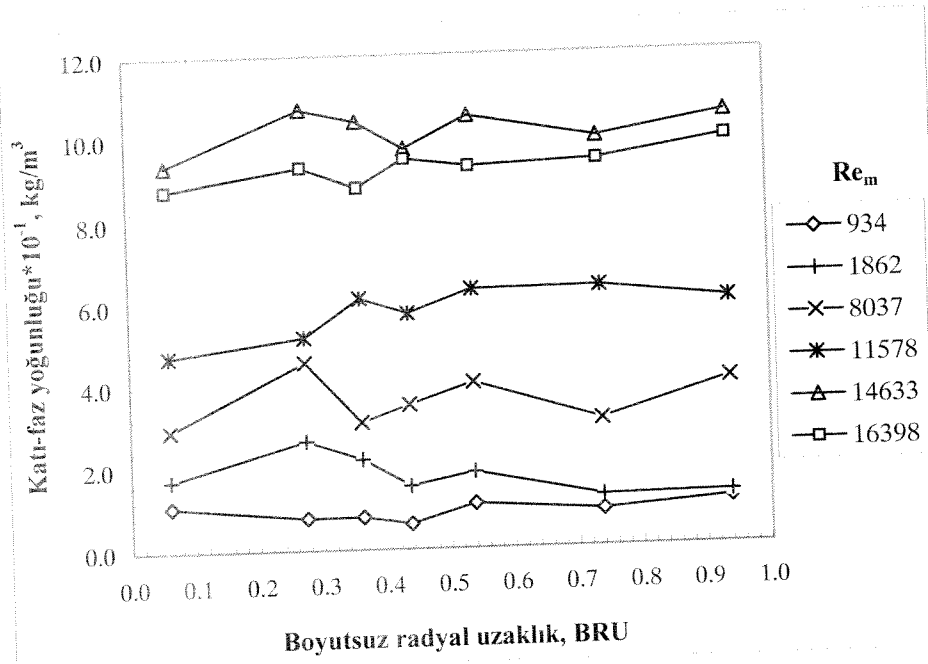
Şekil C.8.a. Parçacık büyüklüğü $d_p=138 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%1$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik şartlarda* ve değişik Reynolds sayılarında ölçülen boyutsuz radyal uzaklık parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$)



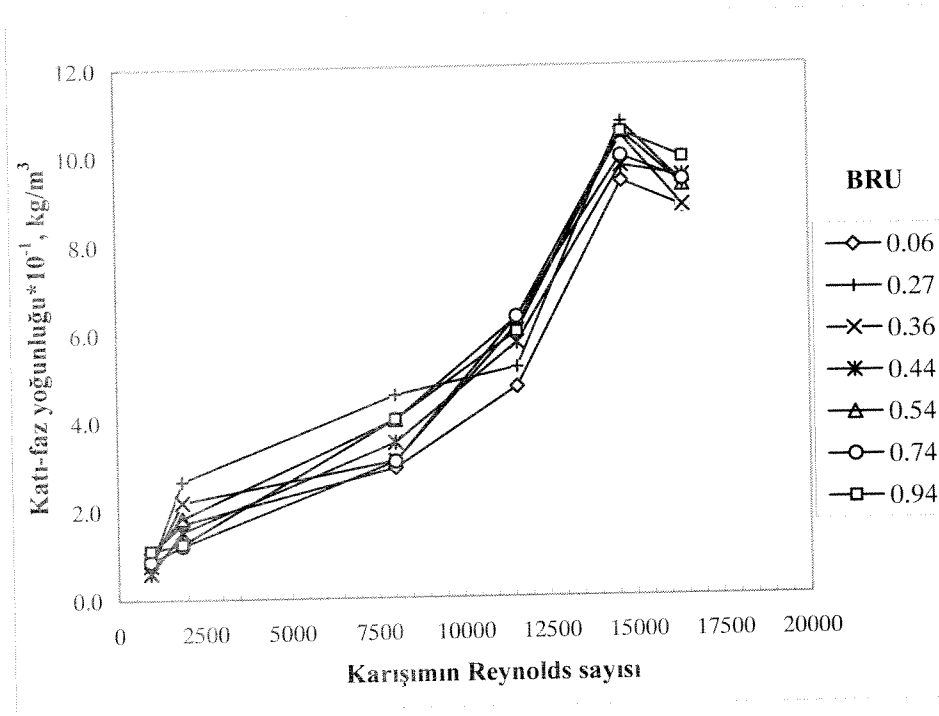
Şekil C.8.b. Parçacık büyüklüğü $d_p=138 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%1$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik şartlarda* ve değişik boyutsuz radyal uzaklıklarda ölçülen karışımın Reynolds sayısı parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$)

Şekil C.9.a ve C.9.b de parçacık çapı $138 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $\%2$ (v/v) iken *izokinetik olmayan şartlarda* ölçülen LKF yoğunlukları, boyutsuz

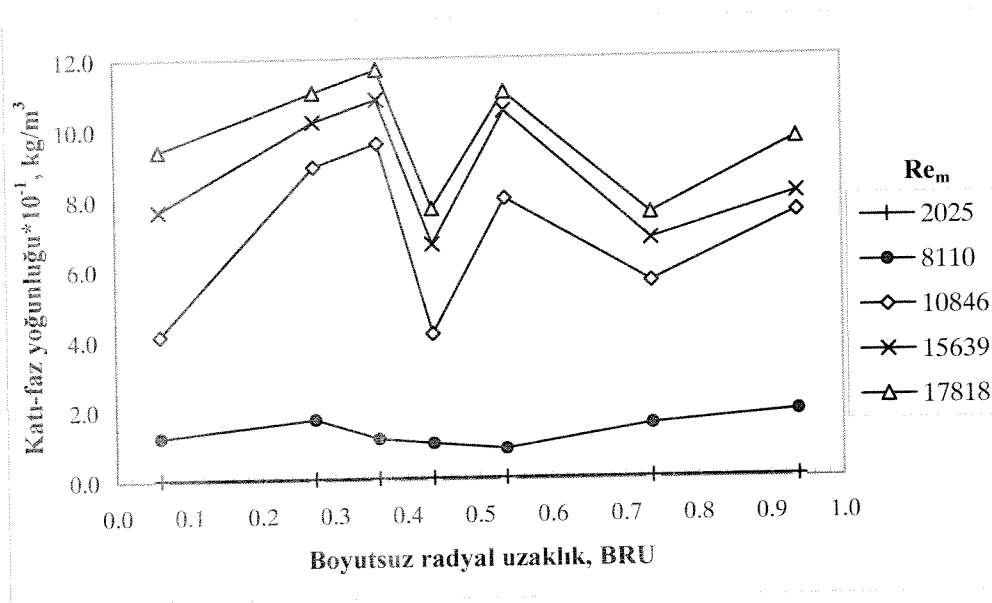
radyal uzaklık parametre olarak alındığında, karışım Reynolds sayısıyla $Re_m=14633$ 'e kadar artmış ve $Re_m=16398$ 'de düşmüştür. Karışım Reynolds sayısı sabit alındığında ise, $\lambda=0.44$ olan boyutsuz radyal uzaklıkta oluşan minimum LKF yoğunlukları her karışım hızında izlenememiştir. Bunun nedeni, izokinetik olmayan şartlarda toplanan numunelerin sondadan alınma hızlarının annulus içinde ölçüm yapılan noktadaki lokal hızlara eşit olmayışlarıdır. Şekil C.10.a ve C.10.b de görüldüğü gibi, parçacık çapı $138 \mu m$ ve katı besleme konsantrasyonu %2 (v/v) iken *izokinetik şartlarda*, LKF yoğunlukları boyutsuz radyal uzaklık sabit tutulduğunda artan karışım Reynolds sayısı ile artmıştır. Ayrıca LKF yoğunluk profilleri, $\lambda=0.44$ olan boyutsuz radyal uzaklıkta minimum vermiştir. Genel olarak LKF yoğunluğu değerleri annulus'un dış duvarında, iç duvarına nazaran biraz daha yüksek bulunmuştur. Aynı durum literatürde daha önceden rapor edilmiştir [Özbelge ve Beyaz, 2001].



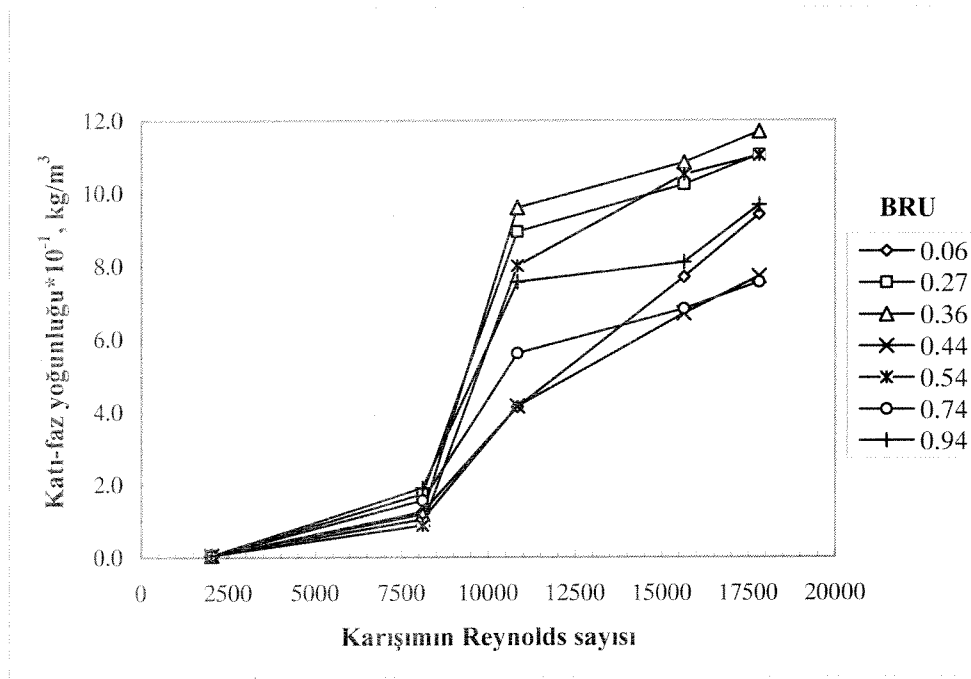
Şekil C.9.a. Parçacık büyüklüğü $d_p=138 \mu m$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%2$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik olmayan şartlarda* ve değişik Reynolds sayılarında ölçülen boyutsuz radyal uzaklık parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s * 10^{-1}$)



Şekil C.9.b. Parçacık büyüklüğü $d_p=138 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%2$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik olmayan şartlarda* ve değişik boyutsuz radyal uzaklıklarda ölçülen karışımın Reynolds sayısı parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s * 10^{-1}$)



Şekil C.10.a. Parçacık büyüklüğü $d_p=138 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_f = \%2$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik şartlarda* ve değişik Reynolds sayılarında ölçülen boyutsuz radyal uzaklık parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s * 10^{-1}$)



Şekil C.10.b. Parçacık büyüklüğü $d_p=138 \mu\text{m}$ ve katı besleme konsantrasyonu $C_t = \%2$ (v/v) olan su-felspat karışımlarının *izokinetik şartlarda* ve değişik boyutsuz radyal uzaklıklarda ölçülen karışımın Reynolds sayısı parametresine karşılık olan lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$)

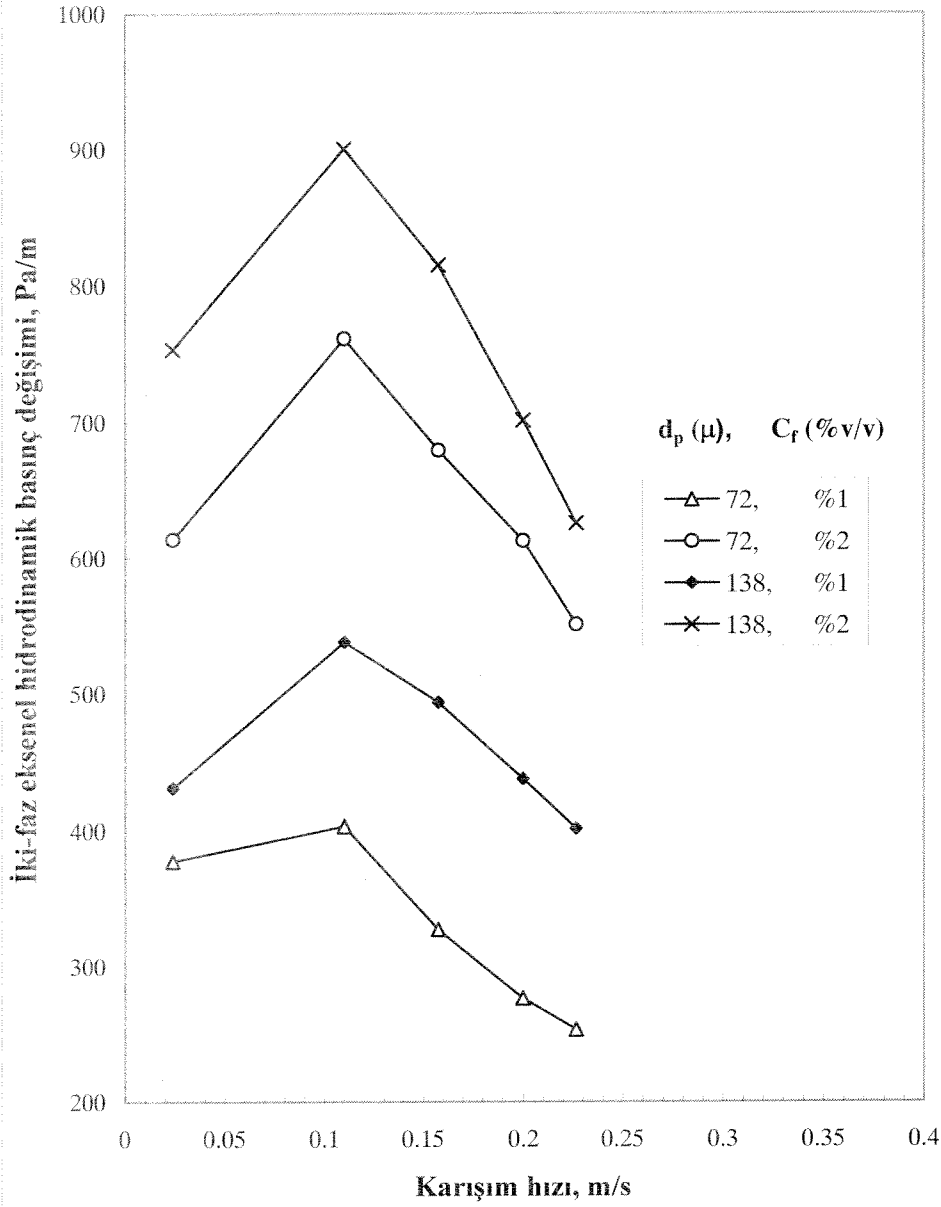
Karışım hızına karşılık, iki-faz aksenal hidrodinamik basınç değişimlerini ve hidrostatik basıncı da içeren bileşik basınç farklarının test bölgesinin uzunluğuna oranını, $\Delta P_T/L$ eşit olan toplam basınç değişimlerini gösteren grafikler sırasıyla Şekil C.11.a ve C.11.b de sunulmuştur. Grafiklerin genel olarak gösterdikleri trendler aynıdır. İki-faz ESB değişimleri, karışım hızı sabit tutulduğunda, artan katı besleme konsantrasyonu ve artan parçacık büyüklüğü ile artmaktadır. Şekil C.11.a'da $\Delta P_{tp}/L$ değerleri karışımın artan hızıyla ($Re_m \approx 9000-19000$ arasında) azalmaktadır. Tam türbülanslı akışa geçildiği düşünülen Reynolds sayısında ($Re_m \approx 9000$), $\Delta P_{tp}/L$ değerlerinde başlayan azalmanın nedeni, bu çalışmanın deneysel sonuçlarına göre katı-faz ortalama yoğunluğunun ve buna bağlı olarak karışımın ortalama taşınım yoğunluğunun, sırasıyla Şekil. C.12.a ve C.12.b'de görüldüğü gibi, artan karışım hızıyla artmaları olabileceği gibi, ayrıca literatürdeki açıklamalar ışığında, katı parçacıkların türbülanslı akışın karakteristiğini değiştirmesi sonucunda yarattığı 'sürüklenme için gerekli kuvveti azaltma' (drag reduction in turbulent flow) etkisi olabilir [Ayukawa ve arkadaşları, 1980]. Bu sonuca göre hidrolik taşınım sistemlerinde türbülanslı akış bölgesinin yüksek karışım hızlarında, içerdiği katı

madde yüzdesi artırılan sıvı-katı karışımları, oluşan düşük basınç kayıpları nedeniyle daha ekonomik olarak taşınabilecektir. Şekil C.11.b'deki bileşik basınç değişimleri ($\Delta P_T/L$), hidrostatik (durgun) basıncı içerdiğinden ve karışımın ortalama yoğunluğunun artmasıyla durgun basınç arttığından, yüksek karışım hızlarında ($Re_m > 9000$) bileşik basınç değişimlerinin karışımın artan hızıyla tekrar arttığı görülmektedir. Deneysel olarak, basınç kaybı ölçümleri aynı çalışma şartları altında birkaç kez tekrarlanmış ve maksimum hata % 7.5 olarak bulunmuştur.

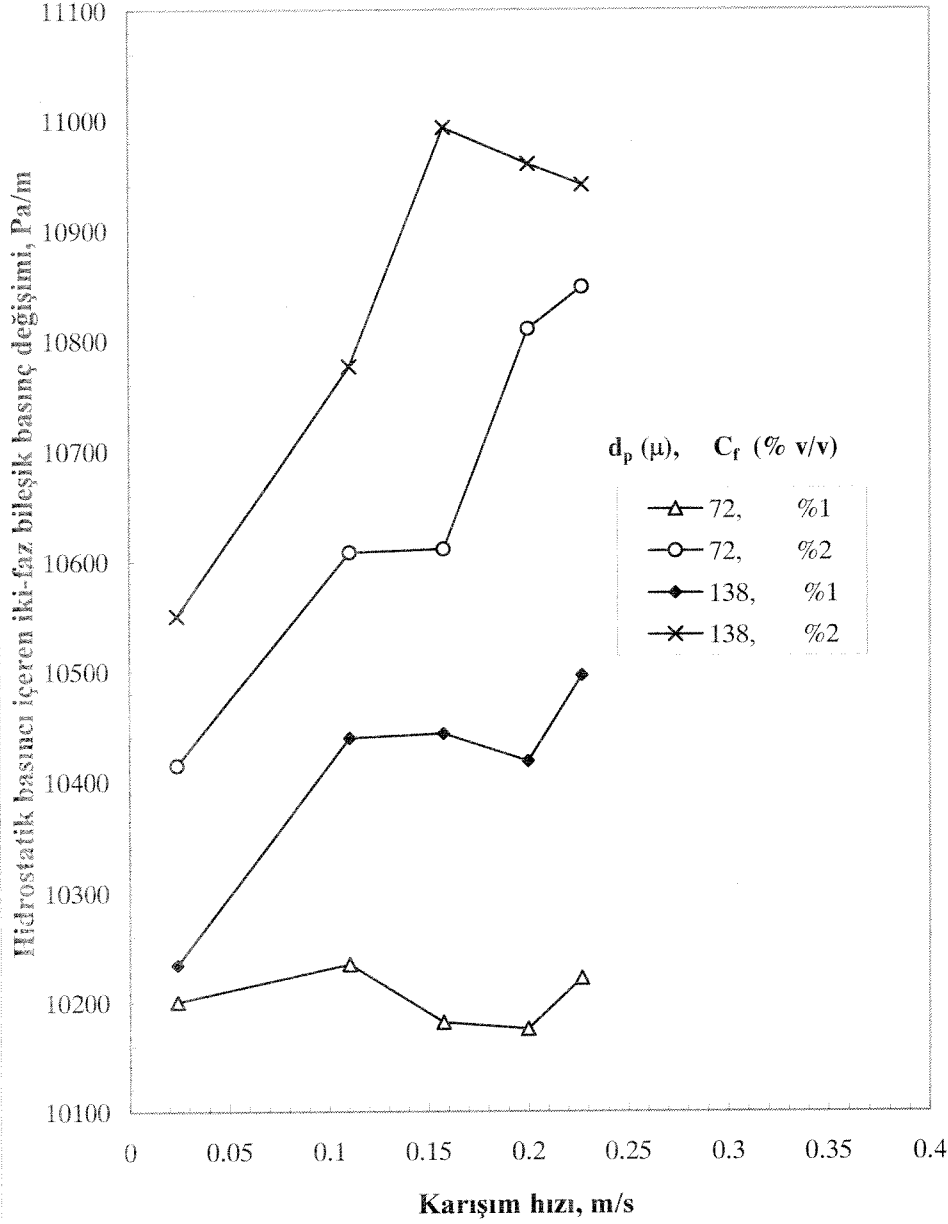
Karışım hızına karşılık iki-faz deneysel sürtünme katsayılarının (ki bunlar iki-faz hidrodinamik basınç farkları, ΔP_{ip} , kullanılarak hesaplanmış değerlerdir) grafiği Şekil C.13 te gösterilmiştir. İki-faz deneysel sürtünme katsayısının artan karışım hızıyla azalan bir eğilim verdiği gözlenmiştir. Bu da teorik olarak beklenen bir sonuçtur.

Deneysel süresince hataların bazı kaynaklardan gelmiş olabileceği düşünülmektedir. Bunlar: pompanın çalışması sırasında ana güç kaynağındaki voltaj dalgalanmaları annulus'daki akış hızlarında zaman zaman farklılıklar yaratmış olabilir; bazı katı parçacıkların manometre kollarına kaçmış olması nedeni ile manometre değerleri yanlış okunmuş olabilir; gravimetrik ölçüm yönteminde kurutulmuş katı numunelerin nem kapma olasılığı nedeniyle bazı LKF yoğunluğu sonuçlarında hata olabilir; izokinetik örnekleme ünitesinden farkedilememiş bazı gaz kaçakları olabilir, çünkü azot gazı ile sisteme uygulanan dengeleyici basınç bazen sabit tutulamamıştır. Orifismetrenin seyreltik çamur yerine su ile kalibre edilmesinden ve pitot tüp ile noktasal hızların, oluşabilecek deney zorlukları nedeniyle, su fazı için ölçülmesinden gelen toplam hata yaklaşık %6 olarak bulunmuştur.

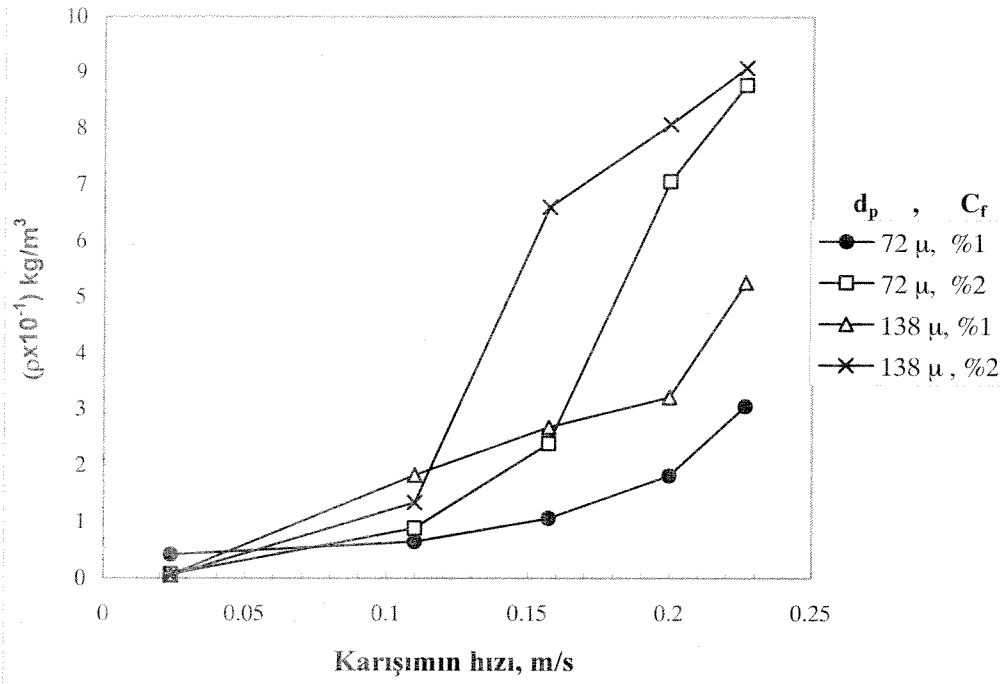
Elde edilen verilerle ortalama LKF taşınım yoğunluğunun Simpson kuralı (Fogler, 1992) kullanılarak hesaplanması Bölüm B.1.c de verilmiştir. Sonuçlar, radyal LKF yoğunluk dağılımlarından elde edilen ortalama LKF taşınım yoğunluklarının, annulus'dan ve besleme tankından alınan numunelerden hesaplanan ortalama LKF yoğunluklarıyla uyumlu olduklarını göstermiştir. Radyal LKF yoğunluk dağılım eğrilerindeki noktasal değişikliklerin izokinetik yöntemle daha doğru olarak izlendiği düşünülmektedir.



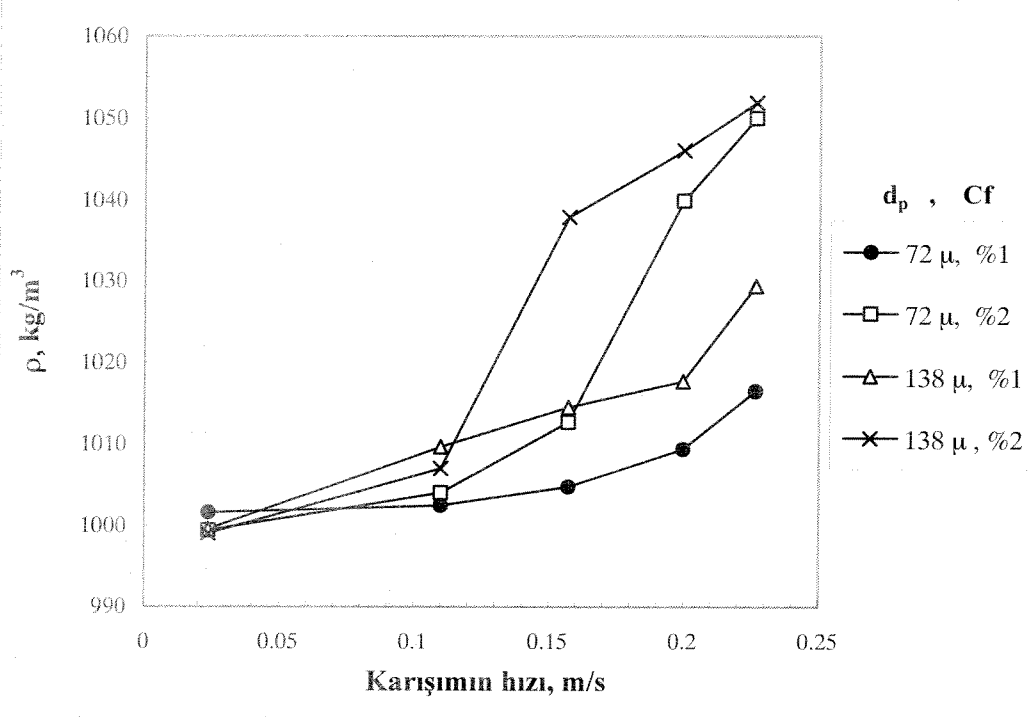
Şekil C.11.a. Parçacık büyüklüğü $d_p=72$ mikron ve 138 mikron olan su-felsspat karışımlarının *izokinetik şartlarda* karışım hızına (U_{ann}) karşılık gelen, test bölgesindeki iki-faz aksenal hidrodinamik basınç değişimleri ($\Delta P_{ip}/L$).



Şekil C.11.b. Parçacık büyüklüğü $d_p=72$ mikron ve 138 mikron olan su-felspat karışımlarının *izokinetik şartlarda* karışım hızına karşılık gelen ve test bölgesindeki hidrostatik basıncı da içeren iki-faz aksenal bileşik basınç değişimleri ($\Delta P_T/L$).

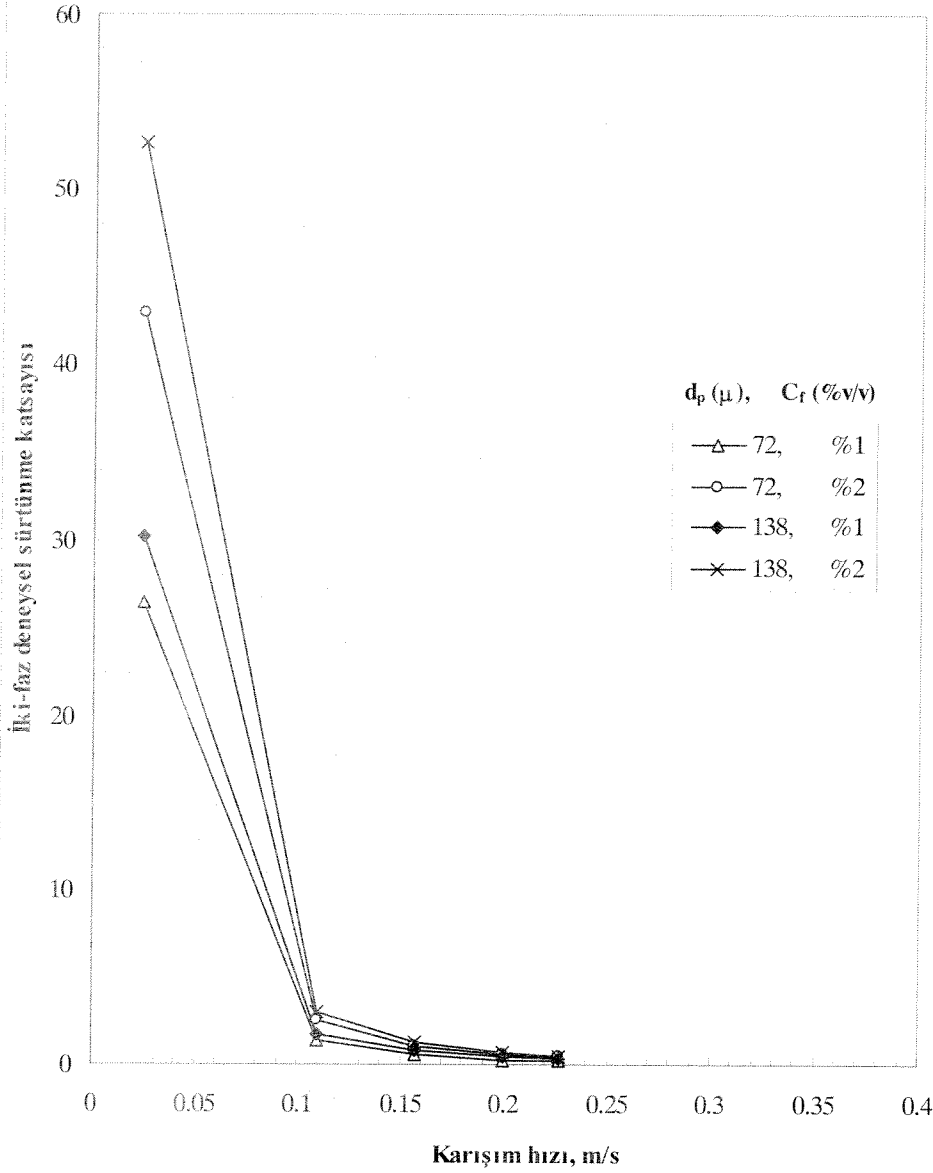


Şekil C.12.a. Karışım hızına karşılık gelen ortalama katı-faz yoğunluğu ($\rho_s \cdot 10^{-1}$)



Şekil C.12.b. Karışım hızına karşılık gelen ortalama seyreltik çamur (katı-su) taşınım yoğunluğu (ρ_m)

Karışım hızına karşılık iki-faz deneysel sürtünme katsayılarının grafiği Şekil C.13 te gösterilmiştir. İki-faz deneysel sürtünme katsayısının artan karışım hızıyla azalan bir eğilim verdiği gözlenmiştir.



Şekil C.13. Parçacık büyüklüğü $d_p=72$ mikron ve 138 mikron olan su-felspat karışımlarının *izokinetik şartlarda* iki-faz deneysel sürtünme katsayısına karşılık karışım hızı

2³ deney tasarımı doğrultusunda, parçacık boyutunun 72 ve 138 µm, katı-besleme konsantrasyonunun %1 ve %2 (v/v) ve karışım Reynolds sayısının (≈ 9000 ve 19000) seviyelerinde izokinetik veya izokinetik olmayan şartlarda gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarının Yates Algoritmasıyla (Box ve arkadaşları, 1978, sayfa 324) istatistiksel analizi yapılmıştır (Tablo 2.1.a – Tablo 2.6.c). Bu analiz neticesinde, tam gelişmiş akış bölgesinde ölçülen LKF yoğunluklarından yararlanılarak hesaplanan akış alanı üzerindeki ortalama katı-faz yoğunluk değerlerine ve ESB değişimlerine en etkin parametrenin katı-parçacık besleme konsantrasyonu (C_f) olduğu bulunmuştur. İkinci derecede önemli parametre, karışımın annulus'taki ortalama akış hızıdır (U_{ann}). En az etkili parametre ise katı parçacık çapıdır. Ayrıca birbirleri arasında etkileşimi en fazla olan iki parametre, karışımın annulus'daki ortalama hızı ile katı besleme konsantrasyonudur (bkz. Tablolar: 2.1.a - 2.3.c). Örneğin, yüksek katı-besleme konsantrasyonunda ve düşük hızlarda yapılan deneylerde katı-fazın deney düzeneğinin alt kısımlarında çökerek yukarı bölgeye taşınamaması dolayısıyla LKF yoğunluklarının küçük olması, bu etkileşimi göstererek sistemin akış karakteristiğini de ortaya koymaktadır. Sistemin alt kısımlarında oluşacak katı yığılması nedeniyle %2 v/v'den daha yüksek katı-besleme konsantrasyonlarında çalışılmamıştır. Akış hatlarında, vanalarda ve manometre bağlantılarında katıların tıkanma problemine yol açabileceği öngörülmüştür.

Radyal LKF yoğunluğu ölçümlerinde standart sapmayı bulabilmek için çap boyunca her noktada dört adet numune alınmıştır. Önce her bir ölçüm noktasındaki varyans (s_i^2 , $i = 1$ den 7 ye kadar) bulunmuş, daha sonra da yedi noktanın tamamını içeren birleştirilmiş (pooled) varyans, $V(\rho_s)$, hesaplanarak (Box ve arkadaşları, 1978, sayfa 167) bu değer in karekökü olan standart sapma değeri bulunmuştur. Ortalama katı-faz yoğunluk değerlerinin varyansı ise aşağıdaki formülle hesaplanmıştır (Box ve arkadaşları, 1978, sayfa 88):

$$\bar{s}^2 = V(\bar{\rho}_s) = V(\rho_s) / n \quad (12)$$

Burada $n = 7$, ortalaması alınan LKF yoğunluk değerlerinin sayısıdır. $V(\rho_s)$ LKF yoğunluk ölçümlerinin birleştirilmiş varyansıdır.

$$s^2 = V(\rho_s) = \frac{V_1 S_1^2 + \dots + V_7 S_7^2}{V_1 + \dots + V_7} \quad (13)$$

Yukarıda açıklanan ve deney sayısı $N = 2^3 = 8$ olan 2^3 deneysel tasarımın istatistiksel analizinde sözü edilen “etki varyansı” aşağıdaki denklemlerle hesaplanmıştır (Box ve arkadaşları, 1978, sayfa 320)

$$V(\text{etki}) = 4 \bar{s}^2 / N \quad (14)$$

$$\text{Etki'nin standart sapması} = \pm [V(\text{etki})]^{0.5} \quad (15)$$

Yukarıda verilen istatistiksel hesaplama yöntemlerini kullanarak yapılan çok sayıda hesaplamalardan sonra Denklem (15) de tanımlanan ‘Etki’lerin ve etkileşimlerin standart sapması’ $\bar{\rho}_s$ sonuçları için ± 1.2 olarak bulunmuştur (bkz. Tablo 2.1.c). Lokal katı-faz yoğunluklarından, 2. Gelişme raporunda açıklandığı gibi, hesaplanan kesit alanındaki ortalama katı-faz yoğunluk ($\bar{\rho}_s$) değerleri Yates Algoritmasında kullanılmıştır. Bunun sonucunda, en etkin parametreler ve bunların etkileşimleri bulunmuştu (bkz. Tablo 2.1.c, Tablo 2.2.c ve Tablo 2.3.c. Ayrıca bu tabloların “Tanım” sütunundaki ilk değer (ortalama), $\bar{\rho}_s$ değerlerinin istatistiksel ortalamasıdır (bkz. Tablo 2.1.c ve Tablo 2.3.c). Diğer bir deyişle, her deney için bulunan kesit alanı üzerindeki ortalama katı-faz yoğunluklarının $N = 8$ deney için olan istatistiksel ortalamasıdır ki bunun standart sapması da aşağıdaki formülle hesaplanabilir (Box ve arkadaşları, 1978, sayfa 320):

$$\text{İstatistiksel ortalamasının standart sapması} = \pm [\bar{s}^2 / N]^{0.5} \quad (16)$$

Hesaplamalar sonucunda Denklem (16) de tanımlanan ‘Ortalama’daki standart sapma’ $\bar{\rho}_s$ sonuçları için ± 0.6 olarak bulunmuştur (bkz. Tablo 2.1.c). Bu tür açıklamalar Tablo 2.3.a – Tablo 2.4.c de iki-faz sürtülmeli hidrodinamik basınç değişimlerinin ($\Delta P_p/L$) kullanıldığı Yates Algoritması tabloları için de verilebilir.

Değişik Reynolds sayılarında elde edilen sonuçlara ait birleştirilmiş (pooled) varyans değerlerine yine istatistiksel bir metod olan F-testi (Box ve arkadaşları,

1978, sayfa 121) uygulanarak bu deneylerde birleştirilmiş varyans'ın aynı olduğu varsayımının (Null hipotezi) doğruluğu araştırılmıştır. F-testi ile, türbülanslı ve laminar akışlar karşılaştırıldığında bu varsayımın doğru olmayıp, sistemdeki akış karakteristiklerinin birbirinden farklı olduğu görülmüştür (bkz. Tablo 2.7.a). Bu da beklenen bir sonuçtur. Ancak, değişik karışım Reynolds sayılarındaki iki türbülanslı akış karşılaştırıldığında, varyans değerlerinde istatistiksel bir farklılık bulunmadığından akış karakteristiklerinin değişmediği sonucuna varılmıştır (bkz. Tablo 2.7.b). Bu durum Şekil C.11.a ve C.11.b deki karışım hızına karşı basınç değişimi değerleri incelendiğinde de açıkça görülmektedir. Projenin 2. gelişme raporunda Şekil C.11.a ve C.11.b de gösterilen ve laminar akışa karşılık gelen $Re_m \approx 2000$ 'den $Re_m \approx 9000$ 'e kadar basınç değişimi değerleri artış göstermiştir. $Re_m \approx 9000$ 'den sonra ise Reynolds sayısının artışı ile $\Delta P_{ip}/L$ değerleri düşmüştür. Bu da $Re_m \approx 9000$ de türbülanslı akışa geçildiğini açıkça göstermiştir.

Ayrıca izokinetik ve izokinetik olmayan şartlarda elde edilen sonuçlar için istatistiksel bloklama tasarımı ile bir karşılaştırma yapılmış ve aralarındaki fark istatistiksel olarak incelendiğinde çok büyük bulunmamıştır. Ancak, değişik karışım hızları, bloklama tasarımının sonucuna göre beklendiği gibi istatistiksel olarak da farklı bulunmuştur (bkz. Tablo 2.8.a – Tablo 2.8.d).

D. DEĞERLENDİRME

Yukarı yönde akan su-felspat karışımlarının LKF dağılımları düşey bir annulus'un akışa dik bir kesitinde elde edilmiştir. Ayrıca aksenal sürtünmeli hidrodinamik basınç değişimleri ($\Delta P_{ip}/L$) deneysel olarak bulunmuştur. Bu çalışma ile aşağıda yer alan sonuçlara ulaşılmıştır:

1. LKF yoğunlukları $C_f = \%1$ (v/v) şartlarında, $C_f = \%2$ (v/v) şartlarından daha tekdüze bir davranış sergilemiştir. Artan katı besleme konsantrasyonu ve parçacık büyüklüğü, LKF profillerindeki farklılıkları daha belirgin kılmıştır ve bu davranış sistemin karakteristiğine bağlıdır.
2. LKF yoğunlukları, ortalama katı parçacık çapı, karışımın annulus'daki ortalama hızı, ve katı-sıvı fazların aralarındaki göreceli hızın değişimiyle farklılıklar göstermiştir.

3. LKF yoğunlukları genel olarak annulus'un dış duvarında iç duvara göre daha yüksek bulunmuştur ve bu sonuç literatürde daha önceden rapor edilmiştir (Özbelge ve Beyaz, 2001).
4. Annulus'un test bölgesi boyunca iki-faz aksenal sürtünmeli hidrodinamik basınç değişimleri (ESHB), katı parçacık çapı parametre olarak alındığında (sabit tutulduğunda) artan katı besleme konsantrasyonu ile artış göstermiştir.
5. Annulus'un test bölgesi boyunca iki-faz ESHB değişimleri, karışım hızı ve katı besleme konsantrasyonu parametre olarak alındığında artan katı parçacık çapı ile artmıştır.
6. Annulus'un test bölgesi boyunca iki-faz ESHB değişimleri, karışım hızı sabit tutulduğunda artan katı besleme konsantrasyonu ile artmıştır.
7. LKF yoğunluklarındaki artan karışım hızıyla ortaya çıkan artışlar, izokinetik örnekleme sonuçlarına göre izokinetik olmayanlardan daha tutarlıdır.
8. Profillerden hesaplanan ortalama katı-faz yoğunluk değerleri, örnekleme sondasının yaklaşık 1.3 m yukarısında bulunan bir örnekleme hattından alınan numunelerdeki değerlere oldukça yakın bulunmuştur.

E. ÖNERİLER

1. Bu çalışmada lokal hız ölçümleri eğik bir manometer ile yapılmıştır. Ancak, buna benzer küçük basınç farklarını ölçmek için daha hassas aletler kullanılması gerekmektedir. Örneğin, mikro basınç-probu daha doğru ve hassas sonuç verebilir.
2. İzokinetik sisteme uygulanan dengeleyici basıncı üç ya da tercihen dört ondalık basamağa kadar gösteren bir elektronik basınç göstergesi, radyal LKF yoğunluk ölçümlerindeki hassasiyeti arttıracaktır.
3. Radyal katı-faz yoğunluk dağılımları, izokinetik örnekleme yöntemi dışında metodlarla da elde edilebilir. Örneğin; laser metodları, mikrodalga metodu, ultrasonik metodlar, fotoğraf metodu ve video-kayıt metodları denenebilir.

KAYNAKLAR

Alajbegovic, A., Assad, A., Bonetto, F. ve Lahey Jr., R.J., 1994, "Phase distribution and turbulence structure for solid/fluid upflow in a pipe", *International Journal of Multiphase Flow*, 20, 3, 453-479.

Ayukawa, K., Kataoka, H. ve Hirano, M., 1980, "Concentration profile, velocity profile and pressure drop in upward solid-liquid flow through a vertical pipe", *Hydrotransport* 7, E2, 195-201.

Bird, R.B., Stewart, W.E. ve Lightfoot, E.N., 1960, *Transport Phenomena*, 1st ed. John Wiley and Sons, Inc., USA

Box, G.E.P., Hunter, W.G, ve Hunter, J.S., 1978, *Statistics for Experimenters*, 1st Edition, John Wiley and Sons, Inc., US.

Domnick, J., Durst, F., Raszillier, H.ve Zeisel, H., 1987, 'A Method to Measure Mass and Volume Flow Rates of Two-Phase Flow', *International Journal of Multiphase Flow*,13 (5) 685-697.

Dutta, B. ve Sastry, S.K., 1990, 'Velocity Distributions of Food Particle Suspensions in Holding Tube Flow: Distribution Characteristics and Fastest Particle Velocities', *Journal of Food Science*, 55 (6) 1703-1710.

Eraslan A.N. ve Özbelge, T.A., 2003, "Assessment of flow and heat transfer characteristics for proposed solid density distributions in dilute laminar slurry upflows through a concentric annulus", *Chemical Engineering Science*, 58, 4055-4069.

Fogler, H.S., 1992, *Elements of Chemical Reaction Engineering*", 2nd Edition, Prentice-Hall, Inc., USA:

Furuta, T., Tsujimoto, S., Toshima, M., Okazaki, M. ve Toei, R., 1978, "Concentration distribution of particles in solid-liquid two-phase flow through vertical pipe", *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 4, 105.

Karabelas, A.J., 1977, "Vertical distribution of dilute suspensions in turbulent pipe flow", *A. I. Ch. E. Journal*, 23, 4, 426-434.

McCabe, W.L., Smith, J.C. ve Harriot, P., 1993, "Unit operations of chemical engineering", 5th Edition, McGraw-Hill International Editions, Singapore.

Michaelides, E.E. & Farmer, L.K., 1984, 'A Model for Slurry Flows Based on the Equations of Turbulence', *Journal of Pipelines*, 4, 185-191

Ohashi, H., Sugawara, T., Kikuchi, K.-I. & Ishé, M., 1980, 'Average Particle Velocity in Solid-Liquid Two-Phase Flow through Vertical and Horizontal Tubes' *13 (5) 343-349.*

Özbelge, .T.A. ve Somer, T.G., 1988, "Hydrodynamic and heat transfer characteristics of liquid-solid suspensions horizontal turbulent pipe flow", *Chemical Engineering Journal*, 38, 111-122.

Özbelge, T.A. ve Beyaz, A., 1999, Seyreltik Sıvı-Katı Karışımlarının Akış Özellikleri, TÜBİTAK-INTAG 822, Rapor No: 196 I 010.

Özbelge, T.A.ve Beyaz, A., 2001, "Dilute solid-liquid upward flows through a vertical annulus in a closed loop system", International Journal of Multiphase Flow, 27, 737-752.

Rao, C.S. ve Dukler, A.E., 1971, 'The Isokinetic-Momentum Probe. A New Technique for Measurement of Local Voids and Velocities in Flow of Dispersions', Industrial Engineering Chemistry Fundamentals, 10 (3) 520-526.

Soliman, R.H. & Collier, P.B., 1990, 'Pressure Drop in Slurry Lines', Hydrocarbon Processing, 69, 60-63.

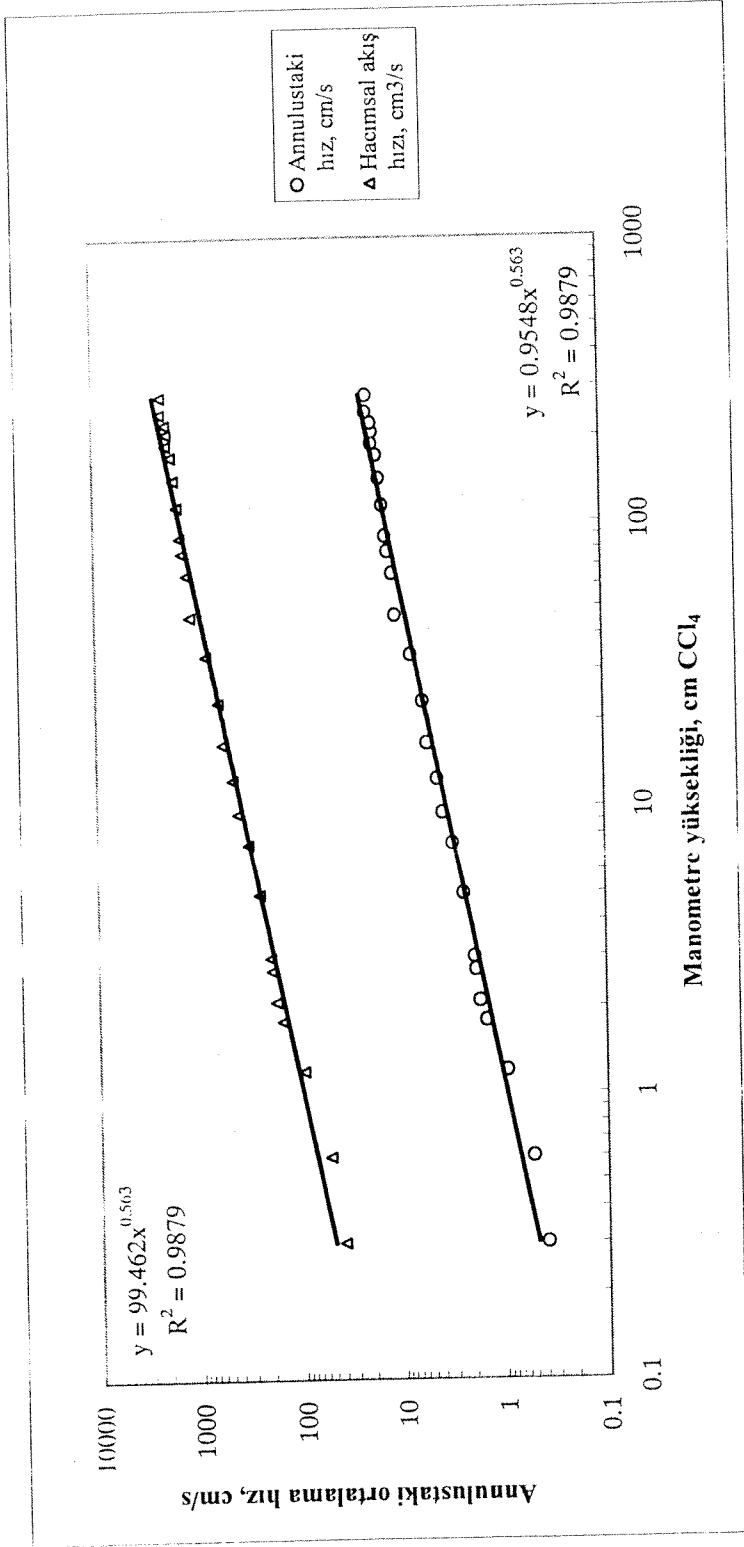
EK 1

Tablo 1.1. Orifis metre'nin kalibrasyonu

m_w , kg	t, sec	T, °C	$\mu_w \times 10^4$, Pa.s	ρ_w , kg/m ³
1.625	40.47	20.2	8.7	998.5
1.933	35.21	20.1	8.8	998.5
2.973	30.45	20.1	8.8	998.5
3.948	25.69	20.0	8.8	998.5
3.638	20.47	19.8	8.9	998.5
3.892	20.12	19.8	8.9	998.5
3.703	18.41	19.7	8.9	998.5
3.456	13.74	19.6	8.9	998.6
4.798	15.11	19.4	9.0	998.6
5.919	14.97	19.5	9.0	998.6
6.423	14.56	19.3	9.0	998.6
7.978	14.57	19.1	9.1	998.6
8.503	14.18	18.8	9.2	998.7
10.864	13.97	18.5	9.3	998.7
12.517	11.43	18.3	9.4	998.7
11.91	10.24	18.4	9.4	998.7
12.509	9.76	18.2	9.4	998.8
12.235	9.13	18.0	9.5	998.8
12.666	8.86	17.7	9.6	998.8
12.434	8.14	17.8	9.6	998.8
12.042	7.45	17.9	9.5	998.8
13.15	7.36	17.7	9.6	998.8
12.545	7.14	17.5	9.7	998.9
12.668	6.94	17.4	9.7	998.9
13.846	6.75	17.2	9.8	998.9
12.671	6.25	17.5	9.7	998.9

Tablo 1.1. Orifismetre'nin kalibrasyonu (Devam)

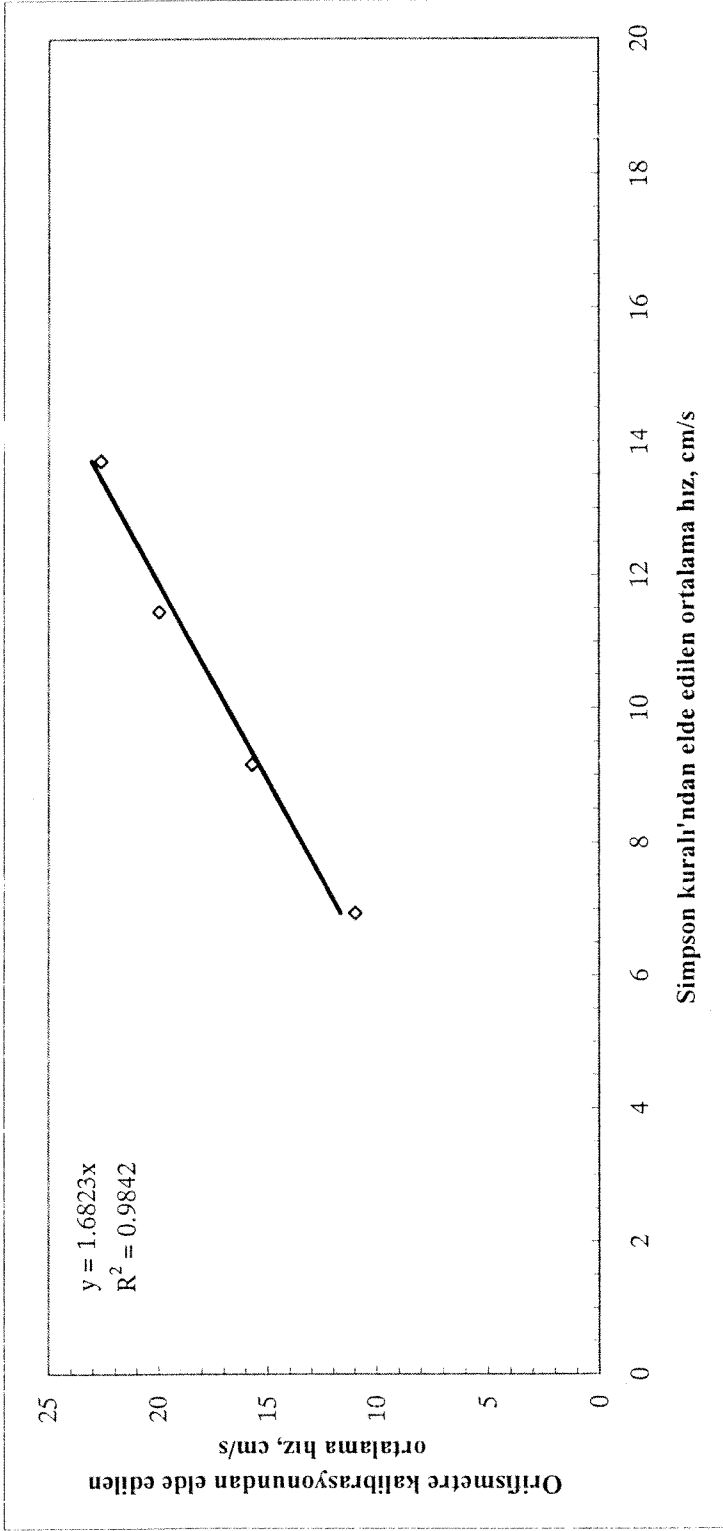
$T, ^\circ\text{C}$	$\dot{m} \times 10^2,$ kg/s	$\dot{Q} \times 10^6,$ m^3/s	$U_o \times 10^3, \text{m/s}$	$U_{\text{ann}} \times 10^3,$ m/s	Re_w
20.2	4.0	40.2	120.1	3.9	352
20.1	5.5	55.0	164.2	5.3	480
20.1	9.8	97.8	292.0	9.4	853
20	15.4	153.9	459.6	14.8	1338
19.8	17.8	178.0	531.5	17.1	1535
19.8	19.3	193.7	578.4	18.6	1671
9.7	20.1	201.4	601.5	19.3	1731
19.6	25.2	251.9	752.1	24.2	2156
19.4	31.8	318.0	949.5	30.5	2702
19.5	39.5	396.0	1182.3	38.0	3377
19.3	44.1	441.8	1319.0	42.4	3739
19.1	54.8	548.3	1637.2	52.6	4606
18.8	60.0	600.5	1793.0	57.6	4987
18.5	77.8	778.7	2325.0	74.8	6396
18.3	109.5	1096.5	3274.0	105.3	8940
18.4	116.3	1164.6	3477.2	111.8	9530
18.2	128.2	1283.3	3831.7	123.2	10424
18	134.0	1341.7	4006.2	128.9	10819
17.7	143.0	1431.3	4273.6	137.4	11415
17.8	152.8	15293.5	4566.4	146.8	12242
17.9	161.6	1618.3	4832.1	155.4	13002
17.7	178.7	1788.8	5341.1	171.7	14267
17.5	175.7	1759.0	5252.2	168.9	13928
17.4	182.5	1827.5	5456.5	175.4	14417
17.2	205.1	2053.6	6131.6	197.1	16084
17.5	202.7	2029.7	6060.4	194.9	16071



Şekil 1.1. Orifis metre için kalibrasyon eğrisi

$$U_{ann} = 0.9548(\Delta H_{CCl_4})^{0.563}$$

$$Q = 99.462(\Delta H_{CCl_4})^{0.563}$$



Şekil 1.2. Pitot tüp katsayısı

Pitot tüp katsayısı=1.6823

Tablo 1.2.a. Noktasal hız ölçümlerindeki (K=1) manometre farkları ($Re_w = 24067$)

$rx10^4, m$	$\Delta H_{im}x10^2, m TF$					
24.5	21.1	22.2	23.4	24.3	24.7	25.3
75.5	25.6	26.8	27.8	28.5	31.3	32.2
109.5	32.1	33.7	34.3	35.1	35.4	36.2
144.5	35.1	36.6	37.5	38.1	38.8	39.4
175.5	35.3	36.8	37.9	38.3	39.1	39.6
214.5	34.7	35.8	36.7	37.6	37.9	38.5
254.5	32.1	33.2	34.2	35.6	36.1	36.4
294.5	30.3	30.8	31.3	31.8	32.2	32.6
334.5	25.5	25.9	26.5	26.9	27.6	28.4
374.5	22.5	23.0	23.7	24.6	25.0	25.8

Tablo 1.2.b. $Re_w = 24067$ için yaklaşık (K=1) hız değerleri

$rx10^4, m$	$V_Lx10^3, m/s$						$s_vx10^3, m/s$
24.5	122.5	125.6	128.9	131.5	132.5	134.1	4.4
75.5	135.0	138.1	140.6	142.4	149.3	151.4	6.4
109.5	151.1	154.9	156.3	158.1	158.8	160.6	3.3
144.5	158.0	161.4	163.4	164.6	166.1	167.4	3.4
175.5	158.5	161.8	164.2	165.1	166.8	167.9	3.4
214.5	157.1	159.7	161.6	163.6	164.2	165.5	3.2
254.5	151.2	153.7	156.0	159.2	160.4	160.9	3.9
294.5	146.9	148.1	149.2	150.4	151.4	152.3	2.0
334.5	134.7	135.7	137.3	138.3	140.1	142.2	2.8
374.5	126.5	127.9	129.8	132.2	133.3	135.4	3.4

Tablo 1.2.c. Noktasal hız ölçümlerindeki (K=1) manometre farkları ($Re_w = 20167$)

$rx10^4, m$	$\Delta H_{im} \times 10^2, m TF$					
24.5	15.9	16.5	17.0	17.6	18.7	20.0
75.5	19.8	21.2	22.3	23.4	24.6	25.8
109.5	22.8	23.4	24.6	25.5	26.5	27.6
144.5	25.2	26.1	26.9	27.3	28.5	29.4
175.5	24.9	25.9	26.7	27.0	28.3	29.2
214.5	23.1	23.8	24.4	25.3	25.9	26.2
254.5	22.0	22.5	22.9	23.4	23.9	24.4
294.5	19.3	19.8	20.4	20.9	21.7	22.1
334.5	17.5	18.1	18.5	19.2	19.9	20.8
374.5	16.2	16.9	17.5	18.1	18.6	19.5

Tablo 1.2.d. $Re_w = 20167$ için yaklaşık (K=1) hız değerleri

$rx10^4, m$	$V_L \times 10^3, m/s$						$s_v \times 10^3, m/s$
24.5	106.3	108.3	109.9	111.8	115.3	119.2	4.8
75.5	118.6	122.8	125.9	129.0	132.2	135.5	6.2
109.5	127.3	129.0	132.2	134.6	137.2	140.0	4.8
144.5	133.9	136.3	138.3	139.4	142.3	144.6	3.9
175.5	133.0	135.8	137.7	138.5	141.9	144.1	4.0
214.5	128.2	130.1	131.7	134.1	135.7	136.5	3.3
254.5	125.0	126.4	127.6	128.9	130.3	131.7	2.5
294.5	117.1	118.6	120.3	121.9	124.1	125.3	3.2
334.5	111.5	113.4	114.6	116.8	118.9	121.6	3.7
374.5	107.2	109.6	111.5	113.4	115.0	117.7	3.8

Tablo 1.2.e. Noktasal hız ölçümlerindeki (K=1) manometre farkları ($Re_w = 15115$)

$rx10^4, m$	$\Delta H_{im}x10^2, m TF$					
24.5	10.5	10.9	11.3	11.8	12.5	13.2
75.5	12.3	13.0	13.7	14.3	14.9	15.8
109.5	15.9	16.6	17.0	17.4	18.1	18.8
144.5	17.0	17.5	18.1	18.7	19.3	19.8
175.5	16.5	16.8	17.2	17.7	17.9	18.2
214.5	14.9	15.5	15.9	16.3	16.7	17.3
254.5	12.7	13.2	13.8	14.3	14.8	15.2
294.5	11.9	12.4	12.8	13.1	13.7	14.1
334.5	10.8	11.2	11.5	12.0	12.4	12.9
374.5	10.4	11.0	11.6	11.9	12.1	12.6

Tablo 1.2.f. $Re_w = 15115$ için yaklaşık (K=1) hız değerleri

$rx10^4, m$	$V_Lx10^3, m/s$						$s_vx10^3, m.s$
24.5	86.4	88.0	89.7	91.6	94.3	96.9	4.0
75.5	93.6	96.2	98.7	100.9	103.0	106.1	4.5
109.5	106.2	108.5	109.8	111.1	113.3	115.5	3.4
144.5	109.8	111.4	113.3	115.2	117.0	118.5	3.3
175.5	108.2	109.2	110.5	112.1	112.7	113.6	2.1
214.5	102.9	105.0	106.3	107.7	109.0	110.9	2.9
254.5	94.9	96.8	98.9	100.7	102.4	103.8	3.4
294.5	91.9	93.8	95.3	96.4	98.6	100.0	3.0
334.5	87.5	89.2	90.3	92.2	93.8	95.6	3.0
374.5	85.9	88.3	90.7	91.9	92.7	94.6	3.1

Tablo 1.2.g. Noktasal hız ölçümlerindeki (K=1) manometre farkları ($Re_w = 10116$)

$rx10^4, m$	$\Delta H_{im} \times 10^2, m TF$					
24.5	6.4	7.0	7.4	7.7	8.0	8.5
75.5	7.8	8.2	8.5	8.8	9.2	9.7
109.5	8.5	8.8	9.2	9.5	10.0	10.4
144.5	9.0	9.2	9.5	9.9	10.1	10.5
175.5	8.1	8.4	8.8	9.2	9.5	11.2
214.5	7.5	7.9	8.2	8.5	8.7	9.0
254.5	6.9	7.2	7.6	7.9	8.3	8.9
294.5	6.6	6.9	7.3	7.7	8.2	8.6
334.5	6.5	6.8	7.2	7.6	8.1	8.5
374.5	6.3	6.7	7.1	7.5	8.0	8.7

Tablo 1.2.h. $Re_w = 10116$ için yaklaşık (K=1) hız değerleri

$rx10^4, m$	$V_L \times 10^3, m/s$						$s_v \times 10^3, m/s$
24.5	67.3	70.4	72.4	73.9	75.3	77.6	3.6
75.5	74.4	76.3	77.7	79.0	80.8	82.9	3.1
109.5	77.6	79.0	80.8	82.1	84.3	85.9	3.1
144.5	79.9	80.8	82.1	83.9	84.7	86.3	2.4
175.5	75.8	77.2	79.0	80.8	82.1	89.2	4.8
214.5	73.0	74.9	76.3	77.6	78.5	79.9	2.5
254.5	69.9	71.5	73.4	74.8	76.7	79.4	3.5
294.5	68.4	69.9	72.0	73.9	76.3	78.1	3.7
334.5	67.9	69.4	71.4	73.4	75.8	77.6	3.7
374.5	66.9	68.9	71.0	72.9	75.3	78.6	4.3

Tablo 1.3. a. $Re_w = 24067$ için değişik radyal pozisyonlarda yaklaşık ($K=1$) ve doğru ($K=1.6823$) hız değerleri

$rx10^4, m$	$V_Lx10^3, m/s$	$V_Tx10^3, m/s$
0	0	0
24.5	129.3	217.4
75.5	142.9	240.4
109.5	156.7	263.7
144.5	163.6	275.1
175.5	164.0	275.9
214.5	162.0	272.6
254.5	157.0	264.1
294.5	149.7	251.9
334.5	138.1	232.3
374.5	130.9	220.8
399	0	0

Tablo 1.3.b. $Re_w = 20167$ için değişik radyal pozisyonlarda yaklaşık ($K=1$) ve doğru ($K=1.6823$) hız değerleri

$rx10^4, m$	$V_Lx10^3, m/s$	$V_Tx10^3, m/s$
0	0	0
24.5	111.8	188.1
75.5	122.2	205.5
109.5	133.6	224.7
144.5	139.1	234.0
175.5	138.6	233.1
214.5	132.8	223.4
254.5	128.4	216.0
294.5	121.2	204.0
334.5	116.2	195.5
374.5	112.5	189.2
399	0	0

Tablo 1.3.c. $Re_w = 15115$ için değişik radyal pozisyonlarda yaklaşık ($K=1$) ve doğru ($K=1.6823$) hız değerleri

$rx10^4, m$	$V_L \times 10^3, m/s$	$V_{Tx} \times 10^3, m/s$
0	0	0
24.5	91.2	153.5
75.5	99.8	167.9
109.5	110.8	186.3
144.5	114.3	192.2
175.5	111.1	186.9
214.5	107.0	180.0
254.5	99.6	167.6
294.5	96.0	161.5
334.5	91.5	153.9
374.5	90.7	152.6
399	0	0

Tablo 1.3.d. $Re_w = 10116$ için değişik radyal pozisyonlarda yaklaşık ($K=1$) ve doğru ($K=1.6823$) hız değerleri

$rx10^4, m$	$V_L \times 10^3, m/s$	$V_{Tx} \times 10^3, m/s$
0	0	0
24.5	72.9	122.7
75.5	78.6	132.2
109.5	81.7	137.4
144.5	83.0	139.6
175.5	80.8	135.9
214.5	76.7	129.1
254.5	74.4	125.1
294.5	72.9	122.7
334.5	72.7	122.3
374.5	72.5	121.9
399	0	0

Tablo 1.4. Orifis metre kalibrasyonundan ve Simpson kuralı'ndan ($K=1$) elde edilen ortalama hız değerleri

Re_w	$U_{ann} \times 10^3, \text{ m/s}$	$U_s \times 10^3, \text{ m/s}$
24067	226.7	137.3
20167	199.9	114.7
15115	157.4	91.8
10116	110.0	69.5

Laminar akış bölgesindeki ortalama hızlar Denklem (1.1) den hesaplanmıştır [Eraslan & Özbelge, 2003].

$$U(r) = A + Br^2 + C \ln r \quad (1.1)$$

Tablo 1.5. Laminar akış bölgesindeki hız dağılımlarının katsayıları (Denklem C.1 için)

Re_w	A	B	C
1004	0.33	-26.03	0.08
2007	0.67	-52.67	0.17

A, B, and C katsayılarının hesaplama yöntemi [Eraslan & Özbelge, 2003] de verilmiştir.

Tablo 1.6. Laminar akış bölgesindeki doğru noktasal hızlar ($K=1.6823$)

	$Re_w = 1004$	$Re_w = 2007$
$r \times 10^4, \text{ m}$	$U_T \times 10^3, \text{ m/s}$	$U_T \times 10^3, \text{ m/s}$
24.5	6.3	12.7
109.5	18.8	38.1
144.5	21.1	42.6
175.5	21.8	44.2
214.5	21.4	43.3
294.5	15.9	32.2
374.5	5.1	10.3

Tablo 1.7. İzokinetik şartlarda ölçülen iki-faz aksel sürtümlü basınç değişimleri için manometre farkları

	$C_f = \%1$ v/v $d_p = 72 \mu\text{m}$	$C_f = \%2$ v/v $d_p = 72 \mu\text{m}$	$C_f = \%1$ v/v $d_p = 138 \mu\text{m}$	$C_f = \%2$ v/v $d_p = 138 \mu\text{m}$	$U_{\text{ann}}, \text{m/s}$
$\Delta H_{\text{CCl}_4}, \text{m}$	0.131	0.212	0.149	0.260	0.024
	0.140	0.265	0.189	0.315	0.110
	0.114	0.240	0.175	0.301	0.157
	0.097	0.227	0.156	0.263	0.200
	0.090	0.208	0.146	0.237	0.227

Tablo 1.8.a. İzokinetik olmayan şartlarda $d_p = 72 \mu\text{m}$ ve $C_f = \%1$ (v/v) için katı-faz yoğunluğu hesaplamalarında gerekli veriler

$W_t = A$	$W_{t+w+s} = B$	$W_{w+s} = B-A$	$W_{t+s} = C$	$W_s = C-A$	$W_w = B-C$	$\rho_s \cdot 10^{-1}, \text{kg/m}^3$
0.0120 m/s						
46.5576	86.7424	40.1848	47.0604	0.5028	39.682	1.26
50.447	99.6938	49.2468	51.1256	0.6786	48.5682	1.39
40.4488	71.681	31.2322	40.8742	0.4254	30.8068	1.37
44.5765	76.1885	31.612	45.0052	0.4287	31.1833	1.37
51.0689	88.0826	37.0137	51.5316	0.4627	36.551	1.26
41.2127	73.2776	32.0649	41.5811	0.3684	31.6965	1.16
36.9881	72.9574	35.9693	37.455	0.4669	35.5024	1.31
0.0239 m/s						
46.5521	88.3269	41.7748	47.1116	0.5595	41.2153	1.35
50.4504	87.5587	37.1083	50.9932	0.5428	36.5655	1.47
40.4488	79.6528	39.204	41.0313	0.5825	38.6215	1.50
44.5753	82.6594	38.0841	45.1715	0.5962	37.4879	1.58
51.0663	77.6952	26.6289	51.4591	0.3928	26.2361	1.49
41.2099	73.6971	32.4872	41.694	0.4841	32.0031	1.50
36.9882	78.5876	41.5994	37.5967	0.6085	40.9909	1.47
0.1100 m/s						

46.548	80.418	33.87	47.5308	0.9828	32.8872	2.95
50.4442	85.704	35.2598	51.5056	1.0614	34.1984	3.06
40.4511	68.8278	28.3767	41.3521	0.901	27.4757	3.23
44.5744	80.9952	36.4208	45.7188	1.1444	35.2764	3.20
51.069	75.002	23.933	51.7993	0.7303	23.2027	3.10
41.2122	82.7642	41.552	42.4868	1.2746	40.2774	3.12
36.993	69.628	32.635	37.9704	0.9774	31.6576	3.04
0.1574 m/s						
46.5415	77.6087	31.0672	47.5436	1.0021	30.0651	3.28
50.4474	89.7657	39.3183	51.7202	1.2728	38.0455	3.30
40.4499	74.4985	34.0486	41.5797	1.1298	32.9188	3.38
44.5745	79.1676	34.5931	45.7012	1.1267	33.4664	3.32
51.0681	90.8715	39.8034	52.3259	1.2578	38.5456	3.22
41.2114	73.1435	31.9321	42.2232	1.0118	30.9203	3.22
36.9901	70.9957	34.0056	38.1047	1.1146	32.891	3.34
0.1999 m/s						
46.5497	89.7667	43.217	47.761	1.2113	42.0057	2.85
50.4513	90.0674	39.6161	51.575	1.1237	38.4924	2.88
40.4509	84.2417	43.7908	41.7285	1.2776	42.5132	2.96
44.5778	85.0695	40.4917	45.6948	1.117	39.3747	2.80
51.0686	92.2361	41.1675	52.2015	1.1329	40.0346	2.79
41.2073	80.2322	39.0249	42.3067	1.0994	37.9255	2.86
36.9933	79.7948	42.8015	38.1237	1.1304	41.6711	2.68
0.2267 m/s						
46.5459	91.357	44.8111	48.0134	1.4675	43.3436	3.33
50.4419	92.4037	41.9618	51.8995	1.4576	40.5042	3.54
40.4464	87.1613	46.7149	42.0854	1.639	45.0759	3.58
44.5708	88.0385	43.4677	46.0991	1.5283	41.9394	3.58
51.0657	94.6922	43.6265	52.6032	1.5375	42.089	3.59
41.2073	83.7704	42.5631	42.6404	1.4331	41.13	3.43
36.9859	81.7354	44.7495	38.5247	1.5388	43.2107	3.50

Tablo 1.8.b. İzokinetik şartlarda $dp=72 \mu\text{m}$ ve $C_f=1\%$ (v/v) için katı-faz yoğunluğu hesaplamalarında gerekli veriler

$W_t=A$	$W_{t+w+s}=B$	$W_{w+s}=B-A$	$W_{t+s}=C$	$W_s=C-A$	$W_w=B-C$	$\rho_s \cdot 10^{-1}, \text{kg/m}^3$
0.0239 m/s						
38.0668	41.0684	3.0016	38.0826	0.0158	2.9858	0.53
39.3495	41.3061	1.9566	39.3563	0.0068	1.9498	0.35
40.146	44.3934	4.2474	40.1539	0.0079	4.2395	0.19
36.9841	39.4756	2.4915	36.9973	0.0132	2.4783	0.53
40.9431	43.8704	2.9273	40.96	0.0169	2.9104	0.58
40.2175	42.291	2.0735	40.2254	0.0079	2.0656	0.38
43.9607	46.2515	2.2908	43.976	0.0153	2.2755	0.67
0.1100 m/s						
51.4125	75.5679	24.1554	51.5692	0.1567	23.9987	0.65
39.0438	67.8063	28.7625	39.2544	0.2106	28.5519	0.73
48.9643	72.6913	23.727	49.0987	0.1344	23.5926	0.57
36.4815	66.8927	30.4112	36.6712	0.1897	30.2215	0.63
42.9709	70.3339	27.363	43.1434	0.1725	27.1905	0.63
50.2639	80.4805	30.2166	50.4621	0.1982	30.0184	0.66
49.3034	77.2519	27.9485	49.5594	0.256	27.6925	0.92
0.1574 m/s						
51.4114	83.1501	31.7387	51.7795	0.3681	31.3706	1.17
39.0712	78.3716	39.3004	39.4258	0.3546	38.9458	0.91
48.9656	81.7396	32.774	49.215	0.2494	32.5246	0.76
36.4832	69.0892	32.606	36.7653	0.2821	32.3239	0.87
42.9746	76.8796	33.905	43.3345	0.3599	33.5451	1.07
50.2665	80.7723	30.5058	50.6142	0.3477	30.1581	1.15
49.3043	90.382	41.0777	49.8315	0.5272	40.5505	1.29
0.1999 m/s						
37.5418	49.0015	11.4597	37.7006	0.1588	11.3009	1.40
41.3231	54.1081	12.785	41.6057	0.2826	12.5024	2.24

40.148	51.2082	11.0602	40.3897	0.2417	10.8185	2.21
40.079	51.5892	11.5102	40.295	0.216	11.2942	1.90
39.3712	53.4857	14.1145	39.6542	0.283	13.8315	2.03
40.2162	50.8249	10.6087	40.4251	0.2089	10.3998	1.99
43.8659	52.1912	8.3253	43.9981	0.1322	8.1931	1.60
0.2267 m/s						
40.6314	49.2651	8.6337	40.8692	0.2378	8.3959	2.80
39.3471	46.9084	7.5613	39.6012	0.2541	7.3072	3.42
44.4751	53.0407	8.5656	44.7504	0.2753	8.2903	3.27
45.0176	52.8014	7.7838	45.2391	0.2215	7.5623	2.89
40.9422	48.3348	7.3926	41.1801	0.2379	7.1547	3.28
39.6764	46.298	6.6216	39.8969	0.2205	6.4011	3.39
40.609	48.9494	8.3404	40.8661	0.2571	8.0833	3.13

Tablo 1.9.a. İzokinetik olmayan şartlarda $d_p=72 \mu\text{m}$ ve $C_T=\%2$ (v/v) için katı-faz yoğunluğu hesaplamalarında gerekli veriler

Wt= A	Wt+w+s= B	Ww+s= B-A	Wt+s =C	Ws=C-A	Ww=B-C	$\rho_s \cdot 10^{-1}$, kg/m ³
0.0120 m/s						
40.666	84.7776	44.1116	42.3276	1.6616	42.45	3.85
41.8524	81.5142	39.6618	43.5139	1.6615	38.0003	4.29
43.2251	86.3817	43.1566	44.9438	1.7187	41.4379	4.07
43.3732	82.5878	39.2146	45.1837	1.8105	37.4041	4.74
41.6892	79.8665	38.1773	43.4972	1.808	36.3693	4.86
42.4007	82.6572	40.2565	44.2779	1.8772	38.3793	4.79
41.9613	78.1366	36.1753	43.7575	1.7962	34.3791	5.11
0.0239 m/s						
38.1862	78.8599	40.6737	40.0651	1.8789	38.7948	4.74
40.3865	78.7058	38.3193	42.3807	1.9942	36.3251	5.36
41.2223	81.0502	39.8279	43.2045	1.9822	37.8457	5.12
43.4373	83.8638	40.4265	45.6124	2.1751	38.2514	5.55

40.3591	85.057	44.6979	42.7916	2.4325	42.2654	5.62
40.2129	81.6386	41.4257	42.4407	2.2278	39.1979	5.55
45.3393	84.3842	39.0449	47.2672	1.9279	37.117	5.08
0.1100 m/s						
38.0709	68.5224	30.4515	39.8672	1.7963	28.6552	6.10
40.957	71.9444	30.9874	43.3174	2.3604	28.627	7.96
41.6092	73.024	31.4148	43.9918	2.3826	29.0322	7.93
41.6282	72.9132	31.285	44.0164	2.3882	28.8968	7.98
40.4913	74.783	34.2917	43.1796	2.6883	31.6034	8.21
41.6873	68.5449	26.8576	43.5622	1.8749	24.9827	7.27
39.1162	72.8785	33.7623	41.6153	2.4991	31.2632	7.73
0.1574 m/s						
53.6515	86.6922	33.0407	55.7559	2.1044	30.9363	6.61
46.275	83.2499	36.9749	49.4368	3.1618	33.8131	8.99
45.3773	83.6118	38.2345	48.5834	3.2061	35.0284	8.81
44.9489	78.5463	33.5974	47.6034	2.6545	30.9429	8.27
46.9386	84.7634	37.8248	50.1384	3.1998	34.625	8.89
45.3217	82.513	37.1913	48.4381	3.1164	34.0749	8.80
46.3273	87.8113	41.484	49.5895	3.2622	38.2218	8.23
0.1999 m/s						
38.8366	66.4242	27.5876	40.466	1.6294	25.9582	6.11
40.1695	65.4115	25.242	41.8524	1.6829	23.5591	6.93
41.4675	67.7817	26.3142	43.2251	1.7576	24.5566	6.94
41.235	72.7291	31.4941	43.3732	2.1382	29.3559	7.06
39.8891	67.3523	27.4632	41.6892	1.8001	25.6631	6.81
40.5177	68.8773	28.3596	42.4007	1.883	26.4766	6.90
39.9569	69.8814	29.9245	41.9613	2.0044	27.9201	6.96
0.2267 m/s						
37.683	72.0628	34.3798	40.3719	2.6889	31.6909	8.19
40.827	79.1126	38.2856	44.1873	3.3603	34.9253	9.24
42.1703	79.8278	37.6575	45.4857	3.3154	34.3421	9.27

41.4704	75.9417	34.4713	44.5549	3.0845	31.3868	9.43
41.5331	74.4829	32.9498	44.3716	2.8385	30.1113	9.063
43.5669	79.3779	35.811	46.5979	3.031	32.78	8.89
39.4607	73.282	33.8213	42.4889	3.0282	30.7931	9.44

Tablo 1.9.b. İzokinetik şartlarda $d_p=72 \mu\text{m}$ ve $C_f=\%2$ (v/v) için katı-faz yoğunluğu hesaplamalarında gerekli veriler

Wt= A	Wt+w+s= B	Ww+s= B-A	Wt+s =C	Ws=C-A	Ww=B-C	$\rho_s \cdot 10^{-1}$, kg/m ³
0.0239 m/s						
40.5824	41.9181	1.3357	40.5834	0.001	1.3347	0.07
41.1858	45.6894	4.5036	41.1886	0.0028	4.5008	0.06
39.6594	43.3519	3.6925	39.6628	0.0034	3.6891	0.09
45.3122	49.2808	3.9686	45.315	0.0028	3.9658	0.07
41.7005	45.9088	4.2083	41.7037	0.0032	4.2051	0.08
45.2679	48.0163	2.7484	45.2699	0.002	2.7464	0.07
44.3607	46.2153	1.8546	44.3623	0.0016	1.853	0.09
0.1100 m/s						
51.4089	84.3849	32.976	51.5528	0.1439	32.8321	0.44
39.041	53.695	14.654	39.1959	0.1549	14.4991	1.06
48.9617	70.5108	21.5491	49.1705	0.2088	21.3403	0.97
36.4795	59.5825	23.103	36.7899	0.3104	22.7926	1.35
42.9692	63.3722	20.403	43.2216	0.2524	20.1506	1.24
50.2624	67.0718	16.8094	50.3703	0.1079	16.7015	0.64
49.3007	72.2334	22.9327	49.6027	0.302	22.6307	1.33
0.1574 m/s						
47.0092	67.0573	20.0481	47.4374	0.4282	19.6199	2.16
50.9384	68.8228	17.8844	51.3817	0.4433	17.4411	2.51
40.6931	63.6997	23.0066	41.0806	0.3875	22.6191	1.70
45.1138	71.5806	26.4668	45.8256	0.7118	25.755	2.73
51.3912	75.9946	24.6034	52.1661	0.7749	23.8285	3.20

41.5242	66.6471	25.1229	42.1574	0.6332	24.4897	2.56
37.4727	67.0837	29.611	38.2301	0.7574	28.8536	2.59
0.1999 m/s						
41.1694	50.31	9.1406	41.837	0.6676	8.473	7.62
41.1602	48.8455	7.6853	41.6966	0.5364	7.1489	7.27
45.9972	58.4839	12.4867	46.9038	0.9066	11.5801	7.57
37.14	48.2516	11.1116	37.9282	0.7882	10.3234	7.39
38.4315	47.8036	9.3721	39.1225	0.691	8.6811	7.69
41.3993	48.2804	6.8811	41.8469	0.4476	6.4335	6.75
40.763	48.3106	7.5476	41.372	0.609	6.9386	8.46
0.2267 m/s						
46.923	56.8094	9.8864	47.7477	0.8247	9.0617	8.76
40.5701	46.7714	6.2013	41.1522	0.5821	5.6192	9.92
43.3847	51.349	7.9643	44.1178	0.7331	7.2312	9.72
45.103	51.8412	6.7382	45.626	0.523	6.2152	8.12
40.7388	49.3589	8.6201	41.5017	0.7629	7.8572	9.32
41.548	50.8071	9.2591	42.3312	0.7832	8.4759	8.89
43.4427	50.7303	7.2876	44.1143	0.6716	6.616	9.73

Tablo 1.10.a. İzokinetik olmayan şartlarda $d_p=138 \mu\text{m}$ ve $C_f=\%1$ (v/v) için katı-faz yoğunluğu hesaplamalarında gerekli veriler

Wt= A	Wt+w+s= B	Ww+s= B-A	Wt+s =C	Ws=C-A	Ww=B-C	$\rho_s \cdot 10^{-1}$, kg/m ³
0.0120 m/s						
46.5515	87.4877	40.9362	46.6678	0.1163	40.8199	0.28
50.4478	88.3966	37.9488	50.5351	0.0873	37.8615	0.23
40.4481	73.7575	33.3094	40.6004	0.1523	33.1571	0.46
44.5737	82.3958	37.8221	44.7541	0.1804	37.6417	0.48
51.0671	91.0167	39.9496	51.2251	0.158	39.7916	0.40
41.2086	77.93	36.7214	41.3434	0.1348	36.5866	0.37

36.988	73.299	36.311	37.0992	0.1112	36.1998	0.31
0.0239 m/s						
46.5466	86.7424	40.1958	46.7505	0.2039	39.9919	0.51
50.4453	99.6938	49.2485	50.7309	0.2856	48.9629	0.58
40.447	71.681	31.234	40.672	0.225	31.009	0.72
44.5741	76.1885	31.6144	44.7875	0.2134	31.401	0.68
51.0669	88.0826	37.0157	51.3057	0.2388	36.7769	0.65
41.2086	73.2776	32.069	41.3941	0.1855	31.8835	0.58
36.9863	72.9574	35.9711	37.2047	0.2184	35.7527	0.61
0.1100 m/s						
46.5476	84.7626	38.215	47.2059	0.6583	37.5567	1.74
50.4445	86.571	36.1265	51.1485	0.704	35.4225	1.97
40.4479	73.349	32.9011	41.0396	0.5917	32.3094	1.82
44.5741	79.2439	34.6698	45.1827	0.6086	34.0612	1.77
51.0633	83.5723	32.509	51.6283	0.565	31.944	1.75
41.2103	72.5117	31.3014	41.7479	0.5376	30.7638	1.73
36.9877	71.5529	34.5652	37.651	0.6633	33.9019	1.94
0.1574 m/s						
46.5511	82.6589	36.1078	47.2997	0.7486	35.3592	2.10
50.4473	80.5792	30.1319	51.1171	0.6698	29.4621	2.25
40.4447	68.7431	28.2984	41.1142	0.6695	27.6289	2.40
44.5776	77.8455	33.2679	45.3245	0.7469	32.521	2.27
51.0682	78.6912	27.623	51.6712	0.603	27.02	2.21
41.2095	76.3374	35.1279	41.9044	0.6949	34.433	2.00
36.9826	69.5784	32.5958	37.6853	0.7027	31.8931	2.18
0.1999 m/s						
46.5471	77.3782	30.8311	47.2679	0.7208	30.1103	2.37
50.4457	79.066	28.6203	51.1014	0.6557	27.9646	2.32
40.4494	71.8257	31.3763	41.2535	0.8041	30.5722	2.60
44.5712	78.1794	33.6082	45.4284	0.8572	32.751	2.59
51.0681	87.0625	35.9944	51.9592	0.8911	35.1033	2.51

41.2093	75.8396	34.6303	42.0214	0.8121	33.8182	2.37
36.9875	75.7056	38.7181	37.9065	0.919	37.7991	2.40
0.2267 m/s						
46.5547	85.0928	38.5381	47.5873	1.0326	37.5055	2.72
50.4486	84.807	34.3584	51.414	0.9654	33.393	2.85
40.4497	70.0689	29.6192	41.3064	0.8567	28.7625	2.94
44.5763	79.5123	34.936	45.6137	1.0374	33.8986	3.02
51.0684	80.9075	29.8391	51.9195	0.8511	28.988	2.90
41.2123	78.0563	36.844	42.3079	1.0956	35.7484	3.02
36.9836	68.9182	31.9346	37.9313	0.9477	30.9869	3.02

Tablo 1.10.b. İzokinetik şartlarda $d_p=138 \mu\text{m}$ ve $C_f=1\%$ (v/v) için katı-faz yoğunluğu hesaplamalarında gerekli veriler

Wt= A	Wt+w+s= B	Ww+s= B-A	Wt+s =C	Ws=C-A	Ww=B-C	$\rho_s \cdot 10^{-1}$, kg/m ³
0.0239 m/s						
41.9527	46.0186	4.0659	41.9551	0.0024	4.0635	0.06
46.2246	54.0012	7.7766	46.2286	0.004	7.7726	0.05
45.0342	50.0581	5.0239	45.0379	0.0037	5.0202	0.07
45.0999	47.3541	2.2542	45.1013	0.0014	2.2528	0.06
40.4381	42.981	2.5429	40.4397	0.0016	2.5413	0.06
41.5461	43.9944	2.4483	41.5476	0.0015	2.4468	0.06
43.4362	45.7126	2.2764	43.4382	0.002	2.2744	0.09
0.1100 m/s						
40.9228	52.1941	11.2713	41.0286	0.1058	11.1655	0.94
43.7131	50.4758	6.7627	43.8887	0.1756	6.5871	2.63
40.2346	45.1556	4.921	40.3399	0.1053	4.8157	2.16
39.6496	47.6813	8.0317	39.8542	0.2046	7.8271	2.58
40.6606	43.7935	3.1329	40.7346	0.074	3.0589	2.39
41.5456	46.2973	4.7517	41.6155	0.0699	4.6818	1.48
43.4407	48.3194	4.8787	43.6304	0.1897	4.689	3.97

0.1574 m/s						
50.4462	74.3584	23.9122	50.5915	0.1453	23.7669	2.03
44.5734	73.4551	28.8817	44.8174	0.244	28.6377	2.91
41.2086	76.3202	35.1116	41.3555	0.1469	34.9647	2.79
51.4103	65.213	13.8027	51.4907	0.0804	13.7223	3.12
48.9674	70.5571	21.5897	49.1307	0.1633	21.4264	2.73
42.9745	70.9633	27.9888	43.1064	0.1319	27.8569	2.35
49.303	72.144	22.841	49.4341	0.1311	22.7099	4.27
0.1999 m/s						
50.4511	81.5596	31.1085	50.6942	0.2431	30.8654	2.32
44.5747	71.3733	26.7986	44.9916	0.4169	26.3817	3.73
41.2094	86.5759	45.3665	41.4783	0.2689	45.0976	3.50
51.4116	85.277	33.8654	51.8237	0.4121	33.4533	4.13
48.9653	78.9259	29.9606	49.464	0.4987	29.4619	3.39
42.9722	76.5098	33.5376	43.3721	0.3999	33.1377	3.08
49.3032	84.142	34.8388	49.6736	0.3704	34.4684	4.35
0.2267 m/s						
40.6321	48.6988	8.0667	41.0865	0.4544	7.6123	5.82
40.674	54.3338	13.6598	41.5806	0.9066	12.7532	6.90
40.1461	52.7683	12.6222	40.6445	0.4984	12.1238	4.04
45.0169	57.0402	12.0233	46.1775	1.1606	10.8627	10.22
40.9429	51.7909	10.848	41.3443	0.4014	10.4466	3.78
39.677	51.6326	11.9556	40.3945	0.7175	11.2381	6.21
40.6089	53.5562	12.9473	41.3383	0.7294	12.2179	5.82

Tablo 1.11.a. İzokinetik olmayan şartlarda $d_p=138 \mu\text{m}$ ve $C_f=\%2$ (v/v) için katı-faz yoğunluğu hesaplamalarında gerekli veriler

$W_t = A$	$W_{t+w+s} = B$	$W_{w+s} = B-A$	$W_{t+s} = C$	$W_s = C - A$	$W_w = B - C$	$\rho_s \cdot 10^{-1}, \text{kg/m}^3$
0.0120 m/s						
44.1554	77.6832	33.5278	44.5142	0.3588	33.169	1.08

44.1924	73.542	29.3496	44.4197	0.2273	29.1223	0.78
43.0794	69.5445	26.4651	43.2867	0.2073	26.2578	0.79
40.9184	76.7107	35.7923	41.1363	0.2179	35.5744	0.61
40.0977	82.1388	42.0411	40.5458	0.4481	41.593	1.07
40.939	80.1098	39.1708	41.2784	0.3394	38.8314	0.87
44.5338	79.2256	34.6918	44.9183	0.3845	34.3073	1.11
0.0239 m/s						
38.0045	79.1059	41.1014	38.7032	0.6987	40.4027	1.72
41.4367	75.5218	34.0851	42.3316	0.8949	33.1902	2.66
41.1601	69.9287	28.7686	41.784	0.6239	28.1447	2.19
40.346	77.9656	37.6196	40.9179	0.5719	37.0477	1.53
41.2578	83.255	41.9972	42.0225	0.7647	41.2325	1.84
43.3891	81.3742	37.9851	43.8473	0.4582	37.5269	1.21
39.4261	80.4132	40.9871	39.9371	0.511	40.4761	1.25
0.1100 m/s						
43.9274	69.0099	25.0825	44.6519	0.7245	24.358	2.94
44.176	71.2752	27.0992	45.3857	1.2097	25.8895	4.58
43.646	72.6615	29.0155	44.5293	0.8833	28.1322	3.10
40.3238	69.4084	29.0846	41.3246	1.0008	28.0838	3.51
45.206	72.9799	27.7739	46.2989	1.0929	26.681	4.02
40.2995	72.6422	32.3427	41.2789	0.9794	31.3633	3.08
43.9968	75.6913	31.6945	45.2457	1.2489	30.4456	4.03
0.1574 m/s						
37.6858	67.8016	30.1158	39.0772	1.3914	28.7244	4.74
40.8298	68.4963	27.6665	42.2244	1.3946	26.2719	5.19
42.1776	70.5725	28.3949	43.8591	1.6815	26.7134	6.13
41.479	69.147	27.668	43.0183	1.5393	26.1287	5.75
41.5374	68.7143	27.1769	43.1919	1.6545	25.5224	6.31
43.5693	75.8159	32.2466	45.5387	1.9694	30.2772	6.33
39.4673	70.794	31.3267	41.2832	1.8159	29.5108	5.99
0.1999 m/s						

50.0995	79.9424	29.8429	52.7515	2.652	27.1909	9.36
43.9159	73.3621	29.4462	46.8851	2.9692	26.477	10.70
43.1461	78.5521	35.406	46.6187	3.4726	31.9334	10.39
42.7452	73.5417	30.7965	45.5789	2.8337	27.9628	9.72
44.82	72.4012	27.5812	47.5476	2.7276	24.8536	10.49
43.1568	73.4512	30.2944	46.003	2.8462	27.4482	9.93
44.2286	75.2186	30.99	47.292	3.0634	27.9266	10.48
0.2267 m/s						
38.1974	69.9385	31.7411	40.8521	2.6547	29.0864	8.79
40.3991	76.5245	36.1254	43.5895	3.1904	32.935	9.30
41.2429	75.0434	33.8005	44.0752	2.8323	30.9682	8.80
43.4445	76.7101	33.2656	46.4337	2.9892	30.2764	9.48
40.3716	73.9057	33.5341	43.3227	2.9511	30.583	9.27
40.2272	74.5588	34.3316	43.2851	3.0579	31.2737	9.39
45.3656	78.2382	32.8726	48.4432	3.0776	29.795	9.90

Tablo 1.11.b. İzokinetik şartlarda $d_p=138 \mu\text{m}$ ve $C_f=2\%$ (v/v) için katı-faz yoğunluğu hesaplamalarında gerekli veriler

$W_t = A$	$W_t + w + s = B$	$W_w + s = B - A$	$W_t + s = C$	$W_s = C - A$	$W_w = B - C$	$\rho_s \cdot 10^{-1}, \text{kg/m}^3$
0.0239 m/s						
41.9538	43.6523	1.6985	41.9546	0.0008	1.6977	0.05
44.3043	47.3062	3.0019	44.3057	0.0014	3.0005	0.05
45.037	48.0163	2.9793	45.0385	0.0015	2.9778	0.05
45.1006	48.2181	3.1175	45.1022	0.0016	3.1159	0.05
40.6616	43.5791	2.9175	40.6632	0.0016	2.9159	0.06
41.5491	44.3925	2.8434	41.5506	0.0015	2.8419	0.05
43.4422	45.9413	2.4991	43.4436	0.0014	2.4977	0.06
0.1574 m/s						
43.4602	50.7851	7.3249	43.607	0.1468	7.1781	4.15
44.4633	50.843	6.3797	44.6458	0.1825	6.1972	8.93

39.9368	48.1836	8.2468	40.1637	0.2269	8.0199	9.59
36.99	43.7027	6.7127	37.1959	0.2059	6.5068	4.17
40.9464	48.9578	8.0114	41.1621	0.2157	7.7957	8.00
41.2256	48.9414	7.7158	41.4047	0.1791	7.5367	5.61
40.6124	45.8596	5.2472	40.8312	0.2188	5.0284	7.56
0.1999 m/s						
40.9328	47.9945	7.0617	41.0945	0.1617	6.9	7.69
46.2315	54.7586	8.5271	46.5435	0.312	8.2151	10.22
45.0409	53.7415	8.7006	45.3397	0.2988	8.4018	10.83
44.3904	51.142	6.7516	44.6631	0.2727	6.4789	6.69
40.627	47.5923	6.9653	40.8586	0.2316	6.7337	10.50
48.2552	56.1878	7.9326	48.4952	0.24	7.6926	6.81
40.9555	47.8944	6.9389	41.2499	0.2944	6.6445	8.10
0.2267 m/s						
41.2141	55.5973	14.3832	42.4981	1.284	13.0992	9.41
40.6755	55.0407	14.3652	42.1671	1.4916	12.8736	11.04
40.147	50.7723	10.6253	41.3101	1.1631	9.4622	11.68
40.0785	50.454	10.3755	40.8445	0.766	9.6095	7.71
39.373	52.2135	12.8405	40.7039	1.3309	11.5096	11.02
41.224	55.2915	14.0675	42.2425	1.0185	13.049	7.55
40.609	53.3046	12.6956	41.7715	1.1625	11.5331	9.66

Tablo 1.12.a. Boyutsuz radyal uzaklık (BRU) parametre olarak alındığında izokinetik olmayan şartlarda ölçülen karışım hızına (U_{ann}) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=72 \mu\text{m}$ ve $C_f=1\%$ (v/v) için)

BRU	U_{ann} , m/s (karışım Reynolds sayısı)					
	0.0120 $Re_m=1051$	0.0239 $Re_m=2016$	0.1100 $Re_m=9305$	0.1574 $Re_m=13548$	0.1999 $Re_m=17546$	0.2267 $Re_m=20021$
0.06	1.26	1.35	2.95	3.28	2.85	3.33
0.27	1.39	1.47	3.06	3.30	2.88	3.54
0.36	1.37	1.50	3.23	3.38	2.96	3.58
0.44	1.37	1.58	3.20	3.32	2.80	3.58
0.54	1.26	1.49	3.10	3.22	2.79	3.59
0.74	1.16	1.50	3.12	3.22	2.86	3.43
0.94	1.31	1.47	3.04	3.34	2.68	3.50
$\bar{\rho}_s$	1.37	1.39	2.90	3.07	2.68	3.26
$\bar{\varphi}_s$	0.005737	0.005771	0.012093	0.012807	0.011154	0.013583
$\bar{\rho}_m$	1.006635	1.006823	1.015647	1.01658	1.014196	1.017566

Tablo 1.12.b. Karışım hızı (U_{ann}) parametre olarak alındığında izokinetik olmayan şartlarda ölçülen boyutsuz radyal uzaklığa (BRU) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=72 \mu\text{m}$ ve $C_f=1\%$ (v/v) için)

U_{ann} , m/s	BRU						
	0.06	0.27	0.36	0.44	0.54	0.74	0.94
0.0120 $Re_m=1051$	1.26	1.39	1.37	1.37	1.26	1.16	1.31
0.0239 $Re_m=2016$	1.35	1.47	1.50	1.58	1.49	1.50	1.47
0.1100 $Re_m=9305$	2.95	3.06	3.23	3.20	3.10	3.12	3.04
0.1574 $Re_m=13548$	3.28	3.30	3.38	3.32	3.22	3.22	3.34
0.1999 $Re_m=17546$	2.85	2.88	2.96	2.80	2.79	2.86	2.68
0.2267 $Re_m=20021$	3.33	3.54	3.58	3.58	3.59	3.43	3.50

Tablo 1.13.a. Boyutsuz radyal uzaklık (BRU) parametre olarak alındığında izokinetik şartlarda ölçülen karışım hızına (U_{ann}) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=72 \mu\text{m}$ ve $C_f=1\%$ (v/v) için)

BRU	U_{ann} , m/s				
	0.0239 $Re_m=1801$	0.1100 $Re_m=9402$	0.1574 $Re_m=13674$	0.1999 $Re_m=16532$	0.2267 $Re_m=19216$
0.06	0.53	0.65	1.17	1.40	2.80
0.27	0.35	0.73	0.91	2.24	3.42
0.36	0.19	0.57	0.76	2.21	3.27
0.44	0.53	0.63	0.87	1.90	2.89
0.54	0.58	0.63	1.07	2.03	3.28
0.74	0.38	0.66	1.15	1.99	3.39
0.94	0.67	0.92	1.29	1.60	3.13
$\bar{\rho}_s$	0.42	0.85	1.35	1.82	3.05
$\bar{\varphi}_s$	0.00177	0.00271	0.00443	0.00758	0.01271
$\bar{\rho}_m$	1.001637	1.002499	1.004834	1.009420	1.016503

Tablo 1.13.b. Karışım hızı (U_{ann}) parametre olarak alındığında izokinetik şartlarda ölçülen boyutsuz radyal uzaklığa (BRU) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=72 \mu\text{m}$ ve $C_f=1\%$ (v/v) için)

U_{ann} , m/s	BRU						
	0.06	0.27	0.36	0.44	0.54	0.74	0.94
0.0239 $Re_m=1801$	0.53	0.35	0.19	0.53	0.58	0.38	0.67
0.1100 $Re_m=9402$	0.65	0.73	0.57	0.63	0.63	0.66	0.92
0.1574 $Re_m=13674$	1.17	0.91	0.76	0.87	1.07	1.15	1.29
0.1999 $Re_m=16532$	1.40	2.24	2.21	1.90	2.03	1.99	1.60
0.2267 $Re_m=19216$	2.80	3.42	3.27	2.89	3.28	3.39	3.13

Tablo 1.14.a. Boyutsuz radyal uzaklık (BRU) parametre olarak alındığında izokinetik olmayan şartlarda ölçülen karışım hızına (U_{ann}) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=72 \mu\text{m}$ ve $C_f=2\%$ (v/v) için)

BRU	U_{ann} , m/s					
	0.0120 $Re_m=991$	0.0239 $Re_m=1833$	0.1100 $Re_m=8717$	0.1574 $Re_m=12629$	0.1999 $Re_m=16025$	0.2267 $Re_m=17738$
0.06	3.85	4.74	6.10	6.61	6.11	8.19
0.27	4.29	5.36	7.96	8.99	6.93	9.24
0.36	4.07	5.12	7.93	8.81	6.94	9.27
0.44	4.74	5.55	7.98	8.27	7.06	9.43
0.54	4.86	5.62	8.21	8.89	6.81	9.06
0.74	4.79	5.55	7.27	8.80	6.90	8.89
0.94	5.11	5.08	7.73	8.23	6.96	9.44
$\bar{\rho}_s$	4.34	5.02	7.12	8.13	6.43	8.59
$\bar{\varphi}_s$	0.018085	0.020900	0.029685	0.033885	0.026776	0.035778
$\bar{\rho}_m$	1.024109	1.02831	1.040472	1.046297	1.036365	1.049033

Tablo 1.14.b Karışım hızı (U_{ann}) parametre olarak alındığında izokinetik olmayan şartlarda ölçülen boyutsuz radyal uzaklığa (BRU) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=72 \mu\text{m}$ ve $C_f=2\%$ (v/v) için)

U_{ann} , m/s	BRU						
	0.06	0.27	0.36	0.44	0.54	0.74	0.94
0.0120 $Re_m=991$	3.85	4.29	4.07	4.74	4.86	4.79	5.11
0.0239 $Re_m=1833$	4.74	5.36	5.12	5.55	5.62	5.55	5.08
0.1100 $Re_m=8717$	6.10	7.96	7.93	7.98	8.21	7.27	7.73
0.1574 $Re_m=12629$	6.61	8.99	8.81	8.27	8.89	8.80	8.23
0.1999 $Re_m=16025$	6.11	6.93	6.94	7.06	6.81	6.90	6.96
0.2267 $Re_m=17738$	8.19	9.24	9.27	9.43	9.06	8.89	9.44

Tablo 1.15.a. Boyutsuz radyal uzaklık (BRU) parametre olarak alındığında izokinetik şartlarda ölçülen karışım hızına (U_{ann}) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=72 \mu\text{m}$ ve $C_f=2\%$ (v/v) için)

BRU	U_{ann} , m/s				
	0.0239 $Re_m=1891$	0.1100 $Re_m=8948$	0.1574 $Re_m=12941$	0.1999 $Re_m=16773$	0.2267 $Re_m=18248$
0.06	0.07	0.44	2.16	7.62	8.76
0.27	0.06	1.06	2.51	7.27	9.92
0.36	0.09	0.97	1.70	7.57	9.72
0.44	0.07	1.35	2.73	7.39	8.12
0.54	0.08	1.24	3.20	7.69	9.32
0.74	0.07	0.64	2.56	6.75	8.89
0.94	0.09	1.33	2.59	8.46	9.73
$\bar{\rho}_s$	0.07	3.10	4.60	7.06	8.78
$\bar{\Phi}_s$	0.00030	0.00371	0.00994	0.02940	0.03658
\bar{P}_m	0.999421	1.004082	1.012745	1.039896	1.050051

Tablo 1.15.b. Karışım hızı (U_{ann}) parametre olarak alındığında izokinetik şartlarda ölçülen boyutsuz radyal uzaklığa (BRU) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=72 \mu\text{m}$ ve $C_f=2\%$ (v/v) için)

U_{ann} , m/s	BRU						
	0.06	0.27	0.36	0.44	0.54	0.74	0.94
0.0239 $Re_m=1891$	0.07	0.06	0.09	0.07	0.08	0.07	0.09
0.1100 $Re_m=8948$	0.44	1.06	0.97	1.35	1.24	0.64	1.33
0.1574 $Re_m=12941$	2.16	2.51	1.70	2.73	3.20	2.56	2.59
0.1999 $Re_m=16773$	7.62	7.27	7.57	7.39	7.69	6.75	8.46
0.2267 $Re_m=18248$	8.76	9.92	9.72	8.12	9.32	8.89	9.73

Tablo 1.16.a. Su-felspat karışımlarının izokinetik şartlarda iki-faz aksel sürtünmeli basınç kaybına karşılık karışım hızları ($d_p=72 \mu\text{m}$ için)

U_{ann} , m/s	C_f	
	1% v/v	2% v/v
0.0239	377.93	613.91
0.1100	403.30	761.33
0.1574	327.10	679.31
0.1999	276.14	612.30
0.2267	253.08	550.69

Tablo 1.16.b. Su-felspat karışımlarının izokinetik şartlarda durgun basıncı da içeren iki-faz aksel sürtünmeli basınç kaybına karşılık karışım hızları ($d_p=72 \mu\text{m}$ için)

U_{ann} , m/s	C_f	
	1% v/v	2% v/v
0.0239	10200.63	10414.88
0.1100	10234.45	10608.01
0.1574	10181.15	10610.95
0.1999	10175.17	10810.2
0.2267	10221.57	10848.17

Tablo 1.16.c. Su-felspat karışımlarının izokinetik şartlarda iki-faz deneysel sürtünme katsayısına karşılık karışım hızları ($d_p=72 \mu\text{m}$ için)

U_{ann} , m/s	C_f	
	1% v/v	2% v/v
0.0239	26.36	42.91
0.1100	1.33	2.50
0.1574	0.52	1.08
0.1999	0.27	0.59
0.2267	0.19	0.41

Tablo 1.17.a. Boyutsuz radyal uzaklık (BRU) parametre olarak alındığında izokinetik olmayan şartlarda ölçülen karışım hızına (U_{ann}) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=138 \mu\text{m}$ ve $C_f=1\%$ (v/v) için)

BRU	$U_{ann}, \text{m/s}$					
	0.0120 $Re_m=1060$	0.0239 $Re_m=2038$	0.1100 $Re_m=9400$	0.1574 $Re_m=13824$	0.1999 $Re_m=17443$	0.2267 $Re_m=20131$
0.06	0.28	0.51	1.74	2.10	2.37	2.72
0.27	0.23	0.58	1.97	2.25	2.32	2.85
0.36	0.46	0.72	1.82	2.40	2.60	2.94
0.44	0.48	0.68	1.77	2.27	2.59	3.02
0.54	0.40	0.65	1.75	2.21	2.51	2.90
0.74	0.37	0.58	1.73	2.00	2.37	3.02
0.94	0.31	0.61	1.94	2.18	2.40	3.02
$\bar{\rho}_s$	0.34	0.58	1.70	2.05	2.29	2.76
$\bar{\varphi}_s$	0.001532	0.002417	0.007066	0.008551	0.00954	0.011510
$\bar{\rho}_m$	1.000699	1.002097	1.008585	1.010556	1.011963	1.014644

Tablo 1.17.b. Karışım hızı (U_{ann}) parametre olarak alındığında izokinetik olmayan şartlarda ölçülen boyutsuz radyal uzaklığa (BRU) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=138 \mu\text{m}$ ve $C_f=1\%$ (v/v) için)

$U_{ann}, \text{m/s}$	BRU						
	0.06	0.27	0.36	0.44	0.54	0.74	0.94
0.0120 $Re_m=1060$	0.28	0.23	0.46	0.48	0.40	0.37	0.31
0.0239 $Re_m=2038$	0.51	0.58	0.72	0.68	0.65	0.58	0.61
0.1100 $Re_m=9400$	1.74	1.97	1.82	1.77	1.75	1.73	1.94
0.1574 $Re_m=13824$	2.10	2.25	2.40	2.27	2.21	2.00	2.18
0.1999 $Re_m=17443$	2.37	2.32	2.60	2.59	2.51	2.37	2.40
0.2267 $Re_m=20131$	2.72	2.85	2.94	3.02	2.90	3.02	3.02

Tablo 1.18.a. Boyutsuz radyal uzaklık (BRU) parametre olarak alındığında izokinetik şartlarda ölçülen karışım hızına (U_{ann}) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=138 \mu\text{m}$ ve $C_f=1\%$ (v/v) için)

BRU	U_{ann} , m/s				
	0.0239 $Re_m=1759$	0.1100 $Re_m=8572$	0.1574 $Re_m=12605$	0.1999 $Re_m=15870$	0.2267 $Re_m=19277$
0.06	0.06	0.94	2.03	2.32	5.82
0.27	0.05	2.63	2.91	3.73	6.90
0.36	0.07	2.16	2.79	3.50	4.04
0.44	0.06	2.58	3.12	4.13	10.22
0.54	0.06	2.39	2.73	3.39	3.78
0.74	0.06	1.48	2.35	3.08	6.21
0.94	0.09	3.97	4.27	4.35	5.82
$\bar{\rho}_s$	0.06	1.83	2.68	3.22	5.26
$\bar{\Phi}_s$	0.00026	0.00761	0.01116	0.01340	0.02191
$\bar{\rho}_m$	0.999611	1.009686	1.014545	1.017708	1.029350

Tablo 1.18.b. Karışım hızı (U_{ann}) parametre olarak alındığında izokinetik şartlarda ölçülen boyutsuz radyal uzaklığa (BRU) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=138 \mu\text{m}$ ve $C_f=1\%$ (v/v) için)

U_{ann} , m/s	BRU						
	0.06	0.27	0.36	0.44	0.54	0.74	0.94
0.0239 $Re_m=1759$	0.06	0.05	0.07	0.06	0.06	0.06	0.09
0.1100 $Re_m=8572$	0.94	2.63	2.16	2.58	2.39	1.48	3.97
0.1574 $Re_m=12605$	2.03	2.91	2.79	3.12	2.73	2.35	4.27
0.1999 $Re_m=15870$	2.32	3.73	3.50	4.13	3.39	3.08	4.35
0.2267 $Re_m=19277$	5.82	6.90	4.04	10.22	3.78	6.21	5.82

Tablo 1.19.a. Boyutsuz radyal uzaklık (BRU) parametre olarak alındığında izokinetik olmayan şartlarda ölçülen karışım hızına (U_{ann}) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=138 \mu\text{m}$ ve $C_f=2\%$ (v/v) için)

BRU	U_{ann} , m/s					
	0.0120 $Re_m=934$	0.0239 $Re_m=1862$	0.1100 $Re_m=8037$	0.1574 $Re_m=11578$	0.1999 $Re_m=14633$	0.2267 $Re_m=16398$
0.06	1.08	1.72	2.94	4.74	9.36	8.79
0.27	0.78	2.66	4.58	5.19	10.70	9.30
0.36	0.79	2.19	3.10	6.13	10.39	8.80
0.44	0.61	1.53	3.51	5.75	9.72	9.48
0.54	1.07	1.84	4.02	6.31	10.49	9.27
0.74	0.87	1.21	3.08	6.33	9.93	9.39
0.94	1.11	1.25	4.03	5.99	10.48	9.90
$\bar{\rho}_s$	0.88	1.55	3.34	5.61	7.89	8.76
$\bar{\varphi}_s$	0.001532	0.006476	0.013927	0.023389	0.032874	0.036483
$\bar{\rho}_m$	1.001622	1.008101	1.18728	1.031928	1.045201	1.050285

Tablo 1.19.b. Karışım hızı (U_{ann}) parametre olarak alındığında izokinetik olmayan şartlarda ölçülen boyutsuz radyal uzaklığa (BRU) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=138 \mu\text{m}$ ve $C_f=2\%$ (v/v) için)

U_{ann} , m/s	BRU						
	0.06	0.27	0.36	0.44	0.54	0.74	0.94
0.0120 $Re_m=934$	1.08	0.78	0.79	0.61	1.07	0.87	1.11
0.0239 $Re_m=1862$	1.72	2.66	2.19	1.53	1.84	1.21	1.25
0.1100 $Re_m=8037$	2.94	4.58	3.10	3.51	4.02	3.08	4.03
0.1574 $Re_m=11578$	4.74	5.19	6.13	5.75	6.31	6.33	5.99
0.1999 $Re_m=14633$	9.36	10.70	10.39	9.72	10.49	9.93	10.48
0.2267 $Re_m=16398$	8.79	9.30	8.80	9.48	9.27	9.39	9.90

Tablo 1.20.a. Boyutsuz radyal uzaklık (BRU) parametre olarak alındığında izokinetik şartlarda ölçülen karışım hızına (U_{ann}) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=138 \mu\text{m}$ ve $C_f=2\%$ (v/v) için)

BRU	U_{ann} , m/s				
	0.0239 $Re_m=2025$	0.1100 $Re_m=8110$	0.1574 $Re_m=10846$	0.1999 $Re_m=15639$	0.2267 $Re_m=17818$
0.06	0.05	1.25	4.15	7.69	9.41
0.27	0.05	1.74	8.93	10.22	11.04
0.36	0.05	1.19	9.59	10.83	11.68
0.44	0.05	1.05	4.17	6.69	7.71
0.54	0.05	0.88	8.00	10.50	11.02
0.74	0.05	1.57	5.61	6.81	7.55
0.94	0.06	1.91	7.56	8.10	9.66
$\bar{\rho}_s$	0.05	4.90	6.60	8.08	9.08
$\bar{\Phi}_s$	0.00021	0.00560	0.02750	0.03366	0.03785
$\bar{\rho}_m$	0.999031	1.007058	1.037881	1.046069	1.051912

Tablo 1.20.b. Karışım hızı (U_{ann}) parametre olarak alındığında izokinetik şartlarda ölçülen boyutsuz radyal uzaklığa (BRU) karşılık lokal katı-faz yoğunlukları ($\rho_s \cdot 10^{-1}$) (kg/m^3) ($d_p=138 \mu\text{m}$ ve $C_f=2\%$ (v/v) için)

U_{ann} , m/s	BRU						
	0.06	0.27	0.36	0.44	0.54	0.74	0.94
0.0239 $Re_m=2025$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
0.1100 $Re_m=8110$	1.25	1.74	1.19	1.05	0.88	1.57	1.91
0.1574 $Re_m=10846$	4.15	8.93	9.59	4.17	8.00	5.61	7.56
0.1999 $Re_m=15639$	7.69	10.22	10.83	6.69	10.50	6.81	8.10
0.2267 $Re_m=17818$	9.41	11.04	11.68	7.71	11.02	7.55	9.66

Tablo 1.21.a. Su-felspat karışımlarının izokinetik şartlarda iki-faz eksenel sürtünmeli basınç kaybına karşılık karışım hızları ($d_p=138 \mu\text{m}$ için)

U_{ann} , m/s	C_f	
	1% v/v	2% v/v
0.0239	431.34	753.41
0.1100	537.79	900.38
0.1574	493.79	814.87
0.1999	437.76	701.44
0.2267	401.36	625.31

Tablo 1.21.b. Su-felspat karışımlarının izokinetik şartlarda durgun basıncı da içeren iki-faz eksenel sürtünmeli basınç kaybına karşılık karışım hızları ($d_p=138 \mu\text{m}$ için)

U_{ann} , m/s	C_f	
	1% v/v	2% v/v
0.0239	10234.17	10550.55
0.1100	10439.43	10776.25
0.1574	10443.08	10993
0.1999	10418.07	10959.87
0.2267	10495.83	10941.04

Tablo 1.21.c. Su-felspat karışımlarının izokinetik şartlarda iki-faz deneysel sürtünme katsayısına karşılık karışım hızları ($d_p=138 \mu\text{m}$ için)

U_{ann} , m/s	C_f	
	1% v/v	2% v/v
0.0239	30.14	52.68
0.1100	1.76	2.95
0.1574	0.78	1.26
0.1999	0.43	0.67
0.2267	0.30	0.46

EK 2

Tablo 2.1.a. 2^3 Faktöriyel Tasarımı ($U_{ann}=0.227$ m/s ve $U_{ann}=0.11$ m/s için)

#	C_f % (v/v)		d_p , μm		U_{ann} , m/s		$\bar{\rho}_s$, kg/m^3
1	-	1	-	72	-	0.11	8.50
2	+	2	-	72	-	0.11	31.00
3	-	1	+	138	-	0.11	18.27
4	+	2	+	138	-	0.11	49.00
5	-	1	-	72	+	0.227	30.50
6	+	2	-	72	+	0.227	87.79
7	-	1	+	138	+	0.227	52.59
8	+	2	+	138	+	0.227	90.84

Tablo 2.1.b. $\bar{\rho}_s$ ölçümlerinde bağımsız parametrelerin sonuçlara temel etkileri ve bu parametreler arasındaki etkileşimler (Tablo A.1.a için)

Temel etki		Parametreler arasındaki etkileşimler	
C_f	37.19	$C_f * U_{ann}$	10.58
d_p	13.22	$C_f * d_p$	-2.70
U_{ann}	38.74	$d_p * U_{ann}$	-0.66
		$C_f * d_p * U_{ann}$	-6.82

Tablo 2.1.c. Yates Algoritması ile bulunan $\bar{\rho}_s$ ölçümlerindeki bağımsız parametrelerin sonuçlara temel etkileri ve bu parametreler arasındaki etkileşimler ($U_{ann}=0.227$ m/s ve $U_{ann}=0.11$ m/s için)

#	C_f % (v/v)	d_p , μm	U_{ann} , m/s		$\bar{\rho}_s$, kg/m^3	Bölen	1	2	3	Karar	
			-	+							
1	- 1	- 72	-	0.11	14.24	8	39.50	106.77	368.49	20.47	Ortalama
2	+ 2	- 72	-	0.11	19.16	4	67.27	261.72	148.77	37.19	C_f
3	- 1	+ 138	-	0.11	18.27	4	118.30	53.23	52.89	13.22	d_p
4	+ 2	+ 138	-	0.11	17.53	4	143.42	95.54	-10.81	-2.70	$C_f * d_p$
5	- 1	- 72	+	0.227	30.50	4	22.50	27.77	154.95	38.74	U_{ann}
6	+ 2	- 72	+	0.227	87.79	4	30.73	25.12	42.31	10.58	$C_f * U_{ann}$
7	- 1	+ 138	+	0.227	52.59	4	57.29	8.23	-2.65	-0.66	$d_p * U_{ann}$
8	+ 2	+ 138	+	0.227	90.84	4	38.25	-19.04	-27.27	-6.82	$C_f * d_p * U_{ann}$

Tablo 2.2.a. 2³ Faktöriyel Tasarımı ($U_{ann}= 0.11$ m/s ve $U_{ann}= 0.024$ m/s için)

#	C_f % (v/v)		d_p , μm		U_{ann} , m/s		$\bar{\rho}_S$, kg/m^3
1	-	1	-	72	-	0.024	4.24
2	+	2	-	72	-	0.024	0.73
3	-	1	+	138	-	0.024	0.63
4	+	2	+	138	-	0.024	0.49
5	-	1	-	72	+	0.11	8.50
6	+	2	-	72	+	0.11	31.00
7	-	1	+	138	+	0.11	18.27
8	+	2	+	138	+	0.11	49.00

Tablo 2.2.b. $\bar{\rho}_S$ ölçümlerinde bağımsız parametrelerin sonuçlara temel etkileri ve bu parametreler arasındaki etkileşimler (Tablo A.2.a için)

Temel etki		Parametreler arasındaki etkileşimler	
C_f	12.40	$C_f * U_{ann}$	14.22
d_p	5.98	$C_f * d_p$	2.90
U_{ann}	25.17	$d_p * U_{ann}$	7.91
		$C_f * d_p * U_{ann}$	1.21

Tablo 2.2.c. Yates Algoritması ile bulunan $\bar{\rho}_S$ ölçümlerindeki bağımsız parametrelerin sonuçlara temel etkileri ve bu parametreler arasındaki etkileşimler ($U_{ann}=0.11$ m/s ve $U_{ann}=0.024$ m/s için)

#	C_f % (v/v)		$d_p, \mu m$	$U_{ann}, m/s$	$\bar{\rho}_S, kg/m^3$	Bölen	1	2	3	Karar			
	-	+											
1	-	1	-	72	-	0.024	4.24	8	4.97	6.09	112.86	6.27	Ortalama
2	+	2	-	72	-	0.024	0.73	4	1.12	106.77	49.58	12.40	C_f
3	-	1	+	138	-	0.024	0.63	4	39.50	-3.65	23.92	5.98	d_p
4	+	2	+	138	-	0.024	0.49	4	67.27	53.23	11.61	2.90	$C_f * d_p$
5	-	1	-	72	+	0.11	8.50	4	-3.51	-3.85	100.68	25.17	U_{ann}
6	+	2	-	72	+	0.11	34.52	4	-0.14	27.77	56.88	14.22	$C_f * U_{ann}$
7	-	1	+	138	+	0.11	18.27	4	22.50	3.38	31.62	7.91	$d_p * U_{ann}$
8	+	2	+	138	+	0.11	46.26	4	30.73	8.23	4.85	1.21	$C_f * d_p * U_{ann}$

Tablo 2.3.a. 2^3 Faktöriyel Tasarımı ($U_{ann}=0.227$ m/s ve $U_{ann}=0.11$ m/s için)

#	C_f % (v/v)		d_p , μm		U_{ann} , m/s		$\Delta P/L$, Pa/m
	-	1	-	72	-	0.11	
1	-	1	-	72	-	0.11	403.30
2	+	2	-	72	-	0.11	761.33
3	-	1	+	138	-	0.11	537.79
4	+	2	+	138	-	0.11	900.38
5	-	1	-	72	+	0.227	253.08
6	+	2	-	72	+	0.227	550.69
7	-	1	+	138	+	0.227	401.36
8	+	2	+	138	+	0.227	625.31

Tablo 2.3.b. $\Delta P/L$ ölçümlerinde bağımsız parametrelerin sonuçlara temel etkileri ve bu parametreler arasındaki etkileşimler (Tablo A.3.a için)

Temel etki		Parametreler arasındaki etkileşimler	
C_f	310.54	$C_f * U_{ann}$	-49.77
d_p	124.11	$C_f * d_p$	-17.28
U_{ann}	-193.09	$d_p * U_{ann}$	-12.66
		$C_f * d_p * U_{ann}$	-19.55

Tablo 2.3.c. Yates Algoritması ile bulunan $\Delta P/L$ ölçümlerindeki bağımsız parametrelerin sonuçlara temel etkileri ve bu parametreler arasındaki etkileşimler ($U_{ann} = 0.227$ m/s ve $U_{ann} = 0.11$ m/s için)

#	C _f % (v/v)		d _p , µm	U _{ann} , m/s	$\Delta P/L_s$ Pa/m	Bölen	1	2	3	Karar	
	-	+									
1	-	1	-	0.11	403.3	8	1164.63	2602.80	4433.24	246.29	Ortalama
2	+	2	-	0.11	761.33	4	1438.17	1830.44	1242.17	310.54	C _f
3	-	1	+	0.11	539.54	4	803.77	720.62	496.44	124.11	d _p
4	+	2	+	0.11	900.38	4	1026.67	521.55	-69.10	-17.28	C _f * d _p
5	-	1	-	0.227	253.08	4	358.03	273.54	-772.36	-193.09	U _{ann}
6	+	2	-	0.227	587.62	4	362.59	222.89	-199.07	-49.77	C _f * U _{ann}
7	-	1	+	0.227	416.93	4	297.61	4.56	-50.65	-12.66	d _p * U _{ann}
8	+	2	+	0.227	669.89	4	223.94	-73.66	-78.22	-19.55	C _f * d _p * U _{ann}

Tablo 2.4.a. 2^3 Faktöriyel Tasarımı ($U_{ann}= 0.11$ m/s ve $U_{ann}= 0.024$ m/s için)

#	C_f % (v/v)		d_p , μm		U_{ann} , m/s		$\Delta P/L$, Pa/m
	-	1	-	72	-	0.024	
1	-	1	-	72	-	0.024	377.93
2	+	2	-	72	-	0.024	607.85
3	-	1	+	138	-	0.024	427
4	+	2	+	138	-	0.024	743.45
5	-	1	-	72	+	0.11	403.3
6	+	2	-	72	+	0.11	761.33
7	-	1	+	138	+	0.11	539.54
8	+	2	+	138	+	0.11	900.38

Tablo 2.4.b. $\Delta P/L$ ölçümlerinde bağımsız parametrelerin sonuçlara temel etkileri ve bu parametreler arasındaki etkileşimler (Tablo A.4.a için)

Temel etki		Parametreler arasındaki etkileşimler	
C_f	319.67	$C_f * U_{ann}$	40.64
d_p	116.61	$C_f * d_p$	22.66
U_{ann}	106.56	$d_p * U_{ann}$	20.16
		$C_f * d_p * U_{ann}$	-20.38

Tablo 2.4.c. Yates Algoritması ile bulunan $\Delta P/L$ ölçümlerindeki bağımsız parametrelerin sonuçlara temel etkileri ve bu parametreler arasındaki etkileşimler ($U_{ann} = 0.11$ m/s ve $U_{ann} = 0.024$ m/s için)

#	C_f % (v/v)	d_p , μm		U_{ann} , m/s	$\Delta P/L$, Pa/m	Bölen	1	2	3	Karar	
		-	+								
1	-	1	72	-	0.024	8	991.84	2176.58	4779.38	265.52	Ortalama
2	+	2	72	-	0.024	4	1184.74	2602.80	1278.67	319.67	C_f
3	-	1	138	-	0.024	4	1164.63	558.05	466.45	116.61	d_p
4	+	2	138	-	0.024	4	1438.17	720.62	90.64	22.66	$C_f * d_p$
5	-	1	72	+	0.11	4	235.98	192.90	426.23	106.56	U_{ann}
6	+	2	72	+	0.11	4	322.07	273.54	162.57	40.64	$C_f * U_{ann}$
7	-	1	138	+	0.11	4	358.03	86.09	80.64	20.16	$d_p * U_{ann}$
8	+	2	138	+	0.11	4	362.59	4.56	-81.53	-20.38	$C_f * d_p * U_{ann}$

Tablo 2.5.a. İzokinetik olmayan şartlarda 2^3 Faktöriyel Tasarımı ($U_{ann}= 0.227$ m/s ve $U_{ann}= 0.11$ m/s için)

#	C_f % (v/v)		d_p , μm		U_{ann} , m/s		$\bar{\rho}_s$, kg/m^3
	-	1	-	72	-	0.11	
1	-	1	-	72	-	0.11	29.02
2	+	2	-	72	-	0.11	71.24
3	-	1	+	138	-	0.11	16.96
4	+	2	+	138	-	0.11	33.42
5	-	1	-	72	+	0.227	32.60
6	+	2	-	72	+	0.227	85.87
7	-	1	+	138	+	0.227	27.62
8	+	2	+	138	+	0.227	87.56

Tablo 2.5.b. $\bar{\rho}_s$ ölçümlerinde bağımsız parametrelerin sonuçlara temel etkileri ve bu parametreler arasındaki etkileşimler (Tablo A.5.a için)

Temel etki		Parametreler arasındaki etkileşimler	
C_f	42.98	$C_f * U_{ann}$	13.63
d_p	-13.29	$C_f * d_p$	-4.77
U_{ann}	20.75	$d_p * U_{ann}$	11.65
		$C_f * d_p * U_{ann}$	8.11

Tablo 2.5.c. Yates Algoritması ile bulunan izokinetik olmayan şartlarda $\bar{\rho}_s$ ölçümlerindeki bağımsız parametrelerin sonuçlara temel etkileri ve bu parametreler arasındaki etkileşimler ($U_{ann} = 0.227$ m/s ve $U_{ann} = 0.11$ m/s için)

#	C_f % (v/v)		$d_p, \mu m$	$U_{ann}, m/s$		$\bar{\rho}_s,$ kg/m^3	Bölen	1	2	3	Karar	
	-	+		-	+							
1	-	1	-	-	0.11	29.023	8	100.27	150.65	384.29	21.35	Ortalama
2	+	2	-	-	0.11	71.244	4	50.38	233.64	171.90	42.98	C_f
3	-	1	+	-	0.11	16.958	4	118.47	58.69	-53.18	-13.29	d_p
4	+	2	+	-	0.11	33.424	4	115.18	113.21	-19.08	-4.77	$C_f * d_p$
5	-	1	-	+	0.227	32.599	4	42.22	-49.89	82.99	20.75	U_{ann}
6	+	2	-	+	0.227	85.868	4	16.47	-3.29	54.53	13.63	$C_f * U_{ann}$
7	-	1	+	+	0.227	27.615	4	53.27	-25.76	46.59	11.65	$d_p * U_{ann}$
8	+	2	+	+	0.227	87.56	4	59.95	6.68	32.43	8.11	$C_f * d_p * U_{ann}$

Tablo 2.6.a. İzokinetik olmayan şartlarda 2^3 Faktöriyel Tasarımı ($U_{ann}= 0.11$ m/s ve $U_{ann}= 0.024$ m/s için)

#	C_f % (v/v)		d_p , μm		U_{ann} , m/s		$\bar{\rho}_s$, kg/m^3
	-	1	-	72	-	0.024	
1	-	1	-	72	-	0.024	13.85
2	+	2	-	72	-	0.024	50.16
3	-	1	+	138	-	0.024	5.80
4	+	2	+	138	-	0.024	15.54
5	-	1	-	72	+	0.11	29.02
6	+	2	-	72	+	0.11	71.24
7	-	1	+	138	+	0.11	16.96
8	+	2	+	138	+	0.11	33.42

Tablo 2.6.b. $\bar{\rho}_s$ ölçümlerinde bağımsız parametrelerin sonuçlara temel etkileri ve bu parametreler arasındaki etkileşimler (Tablo A.6.a için)

Temel etki		Parametreler arasındaki etkileşimler	
C_f	26.19	$C_f * U_{ann}$	3.16
d_p	-23.14	$C_f * d_p$	-13.08
U_{ann}	16.32	$d_p * U_{ann}$	-1.80
		$C_f * d_p * U_{ann}$	0.20

Tablo 2.6.c. Yates Algoritması ile bulunan izokinetik olmayan şartlarda \bar{p}_S ölçümlerindeki bağımsız parametrelerin sonuçlara temel etkileri ve bu parametreler arasındaki etkileşimler ($U_{ann} = 0.11$ m/s ve $U_{ann} = 0.024$ m/s için)

#	C_f % (v/v)	$d_p, \mu m$	$U_{ann}, m/s$		$\bar{p}_S,$ kg/m ³	Bölen	1	2	3	Karar	
			-	+							
1	-	72	-	0.024	13.85	8	64.01	85.36	236.01	13.11	Ortalama
2	+	72	-	0.024	50.16	4	21.34	150.65	104.74	26.18	C_f
3	-	138	-	0.024	5.80	4	100.27	46.05	-92.55	-23.14	d_p
4	+	138	-	0.024	15.54	4	50.38	58.69	-52.32	-13.08	$C_f * d_p$
5	-	72	+	0.11	29.02	4	36.31	-42.67	65.29	16.32	U_{ann}
6	+	72	+	0.11	71.24	4	9.74	-49.89	12.64	3.16	$C_f * U_{ann}$
7	-	138	+	0.11	16.96	4	42.22	-26.57	-7.22	-1.80	$d_p * U_{ann}$
8	+	138	+	0.11	33.42	4	16.47	-25.76	0.81	0.20	$C_f * d_p * U_{ann}$

Tablo 2.7.a. F-testi sonuçları ($d_p = 138 \mu\text{m}$, $C_f = \%1$, $U_{\text{ann}} = 0.227 \text{ m/s}$ ve $U_{\text{ann}} = 0.11 \text{ m/s}$ için)

	$U_{\text{ann}} = 0.227 \text{ m/s}$	$U_{\text{ann}} = 0.11 \text{ m/s}$
Birleştirilmiş varyans	404.13	1120.26
Birleştirilmiş varyans oranları	2.77	
Olasılık	$\approx \%5$	
Sonuç	Akış karakteristikleri benzer	

Tablo 2.7.b. F-testi sonuçları ($d_p = 138 \mu\text{m}$, $C_f = \%1$, $U_{\text{ann}} = 0.11 \text{ m/s}$ ve $U_{\text{ann}} = 0.024 \text{ m/s}$ için)

	$U_{\text{ann}} = 0.11 \text{ m/s}$	$U_{\text{ann}} = 0.024 \text{ m/s}$
Birleştirilmiş varyans	1120.26	5.18
Birleştirilmiş varyans oranları	216.33	
Olasılık	$< \%0.1$	
Sonuç	Akış karakteristikleri farklı	

Tablo 2.8.a. İzokinetik şartın sağlandığı ve sağlanmadığı durumlarda (diğer parametreler aynı kalarak) yapılan $\bar{\rho}_s$ ölçüm değerlerinin karşılaştırmasını içeren istatistiksel Blok Analizi ($C_f = \%1$, $d_p = 72 \mu\text{m}$ için)

$C_f = \%1$, $d_p = 72 \mu\text{m}$				Sonuçlar		
Blok (U_{ann})	İzokinetik	Nonizokinetik	Blok ortalama	s_T^2	337.47	
0.227 m/s	30.50	32.60	31.55	s_B^2	131.19	
0.20 m/s	18.18	26.77	22.48	s_R^2	26.91	
0.157 m/s	13.46	30.74	22.10	s_T^2/s_R^2	12.54	1-5% Farkli
0.11 m/s	8.50	29.02	18.76	s_B^2/s_R^2	4.88	5-10% Fark yok
0.024 m/s	4.24	13.85	9.05			
Davranış ortalaması	14.98	26.60	20.79			
			Genel ortalama			

Tablo 2.8.b. İzokinetik şartın sağlandığı ve sağlanmadığı durumlarda (diğer parametreler aynı kalarak) yapılan $\bar{\rho}_s$ ölçüm değerlerinin karşılaştırmasını içeren istatistiksel Blok Analizi ($C_f = \%2$, $d_p=72 \mu\text{m}$ için)

$C_f = \%2$, $d_p=72 \mu\text{m}$				Sonuçlar		
Blok (U_{ann})	İzokinetik	Nonizokinetik	Blok ortalama	s_T^2	1363.43	
0.227 m/s	87.79	85.87	86.83	s_B^2	1027.51	
0.20 m/s	70.57	64.26	67.42	s_R^2	328.42	
0.157 m/s	46.00	81.32	63.66	s_T^2/s_R^2	4.15	10-25% Fark yok
0.11 m/s	31.00	71.24	51.12	s_B^2/s_R^2	3.13	10-25% Fark yok
0.024 m/s	0.73	50.16	25.45			
Davranış ortalaması	47.22	70.57	58.90			
			Genel ortalama			

Tablo 2.8.c. İzokinetik şartın sağlandığı ve sağlanmadığı durumlarda (diğer parametreler aynı kalarak) yapılan $\bar{\rho}_s$ ölçüm değerlerinin karşılaştırmasını içeren istatistiksel Blok Analizi ($C_f = \%1$, $d_p = 138 \mu\text{m}$ için)

$C_f = \%1$, $d_p = 138 \mu\text{m}$				Sonuçlar		
Blok (U_{ann})	İzokinetik	Nonizokinetik	Blok ortalama	s_T^2	134.20	
0.227 m/s	52.59	27.62	40.10	s_B^2	366.09	
0.20 m/s	32.16	22.90	27.53	s_R^2	63.58	
0.157 m/s	26.78	20.52	23.65	s_T^2/s_R^2	2.11	10-25% Fark yok
0.11 m/s	18.27	16.96	17.61	s_B^2/s_R^2	5.76	5-10% Fark yok
0.024 m/s	0.63	5.80	3.21			
Davranış ortalaması	26.09	18.76	22.42			
			Genel ortalama			

Tablo 2.8.d. İzokinetik şartın sağlandığı ve sağlanmadığı durumlarda (diğer parametreler aynı kalarak) yapılan $\bar{\rho}_S$ ölçüm değerlerinin karşılaştırmasını içeren istatistiksel Blok Analizi ($C_f = \%2$, $d_p = 138 \mu\text{m}$ için)

$C_f = \%2$, $d_p = 138 \mu\text{m}$				Sonuçlar		
Blok (U_{ann})	İzokinetik	Nonizokinetik	Blok ortalama	s_T^2	24.18	
0.227 m/s	90.84	87.56	89.20	s_B^2	2108.22	
0.20 m/s	80.77	78.90	79.84	s_R^2	66.52	
0.157 m/s	66.00	56.13	61.07	s_T^2/s_R^2	0.36	>25% Fark yok
0.11 m/s	49.00	33.42	41.21	s_B^2/s_R^2	31.69	1-5% Farkli
0.024 m/s	0.50	15.54	8.02			
Davranış ortalaması	57.42	54.31	55.87			
			Genel ortalama			

PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Kodu: MİSAG-226

Proje Başlığı: İKİ FAZLI KATI-SIVI AKIŞLARIN HİDRODİNAMİK AÇIDAN İNCELENMESİ

Proje Yürütücüsü ve Yardımcı Araştırmacılar:
Prof. Dr. Tülay A. Özbelge
Gülden Camçı

Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:
ODTÜ Kimya Mühendisliği Bölümü 06531 ANKARA

Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:
Tübitak (esas destek)
ODTÜ AFP (yardımcı destek)

Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 01/09/2002 – 01/09/2004

Öz (en çok 70 kelime):

Endüstrinin değişik alanlarında katı-sıvı karışımlarının akışlarıyla sıkça karşılaşmaktadır. Bu alanlar kısaca şöyle sıralanabilir: Konserve işlemleri, çevrimli akışkan yataklar, mineral ve cevherlerin hidrolik taşınım işlemleri, ve madenlerin zenginleştirilmesi. Bu sistemlerde lokal katı konsantrasyonları değişik yöntemlerle belirlenebilir. Yapılacak çalışmada izokinetik örnekleme yöntemi seçilmiştir, çünkü bu yöntem kullanılan düzeneğe en uygun olanıdır.

Bu çalışmada eşmerkezli iki boru arasında (annulus) yukarı doğru akan su-feldspat karışımlarının bölgesel (lokal) katı yoğunluğu dağılımları incelenmiştir. Bölgesel katı yoğunluğu ölçümleri annulus'un tam gelişmiş akış alanındaki kesitinde ölçülmüştür, annulus'un dahil olduğu kapalı-devre sistemde bir besleme tankı, bir hız ayarlanabilen çamur pompası, bir orifis metre, bir ısı değiştirici, bir sıcaklık sondası ve bir boşaltma hattı yer almaktadır. Çamur karışımları 72 ve 138 µm olmak üzere iki değişik büyüklükte katı parçacık kullanılarak ve hacimsel olarak %1 ve 2 olmak üzere iki değişik katı besleme konsantrasyonunda hazırlanmıştır. Değişik çalışma koşullarında radyal yöndeki katı yoğunluğu profilleri ve test bölgesindeki eksenel sürtünmeli basınç kayıplarını elde etmek için gerçekleştirilen deneylerde, bağımlı değişkenler: lokal katı yoğunluğu, lokal karışım hızı ve test bölgesindeki eksenel sürtünmeli basınç kayıdır.

Bölgesel katı yoğunlukları bir örnekleme sondası kullanılarak ölçülmüştür. Bu sonda başlangıçta bölgesel hızları bulmak için bir pitot tüp olarak kullanılmıştır. Bu veriler yardımıyla, bölgesel katı yoğunlukları aynı örnekleme sondasıyla izokinetik şartlarda ve karşılaştırma yapmak amacıyla izokinetik olmayan şartlarda da gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, numuneleri izokinetik şartlarda alabilmek için bir izokinetik örnekleme ünitesi tasarlanmış ve kurulmuştur. Bu şekilde sondadaki örnekleme hızıyla annulus'taki gerçek lokal hızı çok yakın olarak eşitlemek mümkün olmaktadır. Hızları eşitlemek için gerekli olan sabit dengeleyici basınç, Azot gazı ile sağlanmıştır. Test alanındaki yedi değişik radyal noktada izokinetik ve izokinetik olmayan şartlarda alınan numunelerin içindeki katı miktarları gravimetrik yöntemle bulunmuştur.

Hacimsel olarak %1 katı besleme konsantrasyonunda elde edilen bölgesel katı yoğunlukları, %2 katı besleme konsantrasyonuna göre daha tekdüze bir davranış göstermiştir. Artan katı parçacık konsantrasyonu ve parçacık büyüklüğü, radyal lokal katı konsantrasyonu grafiklerinin şeklini değiştirmiştir. Bölgesel katı yoğunlukları genellikle literatürdeki çalışmalara benzer olarak annulus'un dış duvarı civarında iç duvar yakınındakilere göre daha fazla bulunmuştur. Katı yoğunlukları $\lambda=0.4$ olan boyutsuz bir radyal uzaklıkta, hız profillerinin maksimum olduğu noktada, genel olarak azalan bir trend takip etmiştir. Test bölümü boyunca tam gelişmiş akış bölgesinde iki-faz eksenel sürtünmeli basınç değişimlerinin sabit bir karışım hızında, artan katı besleme konsantrasyonu ve parçacık büyüklüğüyle arttığı gözlemlenmiştir. İzokinetik örnekleme sonuçları, bölgesel katı yoğunluklarının artan karışım hızıyla her radyal uzaklıkta arttığını göstermektedir. Bu davranış, izokinetik olmayan şartlarda yapılan ölçümlerde net olarak gözlenememiştir.

Kargaşalı akış bölgesinde izokinetik şartlarda gerçekleştirilen ölçümlerde, yaklaşık $\lambda = (R-R_i)/(R_o-R_i) = 0.4$ olan boyutsuz bir radyal uzaklıkta lokal katı -faz (LKF) yoğunlukları lokal minimum değerler vermişler, daha sonra annulus'un iç ve dış duvarlarına doğru tekrar artmışlardır. Annulus'un duvarlarında bu değerlerin sıfır olduğu düşünülmektedir. Katı parçacık çapı 138 µm olan feldspat %1 hacimsel konsantrasyonda kullanıldığında ise, $\lambda \approx 0.4$ olan radyal uzaklıkta, LKF yoğunlukları maksimum değere ulaşmışlardır. Bu davranışın nedeni, iki-faz akış karakteristiklerinin deney parametrelerinin bu kombinasyonunda değişim göstermesi olabilir. LKF yoğunlukları bu deney şartlarında da iç ve dış duvara doğru artmıştır. Laminar akış bölgesinde izokinetik şartlarda gerçekleştirilen ölçümlerde, yaklaşık $\lambda \approx 0.35$ ve 0.7 olan boyutsuz radyal uzaklıklarda LKF yoğunlukları küçük azalışlar vermiş ve duvarlara doğru tekrar artmışlardır.

Bölgesel katı yoğunluklarındaki radyal uzaklık boyunca gerçekleşen değişimler izokinetik örnekleme şartlarında daha açık olarak izlenebilmiştir. İzokinetik olmayan şartlarda yapılan ölçümlerde bu değişimler daha yüksek deneysel hatanın etkisiyle açıkça gözlenememiştir. İlaveten, deneysel verilerin değişik istatistiksel tekniklerle analizi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İzokinetik örnekleme; Annular (eş-merkezli iki-boru arasında) akış; Lokal (bölgesel) katı-faz yoğunluğu; İki-fazlı eksenel sürtünmeli hidrodinamik basınç kaybı; Radyal katı-faz yoğunluk profili (dağılımı).

Projenin Kaynaklanan Yayınlar:

Gülden Camçı and Tülay A. Özbelge, "Determination of Local Solid Densities in Upflow of Dilute Slurries through Vertical Annulus Section of a Closed-Loop System by Isokinetic Sampling Technique" Chemical Engineering Communications dergisinin editörüne gönderilmiştir, fakat henüz revizyon safhasındadır.

Bilim Dalı:

Doçentlik Bilim Dalı Kodu: