

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Anıt. Çamır.Reolojik Model. Geliş. ve
Çamur. Hid. Taşın. Reolojik Özel. İler. Gel.
Yük Kayıp. Araşt.

Doktora Tezi

Hasan Ali

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARITMA ÇAMURU REOLOJİK MODELİNİN
GELİŞTİRİLMESİ VE ÇAMURUN HİDROLİK TAŞINMASINDA
REOLOJİK ÖZELLİKLERİNDEN İLERİ GELEN YÜK
KAYIPLARININ ARAŞTIRILMASI**

**Kim. Yük. Müh. Hasan ALİ
F.B.E. Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında Hazırlanan
DOKTORA TEZİ**

Tez Danışmanı Prof. Dr. Necdet ARAL

İSTANBUL, 1995

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
KÜTÜPHANE DOKÜMANTASYON
DAİRE BAŞKANLIĞI

Kot : R 369
13
Alındığı Yer : F.B. Enstitüsü
Tarih : 19.9.1996
Fatura :
Fiyatı : 85. Bin
Ayniyat No : 1/7
Kayıt No : 524.69
UDC :
Ek :

Y.T.Ü.

KÜTÜPHANE DOK. DAİ. BAŞKANLIĞI

İÇİNDEKİLER

Sayfa No:

SEMBOL LİSTESİ.....	III
ŞEKİL LİSTESİ.....	V
TABLO LİSTESİ	VIII
TEŞEKKÜR.....	X
ÖZET	XI
SUMMARY.....	XII

BÖLÜM 1

1. GİRİŞ	1
1.1. Arıtma Çamurunun Reolojisinin Önemi ve Çalışma Konusunun Belirlenmesi.....	1
1.2. Bu Çalışmanın Amaç ve Kapsamı	2

BÖLÜM 2

2. REOLOJİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	4
2.1. Giriş	4
2.1.1. Newton Akışkanlar	4
2.1.2. Newton Olmayan Akışkanlar	5
2.1.2.1. Bingham Akışkan Modeli	6
2.1.2.2. Ostwald- de Waele Modeli	6
2.1.2.3. Eyring Modeli	7
2.2. Süspansiyon ve Kolloidal Maddelerin Reolojisi	8
2.3. Sert Partiküllü Kolloidal Maddelerin Reolojisi.....	8
2.4. Emülsiyonların Reolojisi	9
2.5. Kömür Çamurunun Reolojisi	11
2.5.1. pH'nin Kömür Çamurunun Reolojik Özelliklerine Etkisi.....	11
2.5.1.1. Kömür Çamurunun Plastik Viskozitesi	12
2.5.1.2. Kömür Çamurunun Bingham Akma Gerilmesi	12
2.6. Polimerlerin Reolojisi	13
2.7. Viskolastik Maddelerin Reolojisi.....	13
2.8. Çimento Çamurunun Reolojisi.....	14
2.8.1. Coutte ve Tüp Viskometreleriyle Yapılan Reolojik Ölçümler.....	14
2.8.1.1. Duvar Sürtünme Analizi	14
2.8.1.2. Geniş Ölçekli Deneyler	18

BÖLÜM 3

3. ARITMA ÇAMURUNA AİT REOLOJİK MODELİN OLUŞTURULMASI VE BORULARDAKİ YÜK KAYBI HESABI İÇİN MATEMATİK BİR BAĞINTININ GELİŞTİRİLMESİ.....	20
3.1. Arıtma Çamuru İçin Reolojik Modelin Önemi	20
3.2. Çamura Ait Reolojik Özelliklerin Belirlenmesi	20
3.3. Çamurların Reolojik Modeli.....	24
3.4. Reolojik Özelliklerine Dayanarak Yük Kaybı Hesabı	24

BÖLÜM 4

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	28
4.1. Toplam Katı Madde Konsantrasyonu Tayini Deneyleri	28
4.2. Arıtma Çamuruna Ait Reolojik Ölçümler	29
4.3. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	31
4.3.1. Arıtma Çamuru Örneklerindeki Reolojik Özelliklerinin Değerlendirilmesi.....	31
4.3.2. Alum Çamuru Reolojik Özelliklerine Sıcaklık Etkisinin Araştırılması	40
4.3.3. Çamurun Hidrolik Taşınmasında Oluşan Basınç Düşüşü Bağıntısının geliştirilmesi.....	42

BÖLÜM 5

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	58
KAYNAKLAR	60
EKLER	
EK 1- DEĞİŞİK KONSANTRASYONLAR VE SICAKLIKLAR İÇİN ARITMA ÇAMURUNUN ÖLÇÜLEN VE HESAPLANAN REOLOJİK ÖZELLİKLERİ	63
EK 2- ÇAMURUN REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİ ÖLÇEN VİSKOMETRELER	76
E2.1. FANN Viskometresi	76
E2.2. Model 286 Bariod Reometresi.....	77
E2.3. Coutte Viskometresi	77
E2.4. Çiftli Tüp Viskometre.....	78

SEMBOL LİSTESİ

- A: Alan (m^2)
A₁: Katsayı (boyutsuz)
B: Katsayı (boyutsuz)
C : Toplam katı madde konsantrasyonu (g/l)
C₁: Askıdaki katı madde konsantrasyonu (g/l)
d : Boru çapı (m)
d_c: Kömür partiküllerin hidrolik çapı (mm)
f: Fanning sürtünme faktörü
F: Kuvvet (Kg. m/s²)
H: Rotasyon silindiri yarıçapı - Torsiyon silindiri yarıçapı (mm)
He: Hedstrom sayısı (boyutsuz)
K: Üs yasası sabiti ($N.s^n / m^2$)
L: Boru uzunluğu (m)
n: Üs yasası üssü (boyutsuz)
N: Dönme hızı (sayısı), (devir/dakika)
 ΔP : Basınç düşüşü (yük kaybı), (N/m^2)
Q: Akım debisi (m^3/s)
R: Boru yarıçapı (m)
R': Korelasyon katsayısı (boyutsuz)
R_b: Torsiyon silindiri yarıçapı (mm)
R_c: Rotasyon silindiri yarıçapı (mm)
Re: Reynold sayısı (boyutsuz)
Re_k : Kritik Reynold sayısı (boyutsuz)
t : Sıcaklık (°C)
t₁: Zaman (s)
T: Rotasyon silindiri döndüren tork ($kg\ m^2/s^2$)
V: Akışkan ortalama hızı (m/s)
V_s: Duvar sürtünmesi
V/H: Kayma hızı (s^{-1})
V/R: Newton kayma hızı (s^{-1})
(V/R)*: Düzeltilen kayma hızı (s^{-1})
y : Mesafe (m)

α : Viskometrenin yay sabiti (360.5)

β : Torsiyon silindirin çapı rotasyon silindirin çapına oranı (boyutsuz)

γ : Kayma hızı (s^{-1})

η : Newton olmayan akışkan viskozitesi (Ns/m^2)

η : Emülsiyon viskozitesi ($N.s/m^2$)

η_r : η_c/μ (boyutsuz)

η_s : Süspansiyon viskozitesi ($N.s/m^2$)

θ_N : Fann vistometresinin göstergesinden okunan değer (N/m^2)

μ : Newton akışkan viskozitesi (Ns/m^2)

μ_a : Görünür viskozite ($N.s/m^2$)

μ_p : Plastik viskozite ($N.s/m^2$)

ρ : Akışkan yoğunluğu (kg/m^3)

τ : Kayma gerilmesi (N/m^2)

τ_w : Duvar kayma gerilmesi (N/m^2)

τ_y : Bingham akma gerilmesi (N/m^2)

Φ : Dispersiyon fazı konsantrasyonu oranı (boyutsuz)

$\emptyset$: Sert partiküllerin hacimsel oranı (boyutsuz)

ϕ : Kömür partiküllerin oranı (boyutsuz)

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No:

Şekil No:

Sayfa No:

4.20	53.4 g/l çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki	37
2.1.	Kararlı halde iki büyük plaka arasındaki hız dağılımı.....	4
2.2	Newton olmayan akışkanlar için kararlı halde iki parametrelili modeller.....	7
2.3	Kil çamuru için Coutte viskometresiyle yapılan ölçüm sonuçları.....	15
2.4	Coutte viskometresiyle ölçülen çimento çamuru için kayma gerilmesi ile kayma hızı değişim.....	16
2.5	Kil çamurlarına ait tüp viskometresiyle ölçülen duvar kayma gerilmesi ile kayma hızı değişimi.....	16
2.6	Kil ve çimento çamurlarına ait sürtünme faktörü.....	17
2.7	Büyük ölçekli deney düzeni.....	18
3.1.	Bingham plastik akışkanlarında sürtünme faktörü ile Re ve He değişimi.	26
3.2	Sürtünme faktörü Re sayısı ve üs yasası üssüne göre değişimi.....	27
4.1	Fann viskometresinin fotoğrafı.....	30
4.2	12.64 g/l çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki	33
4.3	15.8 g/l çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki	33
4.4	16.26 g/l çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki	33
4.5	19.45 g/l çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki	33
4.6	22.3 g/l çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki	34
4.7	24.65 g/l çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki	34
4.8	26.64 g/l çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki	34
4.9	28.13 g/l çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki	34
4.10	28.88 g/l çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki	35
4.11	30.66 g/l çamur konsantrasyonunda τ - γ arasında ilişki	35
4.12	33.45 g/l çamur konsantrasyonunda τ - γ arasında ilişki	35
4.13	33.81 g/l çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki	35
4.13	49.12 g/l çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki	47
4.14	49.12 g/l çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki	36
4.15	53.31 g/l çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki	36
4.16	53.31 g/l çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki	36
4.17	58.79 g/l çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki	36
4.18	60.36 g/l çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki	37

4.19	62.2 g/l çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki	37
4.20	63.4 g/l çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki	37
4.21	64.26 g/l çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki	37
4.22	66.4 g/l çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki	38
4.23	75.2 g/l çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki	38
4.24	(12.6 - 75.2 g/l) arasındaki çamur konsantrasyonunda için τ - γ arasındaki ilişki	38
4.25	16.26 g/l çamur konsantrasyonunda ve 20°C'de τ - γ arasındaki ilişki	43
4.26	16.26 g/l çamur konsantrasyonunda ve 25°C'de τ - γ arasındaki ilişki	43
4.27	16.26 g/l çamur konsantrasyonunda ve 30°C'de τ - γ arasındaki ilişki	43
4.28	16.26 g/l çamur konsantrasyonunda ve 40°C'de τ - γ arasındaki ilişki	43
4.29	16.26 g/l çamur konsantrasyonunda ve 50°C'de τ - γ arasındaki ilişki	44
4.30	16.26 g/l çamur konsantrasyonunda ve 60°C'de τ - γ arasındaki ilişki	44
4.31	16.26 g/l sabit çamur konsantrasyonunda 20, 25, 30, 40, 50 ve 60°C'de τ - γ arasındaki ilişki	44
4.32	28.13 g/l çamur konsantrasyonunda ve 20°C'de τ - γ arasındaki ilişki	45
4.33	28.13 g/l çamur konsantrasyonunda ve 25°C'de τ - γ arasındaki ilişki	45
4.34	28.13 g/l çamur konsantrasyonunda ve 30°C'de τ - γ arasındaki ilişki	45
4.35	28.13 g/l çamur konsantrasyonunda ve 40°C'de τ - γ arasındaki ilişki	45
4.36	28.13 g/l çamur konsantrasyonunda ve 50°C'de τ - γ arasındaki ilişki	46
4.37	28.13 g/l çamur konsantrasyonunda ve 60°C'de τ - γ arasındaki ilişki	46
4.38	28.13 g/l sabit çamur konsantrasyonunda 20, 25, 30, 40, 50 ve 60°C'de τ - γ arasındaki ilişki	46
4.39	58.79 g/l çamur konsantrasyonunda ve 20°C'de τ - γ arasındaki ilişki	47
4.40	58.79 g/l çamur konsantrasyonunda ve 25°C'de τ - γ arasındaki ilişki	47
4.41	58.79 g/l çamur konsantrasyonunda ve 30°C'de τ - γ arasındaki ilişki	47
4.42	58.79 g/l çamur konsantrasyonunda ve 40°C'de τ - γ arasındaki ilişki	47
4.43	58.79 g/l çamur konsantrasyonunda ve 50°C'de τ - γ arasındaki ilişki	48
4.44	58.79 g/l çamur konsantrasyonunda ve 60°C'de τ - γ arasındaki ilişki	48
4.45	58.79 g/l sabit çamur konsantrasyonunda 20,25, 30, 40, 50 ve 60°C'de τ - γ arasındaki ilişki	48
4.46	75.2 g/l çamur konsantrasyonunda ve 20°C'de τ - γ arasındaki ilişki	49

4.47	75.2 g/l çamur konsantrasyonunda ve 25°C'de τ - γ arasındaki ilişki	49
4.48	75.2 g/l çamur konsantrasyonunda ve 30°C'de τ - γ arasındaki ilişki	49
4.49	75.2 g/l çamur konsantrasyonunda ve 40°C'de τ - γ arasındaki ilişki	49
4.50	75.2 g/l çamur konsantrasyonunda ve 50°C'de τ - γ arasındaki ilişki	50
4.51	75.2 g/l çamur konsantrasyonunda ve 60°C'de τ - γ arasındaki ilişki	50
4.52	75.2 g/l sabit çamur konsantrasyonunda 20,25, 30, 40, 50 ve 60°C'de τ - γ arasındaki ilişki	50
4.53	16.26 g/l toplam katı madde konsantrasyonlu arıtma çamuru için plastik viskozite ile sıcaklık değişimi	52
4.54	28.13 g/l toplam katı madde konsantrasyonlu arıtma çamuru için plastik viskozite ile sıcaklık değişimi	52
4.55	58.79 g/l toplam katı madde konsantrasyonlu arıtma çamuru için plastik viskozite ile sıcaklık değişimi	53
4.56	75.2 g/l toplam katı madde konsantrasyonlu arıtma çamuru için plastik viskozite ile sıcaklık değişimi	53
4.57	Plastik viskozite ile toplam katı madde konsantrasyonu arasındaki ilişkiyi gösteren grafik	54
4.58	Plastik viskozite ile toplam katı madde konsantrasyonu arasındaki ilişkiyi gösteren grafik	54
4.59	58.79 g/l toplam katı madde konsantrasyonu için akma gerilmesi ile sıcaklık değişimi	55
4.60	75.2 g/l toplam katı madde konsantrasyonu için akma gerilmesi ile sıcaklık değişimi	55
4.61	Arıtma çamurunun akma gerilmesi ile askıdaki katı madde konsantrasyonu ilişkiyi gösteren grafik	56
4.62	Arıtma çamurunun akma gerilmesi ile toplam katı madde konsantrasyonu arasındaki ilişkiyi gösteren grafik	56
4.63	Değişik toplam katı madde konsantrasyonları için arıtma çamurunun akma gerilmesi ile sıcaklık değişimi	57
4.64	Değişik toplam katı madde konsantrasyonları için arıtma çamurunun plastik viskozite ile sıcaklık değişimi	57

TABLO LİSTESİ

Şekil No:

Sayfa No:

2.1	Boruda laminar akımında ölçülen reolojik özellikleri.....	17
4.1	Çamur numunelerinde belirlenen toplam katı madde ve askıdaki katı madde konsantrasyon değerleri (20°C).....	29
4.2	Değişik konsantrasyonlar (12.64 - 75.2 g/l) için arıtma çamurunun kayma gerilmesi- kayma hızı reolojik modelleri (20°C).....	39
4.3	20°C - 60°C arasında kayna gerilmesi-kayma hızı reolojik modelleri sabit konsantrasyonlar için.....	51
5.1	Değişik konsantrasyonlar için çamurun plastik viskozite ile sıcaklık geliştirilen bağıntılar.....	59
5.2	Değişik konsantrasyonlar için çamurun akma gerilmesi ile sıcaklık geliştirilen bağıntılar.....	59
E.1	12.64 g/l konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri.....	63
E.2	15.8 g/l konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20°C).....	63
E.3	16.26 g/l konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20°C).....	64
E.4	19.45 g/l konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20 °C).....	64
E.5	22.3 g/l konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri.....	65
E.6	24.65 g/l konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20°C).....	65
E.7	26.64 g/l konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20°C).....	66
E.8	28.13 g/l konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20°C).....	66
E.9	28.88 g/l konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri.....	67
E.10	30.66 g/l konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20°C).....	67

E.11	33.45 g/l konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20°C).....	68
E.12	33.81 g/l konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20°C).....	68
E.13	49.12 g/l konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri(20°C).....	69
E.14	53.31 g/l konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20°C).....	69
E.15	55.63 g/l konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20°C).....	70
E.16	58.79 g/l konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20°C).....	70
E.17	60.36 g/l konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20°C).....	71
E.18	62.2 g/l konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20°C).....	71
E.19	63.4 g/l konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20°C).....	72
E.20	64.26 g/l konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20°C).....	72
E.21	66.49 g/l konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20°C).....	73
E.22	75.2 g/l konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20°C).....	73
E.23	Kayma gerilmesi-kayma hızı değerleri değişik sıcaklıklarda ve 16.26 g/l konsantrasyonlu çamur için	74
E.24	Kayma gerilmesi-kayma hızı değerleri değişik sıcaklıklarda ve 28.13 g/l konsantrasyonlu çamur için	74
E.25	Kayma gerilmesi-kayma hızı değerleri değişik sıcaklıklarda ve 58.79 g/l konsantrasyonlu çamur için	75
E.26	Kayma gerilmesi-kayma hızı değerleri değişik sıcaklıklarda ve 75.2 g/l konsantrasyonlu çamur için	75

TEŞEKKÜR

Araştırma konusunu öneren ve çalışmalarım sırasında beni sürekli destekleyen ve yönlendiren tez danışmanım Prof. Dr. Necdet ARAL'a, Çevre mühendisliği bölümünde gerekli araştırma ortamını ve olanaklarını sağlayan Bölüm başkanımız Prof. Dr. Ferruh ERTÜRK'e, İ.T.Ü. Petrol mühendisliği sondaj tekniği laboratuvarında deneysel çalışmalarımın bir kısmını yapabilmem için imkan sağlayan Prof. Dr. Argun GÜRKAN'a ve Prof. Dr. Aytin GÖRTEKİN'e, sürekli beni destekleyen Doç. Dr. Talha GÖNÜLLÜ'ye ve Doç. Dr. Yalçın YÜKSEL'e ve manevi desteğini esirgemeyen aileme en içten teşekkürlerimi sunarım

Hasan ALİ

İstanbul

Mayıs 1995



ÖZET

Bu çalışmada içme suyu arıtma tesislerinde oluşan çamurun Fann viskometresi (35SA) kullanılarak reolojik özellikleri belirlenmiş ve bir model geliştirilmiştir. Ayrıca arıtma çamuru reolojik özelliklerine dayanarak çamurun hidrolik taşınmasında meydana gelen yük kaybı (basınç düşüşü) hesabında bir yöntem geliştirilmiştir.

Birinci bölümde, arıtma çamurunun reolojisinin önemini ve çalışma konusunu belirlenmiş, ayrıca bu çalışmada incelenecek problem açıklanarak amaç ve kapsam belirlenmiştir.

İkinci bölümde, Newton ve Newton olmayan akışkanlar açıklanmış ve Newton olmayan akışkanların iki parametreliliği izah edilmiştir. Daha sonra süspansiyon ve kolloidal maddelerin reolojisi, emülsiyonların reolojisi, kömür çamurunun reolojisi, polimerlerin reolojisi, viskolastik maddelerin reolojisi ve çimento çamurunun reolojisi üzerine yapılan çalışmalar ile ilgili bilgi verilmiştir.

Üçüncü bölümde, arıtma çamuruna ait reolojik modelin oluşturulması ve borulardaki yük kaybı hesabı için matematik bir bağıntı geliştirilmiştir.

Dördüncü bölümde, deneysel çalışmalar verilmiştir. Deneysel çalışmalarda hazırlanan bir seri numunede arıtma çamurunun toplam katı madde konsantrasyonları belirlenmiştir. Ayrıca çamur numunelerinde rotasyon Fann viskometresi (35SA) ile sabit sıcaklıkta ve değişik toplam katı madde konsantrasyonları ile sabit konsantrasyon ve değişik sıcaklıklarda arıtma çamurunun reolojik özellikleri ölçülüp hesaplanmıştır. Deneysel ölçümlerden ve değerlendirmelerden Kağıthane içme suyu arıtma tesislerinde oluşan çamurun tipi Bingham plastik modeline uyduğu gözlenmiştir. Regresyon analizi sonucu korelasyon katsayısı $R^2 = 0.99$ 'lara ulaşmıştır. Arıtma çamuru için geliştirilen modele dayandırılarak çamurun borularda taşınması sırasında meydana gelen yük kaybı hesabında kullanılabilecek bağıntılar geliştirilmiştir.

Beşinci bölümde ise bu çalışmada elde edilen sonuçlar özet halinde verilmiştir.

SUMMARY

In this study a new model was developed by using the Fann viscometer (35SA) and determining the rheological characteristics of the sludge formed in water treatment plants. Also a method was developed to calculate the head loss during the transportation of the sludge according to its rheological behavior.

In the first section, importance and the principles of sludge rheology was investigated and the problem was analyzed according to the scope and aim of this work.

In the second section, Newtonian and non-Newtonian fluids with two parameters were explained. Also information was given for the rheology of suspension and colloidal material, rheology of emulsion and coal sludges, rheology of polymers, rheology of viscoelastic materials and finally the rheology of cement sludge.

In the third section, a mathematical formula was developed for the rheological model of the sludge and head loss in pipelines.

In the fourth section, the experimental study was explained. the settleable solids concentration and total solids concentration of the sludge was prepared in a series of experimental work Also the rheological features of various total settleable solid concentrations were determined

Rheological characteristic of the sludge was determined using the Fann viscometer (35 SA) for variable total settleable solids concentration at constant temperature and at variable temperature and constant solids concentration. After experimental measurements and analysis of Kağıthane Water treatment plant sludge it was found that the sludge characteristics fitted the Bingham plastic model regression analysis gave a correlation coefficient value of $R^2 = 0.99$. Based on the model new formulae were developed to estimate the head loss in the transportation of the sludge in pipelines.

In the fifth section, a summary of the results were given.

BÖLÜM 1

1. GİRİŞ

Reoloji bilim ile ilgili çalışmalar birinci dünya savaşları sırasında başlanmıştır. Reolojik araştırmalar genel olarak, fizikokimya mühendislik ve matematik araştırmaları olmak üzere üç kısımda incelenmiştir. Matematiksel reolojik araştırmalar doğrusal olamayan sürekli ortam mekaniği alanında gelişmiştir.

Evsel ve içme suyu arıtılmasında oluşan çamurların reolojisi çamurun bir yerden bir yere hidrolik taşınması açısından önem arz etmektedir. Arıtma tesislerinde oluşan çamurların katı madde muhtevaları %1-6 arasında değişmektedir. Bu çamurların boru ile hidrolik nakli sırasında yüksek seviyede oluşan yük kaybının hesabında çok çalışmalar yapılmış ve kolayca belirlenebilecek bir yöntem geliştirilmiştir. Buna karşılık Newton olmayan yüksek katı madde muhtevalı ve yüksek viskoziteye sahip çamurların hidrolik taşınmasında yük kaybının belirlenebilmesi önemli bir husustur. Bu çalışmada içme suyu arıtma tesislerinde oluşan alum çamurlarının reolojik özellikleri belirlendikten sonra hidrolik taşınması sırasındaki meydana gelen yük kaybının bir başka ifade ile basınç azalmalarının hangi parametrelerin etkisinde olduğu araştırılmış ve yük kaybı hesabı ile ilgili bir bağıntı geliştirilmiştir.

1.1. Arıtma Çamurunun Reolojisinin Önemi ve Çalışma

Konusunun Belirlenmesi

Reoloji, bir maddenin deformasyonu ve akımının bilimidir. Bir cisim, şeklini ve büyüklüğünü bir kuvvet uygulanmasıyla değiştirdiği zaman, cisim deforma olur. Cisme ait deformasyon derecesi zamanla sürekli değişirse akım meydana gelmektedir.

Reolojinin amacı, cisimde gerekli deformasyon veya akımı tayin etmek veya bunun tersi olarak bir kuvvet uygulandığı zaman cisim deformasyonu veya akımın ne kadar değiştiğini tahmin etmektir. Eğer alınan cisim anizotropik ve homojen olmayan bir akışkan ise uygulanan kuvvet küçük

olsa bile akıma yol açar. Öte yandan, incelenen akışkan içerisinde belli bir katı madde ihtiva ediyorsa, akışkanın viskozitesi kayma hızı artmasıyla sabit kalmaz. Yani akışkan Newton değildir dolayısıyla bu akışkan psüdoplastik, dilatant veya Bingham plastik diye isimlendirilmektedir.

Reolojinin teorik öneminin yanında pratikte de büyük önemi vardır. Endüstride çeşitli makina ve alet tasarımı ile Newton olmayan akışkanların hidrolik taşınmasında taşınan maddelerin reolojisi bulunmalıdır. Çevre mühendisliğinde içme suyu ve atıksu arıtma tesislerinde oluşan ve katı maddece zengin olan çamurlar Newton olmayan akışkandır. Ayrıca pratikte sondaj çamuru, kağıt hamuru, süspansiyonlar, tekstil lifleri ve besin endüstrisinde Newton olmayan akışkanlarla karşılaşılır. Bunların hidrolik taşınması sırasında Newton akışkanlarıdakinden farklı ve yüksek seviyede yük kaybı oluşur.

Newton akışkanlarda kayma gerilmesi kayma hızının bir fonksiyonudur ve akışkanın viskozitesi sabittir. Newton olmayan akışkan halinde ise akışkanın viskozitesi sabit değildir ve akışkan, Bingham plastik modeline uyumlu ise plastik viskozite ve akma gerilmesi kavramları ile tanımlanmaktadır. Akışkan, üs yasasına uyumlu ise üs yasasının parametreleri belirlemesi gerekmektedir. Akışkan tipi belirlenince Fanning sürtünme faktörü ve borularda yük kaybı hesabına esas olacak akışkanın boru içinde akması sırasında basınç düşüşünü belirlenebilmektedir.

1.2. Bu Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Bu çalışmada arıtma çamurunun reolojisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle Kağıthane içme suyu arıtma tesislerinden çamur numuneleri alınmıştır. Borularda çamur akışı sırasında basınç düşüşü ya da yük kaybı hesabında reolojik uygulama yöntemi araştırılacaktır. Bu nedenle arıtma çamuru ile ilgili akışkan tipinin belirlenmesi gerekmektedir. Arıtma çamuru Newton olmayan bir akışkandır. Bu nedenle çamur için Newton olmayan akışkan tipi belirlenmeye çalışılmıştır. Çamurun reolojik modelinin belirlenebilmesinde Fann viskometresi kullanılmış ve çamura ait kayma gerilmesi, kayma hızı, görünür viskozite, plastik viskozite ve akma gerilmesi ölçümü ve hesaplamalarının yapılmasına ihtiyaç vardır.

Çamurun reolojik özelliklerinin belirlenmesinde aşağıdaki çalışmalar yapılmıştır.

1. Çamurun değişik katı madde konsantrasyonları için 20 °c deki sabit sıcaklıkta reolojik özellikler ölçülmüştür.

2. Çamurun sabit konsantrasyonlarında ve 20,25,30,40,50 ve 60 °c gibi değişik sıcaklıklarda yine çamura ait reolojik özellikler ölçülmüştür.

Bu çalışmada kullanılan arıtma çamuru esas olarak Bingham plastik veya üs yasası modeline uyumlu olabileceği tahmin edilmiştir. Kayma gerilmesi, kayma hızı grafiklerin çizilmesiyle çamurun akışkan tipi belirlenmiştir. Borularda taşınan çamurun basınç düşüşü yani yük kaybı için Fanning sürtünme faktörünü hesaplaması gerekmektedir. Fanning sürtünme faktörünün tayini için çamur Bingham plastik ise boyutsuz sayılar Reynold sayısı ve Hedstrom sayısı belirlenerek Fanning sürtünme faktörü okunarak çamurun hidrolik taşınmasında oluşan basınç düşüşü hesaplanabilmektedir.



Şekil 2.1. Kararlı bir P kuvveti gerekir. Akış laminar olduğu sürece



BÖLÜM 2

2. REOLOJİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

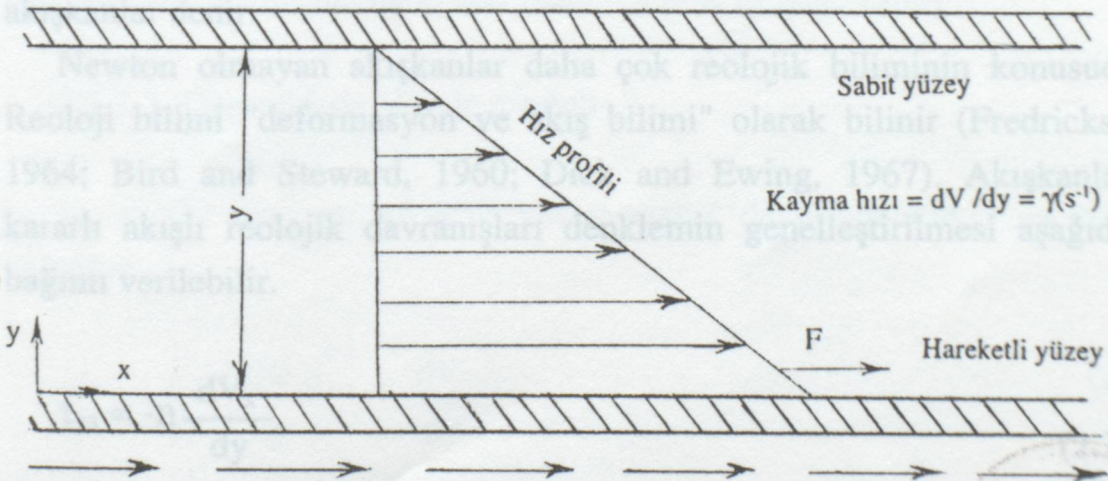
2.1. Giriş

2.1.1. Newton Akışkanlar

Küçük bir mesafe ile birbirinden ayrılmış paralel yüzeylerden her birinin yüzey alanının A olduğunu varsayarak ve bu iki büyük paralel yüzey arasında her hangi bir akışkan yerleştirilsin. Sistemin başlangıçta hareketsiz olduğunu ve $t_1=0$ zamanında alttaki düzlemin x-yönünde V sabit hızıyla harekete geçirildiğini varsayalım. Zaman geçtikçe akışkan momentum kazanır ve sonuçta şekil 2.1. deki kararlı hız profili oluşur. Bu kararlı hale erişildikten sonra alttaki düzlemin hareketini sürekli olarak sağlayabilmek için sabit bir F kuvveti gerekir. Akış laminar olduğu sürece F kuvveti:

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{V}{y} \quad (2.1)$$

yazılır.



Şekil 2.1. Kararlı halde iki büyük plaka arasındaki hız dağılımı

Kuvvetin plaka yüzeyin alanına oranı y mesafesindeki hız düşüşü ile orantılıdır. Orantı sabiti μ dır. Bu da akışkanın viskozitesidir. y bölgesindeki akışkan tarafından sabit y koordinatında bulunan akışkan yüzeyine, x -yönünde uygulanan kayma gerilmesi τ_{yx} ile, akışkan hız faktörünün x -bileşeni ise V_x ile gösterilerek (2.1) denklemi şöyle yazılabilir.

$$\frac{F}{A} = -\mu \frac{0-V}{y-0} = -\mu \frac{dV_x}{dy} \quad (2.2)$$

Bu denklem birim alandaki kayma kuvvetinin hız gradyeninin negatif değeriyle orantılı olduğunu göstermektedir. Bu ifade Newton'un viskozite yasasıdır ve yasaya göre davranan akışkanlara Newton akışkanlar denir. (Bird Steward 1960; Rogers, 1963; Benette and Mayer, 1974).

2.1.2. Newton Olmayan Akışkanlar

Newton'un viskozitesi yasasına göre τ_{yx} düşey eksen ve dV_x/dy yatay eksende işaretlenerek bir grafik üzerinde gösterildiğinde ilişki merkezden geçen doğrusal bir çizgi olarak elde edilir. Gerçekten de bütün gazlar ve polimer olmayan homojen sıvılar için bu yasa geçerlidir. Ancak bazı akışkanlar bu yasaya uymazlar ve bu tür akışkanlara Newton olmayan akışkanlar denir.

Newton olmayan akışkanlar daha çok reolojik biliminin konusudur. Reoloji bilimi "deformasyon ve akış bilimi" olarak bilinir (Fredrickson, 1964; Bird and Steward, 1960; Dick and Ewing, 1967). Akışkanların kararlı akışlı reolojik davranışları denklemin genelleştirilmesi aşağıdaki bağıntı verilebilir.

$$\tau_{yx} = -\eta \frac{dV_x}{dy} \quad (2.3)$$

Burada η , dV_x/dy veya τ_{yx} 'in bir fonksiyonu olarak ifade edilir. η 'nin artan kayma hızı ile $(-dV_x/dy)$ azalması türündeki davranışa südoplastik davranış denir. η 'nin artan kayma hızı ile artması türündeki davranışa ise

dilatant davranış denir. Eğer η kayma hızından bağımsızsa, newton davranış türü elde edilir ve $\eta = \mu$ 'e eşit olur.

τ_{yx} ile dV_x / dy arasındaki kararlı hal bağıntısını veren değişik ampirik denklemler veya modeller mevcuttur (Bird and Steward, 1960).

2.1.2.1. Bingham Akışkan Modeli

Bingham modeli iki sabit plastik viskozite ve akma gerilmesinden oluşmaktadır.

$$\tau_{yx} = -\mu_p \frac{dV_x}{dy} \text{ ve } \tau_{yx}; |\tau_{yx}| > \tau_y \text{ için} \quad (2.4)$$

$$\frac{dV_x}{dy} = 0; |\tau_{yx}| > \tau_y \text{ için} \quad (2.5)$$

elde edilir.

(2.4) denkleminde τ_{yx} pozitif olduğu zaman (+) işareti, negatif olduğu zaman (-) işareti kullanılır. Bu iki parametrelili modele uygun modellere Bingham plastik denir. Bu tür akışkan maddeler, eğer kayma gerilmesi akma gerilmesinden (τ_y) değerce küçükse katı halde bulunan kayma gerilmesi τ_y 'den değerce büyükse Newton akışkanlar gibi davranır (Bird and Steward, 1960; Bennette and Mayer, 1974; Reiner, 1960)

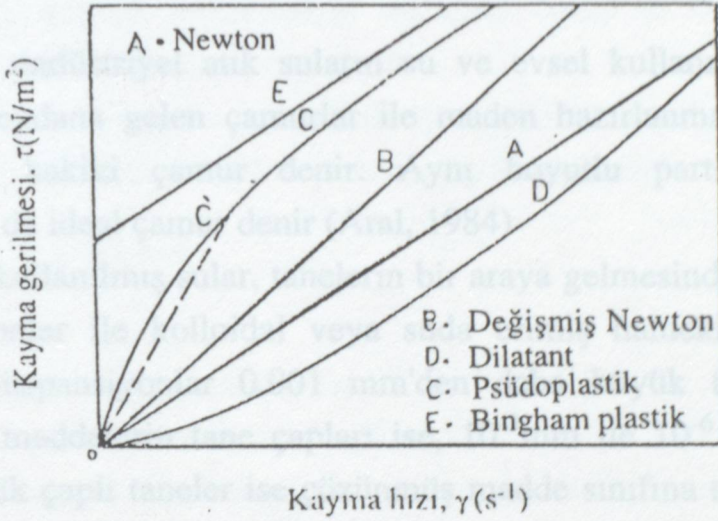
2.1.2.2. Ostwald-de Waele modeli

Bu model aynı zamanda üs yasası olarak da bilinmektedir üs yasası bağıntısı

$$\tau_{yx} = -\eta \left| \frac{dV_x}{dy} \right|^{n-1} \frac{dV_x}{dy} \quad (2.6)$$

şeklinde yazılabilir

Bu iki parametrelili modelde eğer $n=1$ ise, $\mu = \eta$ olur ve Newton'un viskozite yasası elde edilir. n 'nin birden farklılaşması Newton davranıştan farklılaşma derecesi gösterir. n değerlerinin birden küçük olduğu durumda psüdoplastik davranış ve birden büyük olduğu durumda ise dilatant davranış elde edilir. Şekil 2.2'de Newton olmayan akışkanlar için kararlı halde iki parametrelili modeller görülmektedir. (Bird and Steward, 1960).



Şekil 2.2. Newton olmayan akışkanlar için kararlı halde iki parametrelili modeller (Dick and Ewing, 1967).

(2.6) denklemi, yani $n \neq 1$ olması durumunda Newton olmayan davranıştan sapma oranı olarak değerlendirilebilir ve

$n < 1$ için südoplastikler olup yüksek polimerler, kağıt ve selüloz bu grupta

$n > 1$ için dilatantlar olarak isimlendirilen şeker çözeltisi, potansiyum silikat ise bu gruptandır. (Bird and Steward, 1960; Bennette and Mayer, 1974).

2.1.2.3. Eyring Modeli

Eyring modeli, kinetik teorisine dayandırılmış olup akışkana ait kayma gerilmesi aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir.

$$\tau_{yx} = A \operatorname{arcsinh} \left(-1/B \frac{dV_x}{dy} \right) \quad (2.7)$$

Bu bağıntıda $-dV_x/dy$ nin yüksek değerlerinde südoplastik davranışa yakın bir özellik gözlenirken τ_{yx} sifıra yaklaşması durumunda Newton'un viskozite yasasına yaklaşır. Bu durumda orijinde $\mu=A_1/B$ dir.

Ayrıca Newton olmayan akışkanlar için Ellis, Reiner - Phillppoff modelleri mevcuttur (Bird and Steward, 1960).

2.2. Süspansiyon ve Kolloidal Maddelerin Reolojisi

Çeşitli endüstriyel atık suların su ve evsel kullanılmış su arıtılması sonucu meydana gelen çamurlar ile maden hazırlanma sırasında oluşan çamurlara hakiki çamur denir. Aynı boyutlu partiküllerden oluşan çamurlara da ideal çamur denir (Aral, 1984)

Su ve kullanılmış sular, tanelerin bir araya gelmesinden meydana gelen süspansiyonlar ile kolloidal veya suda erimiş haldeki maddeler ihtiva ederler. Süspansiyonlar 0.001 mm'den daha büyük tanelerden oluşur. Kolloidal maddelerin tane çapları ise, 10^{-3} mm ile 10^{-6} arasında bulunur. Daha küçük çaplı taneler ise çözünmüş madde sınıfına sokulurlar. Çapları 0.01 mm'den daha büyük olan süspansiyon maddeler çökelirler. Kolloidal ve erimiş maddeler ise ancak koagülasyon işlemi ile sudan ayrılabilir (Muslu, 1985).

Bir akışkan ortam içerisinde ortalama hacim konsantrasyonu %2'nin üzerinde partikül bulunuyorsa artık bu partiküllerin birbirine olan etkileri ihmal edilemez. Yani gerek ortamın viskozitesinde, gerek hız profillerinde ve gerekse enerji kayıplarında içerisinde konan maddenin cinsine ve konsantrasyonuna bağlı olarak bir takım değişiklikler meydana gelecektir. Kısaca ortamın reolojik davranışı tümünden değişmiş olacaktır. (Soğuk Oğlu, 1982).

Süspansiyonların Newton olmayan davranışını açıklayan pek çok teori bulunmaktadır. Bu teorilerin hepsi kayma gerilmesi-kayma hızı akışı eğrisinin doğrusal olmayan bölgesini ele almaktadır.

2.3. Sert Partiküllü Kolloidal Maddelerin Reolojisi

Kolloidal dağılımların reolojik özellikleri akışkanlar mekaniğinin

etkileşimi ile belirlenir. Durgun haldeki bir dağılımda partikül yayılımı, Brownian hareketi ve partiküller arasındaki potansiyel etkileşimlerle belirlenir (Van Der Werff and De Kruif, 1989). Batchelor ve Green (1972), çok düşük kayma hızı sınırında sert partiküllerin yarı-sulandırılmış bir süspansiyonun gerçek bir tanımını vermişlerdir. Beenakker (1984), kürelerin gelişigüzel bir sayısı arasındaki hidrodinamik etkileşim için belirli bir solusyonu kullanarak etkili viskoziteyi ölçmüştür. Beenakker, viskoziteyi, değişik partiküllerin hacimsel oranı ve Brownian hareketin etkisi olmadığı durumlarda ölçmüştür.

Sulandırılmış ve yarı sulandırılmış süspansiyonlar halinde, dispersiyon viskozitesi (Einstein, 1956) tarafından şöyle verilmiştir.

$$\eta/\eta_s = 1 + (5/2) \phi \quad (2.8)$$

Burada;

η = Dispersiyon viskozitesi (N.s/m²)

η_s = Süspansiyon viskozitesi (N.s/m²)

ϕ = Sert partiküllerin hacimsel oranı.

Batchelor ve Green (1977), partiküllerin arasında hidrodinamik etkileşimi ve Brownian viskozitesi, aşağıdaki bağıntı ile belirlemişlerdir.

$$\eta = 1 + 2.5 \phi + 6.2 \phi^2 \quad (2.9)$$

2.4. Emülsiyonların Reolojisi

Bir emülsiyon birbirleriyle karışmayan iki sıvı içerir. Birincisi diğerinin içinde damlalar halindedir. Bu damlacık yüzeyinin etrafında adsorbe edilir. Emülsiyonlar su içinde yağ (yağ/su) veya yağ içinde su (su/yağ) şeklinde bilinir. Petrol, kozmetik, tarım, besin, polimer, tekstil, kağıt ve boya endüstrilerinde emülsiyon özellikte akışkanlarla karşılaşılır.

Çok geniş konsantrasyon ve kayma hızına sahip olan emülsiyonlar için bir viskozite bağlantısının geliştirilmesi veya Newton olmayan emülsiyonlar için bir viskozite bağıntısının geliştirilmesi veya Newton olmayan emülsiyon viskozitesi için teorik bir model geliştirilmesi için emülsiyon reolojisinin ve emülsiyonlarda viskozite/konsantrasyon ilişkisinin bilinmesi gerekmektedir (Pal and Rhodes, 1989).

Çok seyreltik emülsiyonlarda η_r [emülsiyonun viskozitesinin (η_c), sürekli fazın (μ) oranı] dispersiyon fazı konsantrasyonu Φ arttıkça doğrusal olmayan bir şekilde artar. Orta dereceli konsantrasyonlar η_r , Φ ile doğrusal olmayan bir şekilde artar. Ancak emülsiyonlar Newton emülsiyonu olarak kalır. Yüksek konsantrasyonlarda emülsiyonlar Newton değildir. Newton olmayan özelliği başlağngıçta psüdoplastik olur. Çok konsantre emülsiyonlar için ($\Phi > 0.74$) plastik hale gelir ve emülsiyonlar akma gerilmesi gösterirler.

Emülsiyon sistemleri için sadece çok az viskozite/konsantrasyon denklemi geliştirilmiştir. Birçok denklem katı partiküllerin süspansiyonu üzerindeki çalışmaların bir benzeri olarak alınmıştır.

Sonsuz seyreltik bir emülsiyonda viskozite Einstein denklemi ile verilebilir (Pal and Rhodes, 1989).

$$\eta_r = 1 + a \Phi \quad (2.10)$$

Burada, a bir sabit olup her emülsiyon için farklı değer alır.

Sherman (1983), Newton emülsiyonlarına bağlı olan konsantrasyona karşı viskozite bağıntısını;

$$\eta_r = 1 + a \Phi + b \Phi^{-2} + c \Phi^{-3} + \dots \quad (2.11)$$

şeklinde vermiştir

a, b ve c emülsiyon sistemine göre değişen sabitlerdir.

Mooney (Sherman, 1983) emülsiyonların Newton viskozitesini

$$\eta_r = \exp [2.5 \Phi (1 - \alpha \Phi)] \quad (2.12)$$

şeklinde vermiştir.

Burada α parametresi ampirik olarak belirtilmiş ve $1.35 < \alpha < 1.91$ değerleri arasında bulunmaktadır.

Eiler (1943), katran emülsiyonları viskozitesi,

$$\eta_r = \left[1 + \frac{1.25 \Phi}{1 - a_1 \Phi} \right]^2 \quad (2.13)$$

bağıntısıyla vermiştir.

Burada (a_1), $1.28 < a_1 < 1.30$ değerleri arasında olup ampirik olarak belirlenmiştir.

Roscoe (1952), çok saçılma Newton sistemi için aşağıdaki denklemi geliştirmiştir.

$$\eta_r = [1 - \Phi]^{-2.5} \quad (2.14)$$

Roscoe, yine uniform olmayan partiküllü sistemlerde aşağıdaki denklemi modifiye etmiştir.

$$\eta_r = [1 - 1.35 \Phi]^{-2.5} \quad (2.15)$$

Genel olarak emülsiyonların verileri Vander Waarden emülsiyonlarının viskozitesi Eiler'in emülsiyonlarına göre yüksektir. Bu emülsiyonlar, yüksek konsantrasyonda Newton olmayan psüdoplastik akışkan olduğunu gösterir ve üs yasasına

$$\tau = K (\dot{\gamma})^n \quad (2.16)$$

izlemektedir.

Burada;

K: üs yasası sabiti,

n: üs yasası üssü,

$\dot{\gamma}$: kayma hızı (s^{-1})

2.5. Kömür Çamurunun Reolojisi

2.5.1. pH'nın Kömür Çamurunun Reolojik Özelliklerine Etkisi

pH'nın kömür çamuru reolojik özellikleri üzerindeki etkisi Coutte viskometresi ile ölçülerek belirlenebilir. Bingham plastik modeline dayandırılarak analiz edilmektedir. Plastik viskozite ve Bingham akma gerilmesi, birbirinden bağımsız olarak Voskobenko (and et al,1989), tarafından araştırılmıştır. pH'nin değeri nötrden 2'ye düştükçe, plastik viskozitenin 0.48 ve 0.60 hacim konsantrasyonlarında 0.5 ve 0.08 değerlere sırasıyla düştüğü gözlenmiştir. Bingham akma gerilmesi <1 Pa'nın nötral bölgesinde minimum olduğu bulunmuştur.

Kömür çamuru reolojik özelliklerinin Bingham plastik modeliyle iyi bir şekilde temsil edildiği gösterilmiştir. Plastik viskozitenin ve Bingham akma gerilmesinin, kömürün hacimsel konsantrasyonu ve kömür partiküllerin hidrolik çapı sırayla birbirinden bağımsız olarak bağlantılı olduğu belirlenmiştir (Keller, 1991).

Kömür çamuru için, plastik viskozitenin ve Bingham akma gerilmesinin, ayrıca çamur pH'sinin bir fonksiyonu olduğu gösterilmiştir. pH sadece kömür çamurunun hafif asidik olmasının değil ayrıca konsantrasyonun bir fonksiyonudur.

2.5.1.1. Kömür Çamurunun Plastik Viskozitesi

Kömür süspansiyonlarının plastik viskozitesi aşağıdaki bağıntı ile verilebilir.

$$\ln \mu_p = m\phi + c \quad (2.17)$$

Burada;

ϕ : Kömür partiküllerin oranı (boyutsuz)

Bu eşitlikteki m ve c sabitlerinin nümerik denklem (2.18)'de verilmiştir.

$$\ln \mu_p = (3.011 \text{ pH} - 5.27)\phi - 1.299 \text{ pH} - 2.109 \quad (2.18)$$

Bu eşitliğin önemi pH konsantrasyonların artmasıyla plastik viskozitenin daha yüksek konsantrasyonlarda azalmaya eğilimli olmasından ileri gelmektedir. Bu etki $\ln \mu_p$ ile ϕ nin arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır (Woskoboenko and et al, 1989).

2.5.1.2. Kömür Çamurunun Bingham Akma Gerilmesi

Kömür süspansiyonu nötral pH değerinde minimum bir akma gerilmesine sahip olduğu gösterilmiştir.

Bingham akma gerilmesi ile kömür partikülleri hidrolik çapı arasındaki ilişkinin deneysel olarak üs yasasına bağımlı olduğu, 2.19 bağıntısından da

anlaşılacağı üzere, belirlenmiştir (Woskoboenko and et al, 1989).

$$\tau_y = K d_c^n \quad (2.19)$$

2.6. Polimerlerin Reolojisi

Polimer eriyikleri 1 s^{-1} 'nin altındaki kayma hızlarında Newton akışkanları gibi, ve daha yüksek kayma hızlarında ise Newton olmayan akışkanları gibi davranırlar. Yüksek kayma hızına maruz yüksek polimer moleküller arası etkileşime sahip polimerlerin moleküler ağırlıkları azalmaktadır. Öte yandan yüksek kayma hızı altında zayıf molaküler etkileşimi moleküler ağırlığında çok az bir değişim göstermiştir. Moleküler değişimi dolayısıyla viskozite değişikliğe uğramıştır. Reometre ile gözlendiğinde, viskozitenin, moleküler ağırlığa olan bağlılığının, kayma hızının artması ile azaldığı bulunmuştur. Viskozite yüksek kayma hızlarında moleküler ağırlığa olan bağlılığı zayıf olarak bulunmuştur (Takahashi and et al, 1985).

Genel olarak polimerlerin viskozitesi, kayma hızı ve sıcaklık azalınca artmaktadır. Yine polimerlerin, molekül ağırlığı arttıkça viskozite artmaktadır. Bu sıra, polimerlerin molekülleri, düşük kayma hızı ve sıcaklık artmasıyla, kristalizasyon olayına uğrarsa viskozitesi artmaktadır (Fujiyama, 1990).

2.7. Viskolastik Maddelerin Reolojisi

Viskolastik maddeler, elastik katılar ve viskoz sıvılar arasında bir davranış göstermektedirler. Bu viskolastik maddelere kayma kuvveti uygulandığı zaman, elastik deformasyona uğramaktadırlar. Fakat deformasyon sabit tutulursa zamanla viskolastik maddeler viskoz akış olarak davranış gösterirler (Dick and Ewing, 1967).

Newton olmayan akışkanlardaki katı madde çökeltme hızı tek küreli sürüklenim ve sıkışmış yatak davranışı limitlerine dayalı olarak açıklanmıştır. bu konuda birkaç teorik analiz dışında çok az miktarda deneysel çalışmaya rastlanmaktadır. Viskolastik maddelerin reolojik davranışı üs yasasına dayalı psüdoplastik davranışa uyumlu bulunmuştur (Allen, 1989).

2.8. Çimento Çamurunun Reolojisi

Çimento çamurlarına ait reolojik özelliklerin duvar sürtünmesi etkisinden dolayı laboratuvar viskometresiyle ölçülmesi oldukça zordur (Bannister, 1980; Mannheimer, 1983). Duvar sürtünmesi 1 m'den daha az bir sıvı filmi olup viskometre duvarının yağlanmasını sağlamaktadır. Duvar sürtünmesinin etkisi, çimento çamurunun kayma gerilmesi akma gerilmesinden daha az gerçekleştiren mekanizmayı sağlamaktadır. Duvar sürtünmesinin etkisi, küçük kayma aralıklarında konsantrik viskometre ile elde edilen ölçüm sonuçlarının daha düşük değerler almasıyla anlaşılmaktadır (Mannheimer, 1991).

2.8.1. Coutte ve Tüp Viskometreleriyle Yapılan Reolojik Ölçümler

2.8.1.1. Duvar Sürtünme Analizi

Mooney (1931) duvar sürtünmesi için Coutte viskometresi ölçüm sonuçlarından yararlanarak bir bağıntı geliştirmiştir. Bu yöntemde Tork'un dönme sayısının (N) fonksiyonu olarak üç değişik torsiyon/rotasyon yarı çap oranı ($\beta = R_b/R_c$) ölçmeyi gerektirmektedir. Mooney aynı zamanda üç farklı konsantrik silindir, akım debisi (Q) ve basınç değişimini ($\Delta p/L$) ölçümünün gerektiren tüp viskometre verilerini inceleyen bir yöntem geliştirmiştir. Sürtünmeyi ortaya çıkarmak için kullanılan en iyi yöntem pürüzlü ve pürüzsüz silindirlerle elde edilen ölçümlerin mukayasesidir (Cheng, 1984).

Coutte viskometrelerinde yapılan duvar sürtünme analizi sadece iki kayma aralığı (Rotasyon ve torsiyon silindirleri arasındaki aralık) ($H=R_c-R_b$) kullanılarak duvar kayma gerilmesi (τ_w) ve Newton kayma hızı V/R parametreleri arasındaki ilişki belirlenmiştir. Bu ilişki oldukça zayıftır. Aynı zamanda bu parametrelerle (τ_w ve V/R) tüp viskometresinde duvar sürtünme tayini için kullanılmaktadır (Mannheimer, 1991).

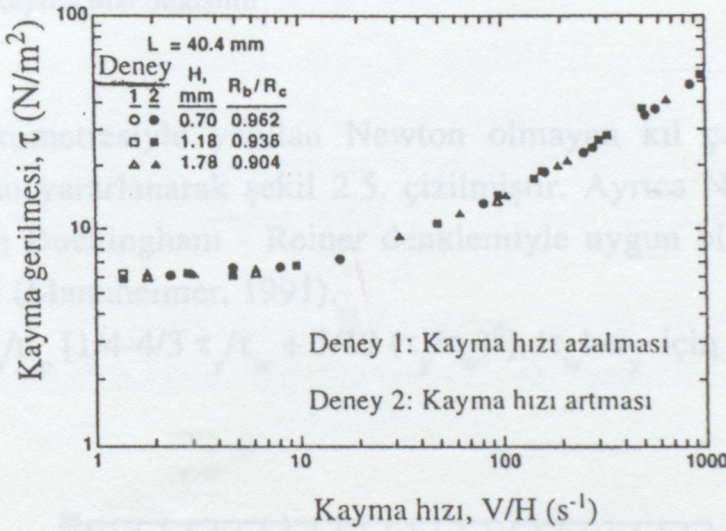
Sabit kayma gerilmesi ve değişik Newton kayma hızlarında iki değişik viskometrenin tüp boyutları için sürtünme hızı (V_s) aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilir (Fredrickson, 1964).

$$V_s = \frac{(V/R)_1 - (V/R)_2}{4(1/R_1 - 1/R_2)} \quad ; \quad t_w = \text{sabit} \quad (2.20)$$

Bu kayma gerilmesinde düzeltilen Newton kayma hızı $(V/R)^*$ şöyledir.

$$(V/R)^* = V/R - V_s/R \quad (2.21)$$

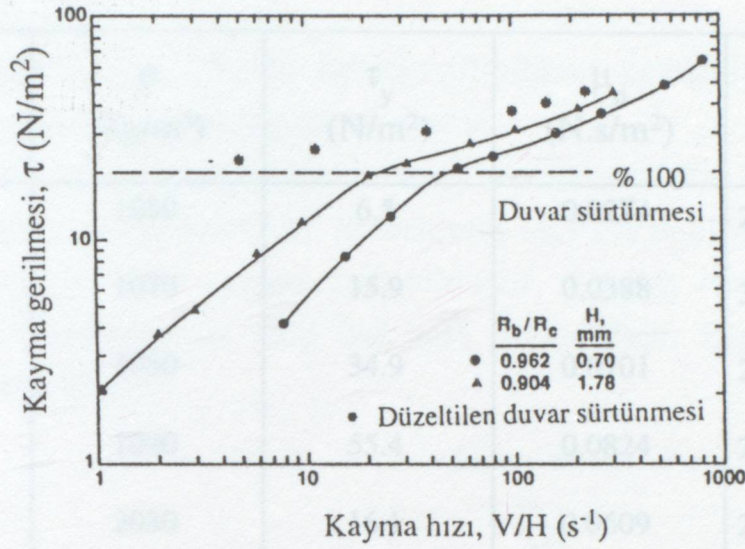
R_b / R_c değişik değerlerine göre, kil muhtevası %10 olan çamura ait reolojik ölçümler Coutte viskometresiyle yapılmış ve ölçüm sonuçlarından yararlanarak şekil 2.3 teşkil edilmiştir.



Şekil 2.3 Kil çamuru için Coutte viskometresiyle yapılan ölçüm sonuçları (Mannheimer, 1991)

Mannheimer (1991) kil çamuru üzerine konsantrik viskometresiyle kayma hızı artması veya azalmasıyla ölçüm sonuçları üç farklı kayma aralıkları oranı için önemli bir duvar sürtünmesi olmadığını bulmuştur (şekil 2.3).

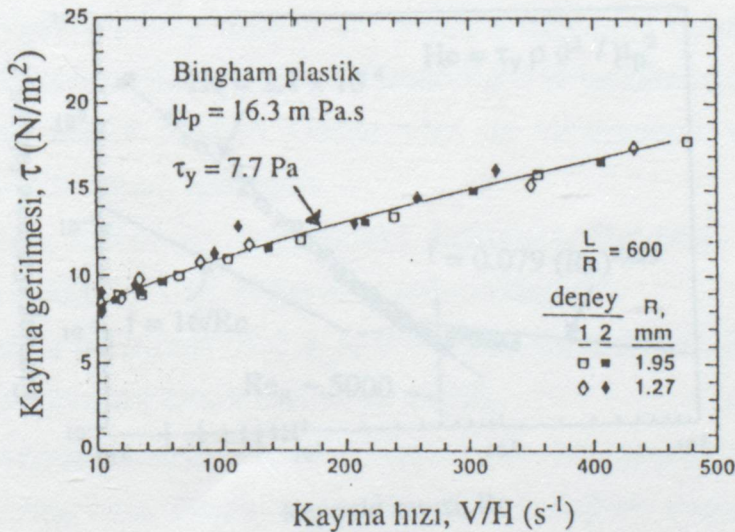
Diğer yandan şekil 2.4.'te gösterilen çimento çamurları çok geniş duvar sürtünmesi göstermektedir.



Şekil 2.4. Coute viskometresiyle ölçülen çimento çamuru için kayma gerilmesi ile kayma hızı değişimi

Tüp viskometresiyle yapılan Newton olmayan kil çamurları ölçüm sonuçlarından yararlanarak şekil 2.5. çizilmiştir. Ayrıca Newton olmayan kil çamurları Buckingham - Reiner denklemiyle uygun bir şekilde temsil edilmektedir (Mannheimer, 1991).

$$V/R = \tau_w / \mu_p [1/4 - 4/3 \tau_y / \tau_w + 1/12 (\tau_y / \tau_w)^4], |\tau_w| > \tau_y \text{ için} \quad (2.22)$$



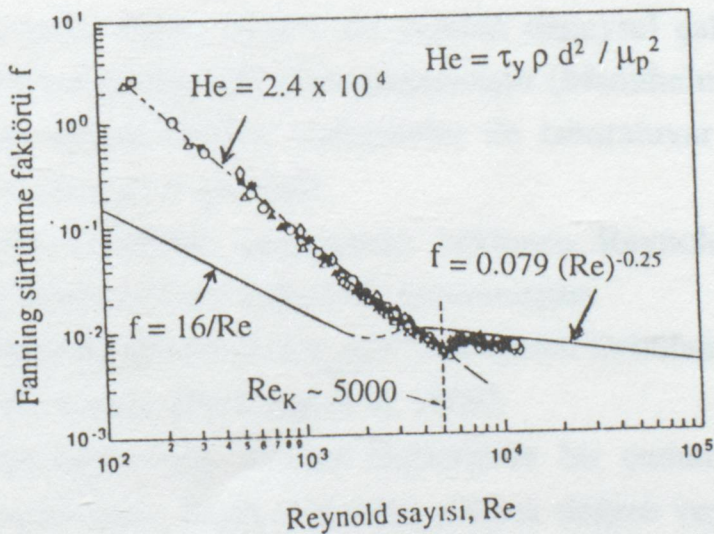
Şekil 2.5. Kil çamurlarına ait tüp viskometresiyle ölçülen duvar kayma gerilmesi ile kayma hızı değişimi (Mannheimer, 1991).

Tablo 2.1. Boruda laminar akımında ölçülen reolojik özellikleri

	ρ (kg/m ³)	τ_y (N/m ²)	μ_p (N.s/m ²)	He (boyutsuz)
% 8 kil	1050	6.5	0.0274	2.6×10^4
% 9 kil	1070	15.9	0.0388	3.1×10^4
% 10 kil	1080	34.9	0.0701	2.1×10^4
% 11 kil	1090	55.4	0.0824	2.4×10^4
% 37 çimento	2030	16.1	0.0609	2.4×10^4
% 38 çimento	2030	16.1	0.0555	2.9×10^4

Tablo 2.1.'deki çamurun reolojik özellikleri yaklaşık olarak aynı Hedstrom sayısı için bulunmuştur. Dolayısıyla sürtünme faktörü laminar akışında plastik viskoziteye dayanan Reynold sayısının tek fonksiyonudur (Hedstrom, 1952). Bu tahmin şekil 2.6.da tablo 2.1'e dayanarak ispat edilmiştir.

Hanks (1963), kritik Reynold sayısının 4600 ile 5000 arasında olduğunu şekil 2.6'da görüldüğü gibi belirlemiştir (Mannheimer, 1991).

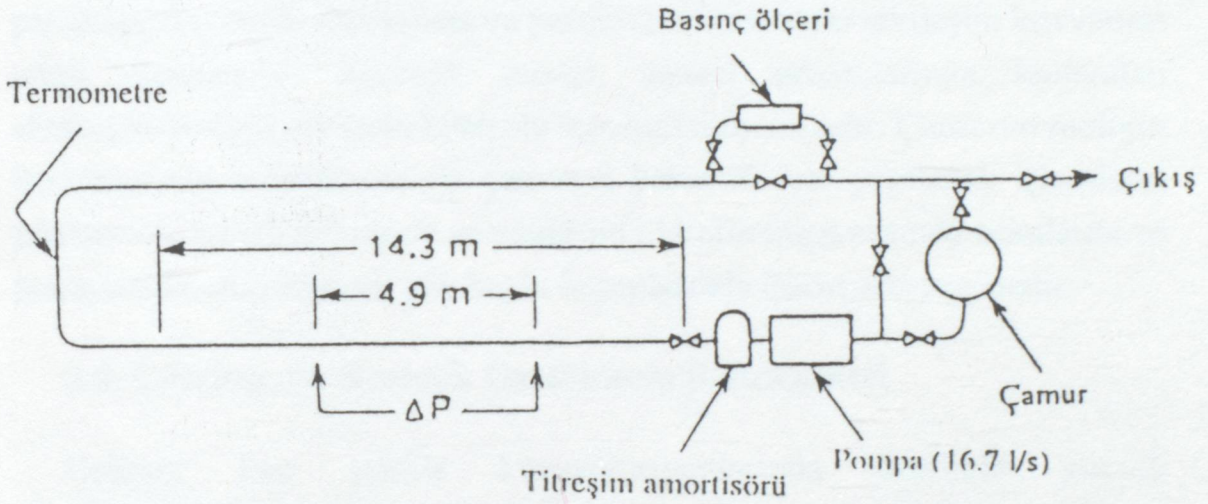


Şekil 2.6. Kil ve çimento çamurlarına ait sürtünme faktörü (Mannheimer, 1991).

2.8.1.2. Geniş ölçekli deneyler

Geniş ölçekli deney düzeni laminer türbülans geçişinin görülmesini sağlayan çimento çamurları için kurulmuştur.

Şekil 2.7'de verilen büyük ölçekli deney düzeninde 1500 litre hacminde karıştırma haznesi bulunmaktadır. Maksimum 16.7 L/s debiye ve 53kg/S'ye kadar katı madde ileten pompa kullanılmıştır. Akımın meydana geldiği boru 14.3 m uzunluğunda olup üzerinde basınç farkı ölçebilen basınç ölçerler bulunmaktadır.



Şekil 2.7. Büyük ölçekli deney düzeni (Mannheimer, 1991).

Büyük ölçekli deney düzeni ile yapılan deneysel çalışmalarda ölçüm sonuçları Newton sıvılar için şunu göstermiştir (Mannheimer, 1991).

a) Laminer akışta ölçülen viskoziteler ile laboratuvar viskometresi ile ölçülen viskozite uyum içindedir.

b) Laminer-türbülans geçişindeki beklenen Reynold sayısı Newton akışkan gibi 2000 ile 2100 değerinde bulunmuştur.

c) Sürtünme faktörleri ($f=2 \tau_w / \rho V^2$) tamamen türbülanslı akış, pürüzsüz borularınki ile aynıdır (Park and et al, 1989).

Fann viskometresiyle yapılan ölçümlerde bir çamur üzerine yapılan deneyler, kayma hızı, düşük değerden yüksek değere veya tersine yüksek değerden düşük değere değişmesiyle aynı sonuçlar elde edildiği takdirde

akışkan kararlı halde olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla çamurun davranışında kayma veya türbülans olması durumunda önemli veya anlamlı değişiklikler gözlenmemektedir. Buna karşılık kayma hızı artarken ve azalırken elde edilen ölçüm sonuçları farklı ise çamurun tikstropik özelliği veya çökeltme olayı söz konusu olmaktadır.

3.1. Arıtma Çamuru İçin Reolojik Modelin Önemi

Çamurun reolojik ölçümlerinde, partikül boyutu, partikül şekli, partiküllerin, lastik viskozitesi ve partiküller arasındaki etkileşim kuvvetleri etkili olmaktadır. Reolojik model, sanayi proseslerinde kullanılan akışkanlarla ilgili aletlerin kontrolü için kullanılmaktadır. Çamurun reolojik özelliklerinin araştırılmasıyla çamurun bertarafı için yapılacak işlemlerin yönteminin belirlenmesinde ve çamurun hidrolik taşınmasında borularda ve pompalarda oluşabilecek yük kaybı hesaplarında önem arz etmektedir.

3.2. Çamura Ait Reolojik Özelliklerin Belirlenmesi

Değişik katı madde konsantrasyonlarında özellikle yüksek konsantrasyonlardaki çamura ait viskozite değerleri oldukça yüksektir. Çamurun reolojik parametreleri Fann viskometresiyle değişik sayılarında (N) okunan θ_N değerleri yardımıyla hesaplanabilir. Kayma hızı, kayma gerilmesi, görsel viskozite, Bingham akma gerilmesi ve Plastik viskozite çamura ait reolojik parametrelerdir. Bu parametrelere ait bağıntılar aşağıda verilmiştir.

Kayma Hızı ($\dot{\gamma}$)

Fann viskometresi gibi rotasyonel viskometrelerde kayma hızı, burulma (torsiyon) ve rotasyon silindürleri arasındaki boşluk (dR) ile akma hızı değişimine (dV) değişimine bağlı olarak aşağıdaki gibi verilir (API Bul 13 D, 1985).

$$\dot{\gamma} = dV/dR$$



BÖLÜM 3

3. ARITMA ÇAMURUNA AİT REOLOJİK MODELİN OLUŞTURULMASI VE BORULARDAKİ YÜK KAYBI HESABI İÇİN MATEMATİK BİR BAĞINTININ GELİŞTİRİLMESİ

3.1. Arıtma Çamuru İçin Reolojik Modelin Önemi

Çamurun reolojik ölçümlerinde, partikül boyutu, partikül şekli, partiküllerin, lastik viskozitesi ve partiküller arasındaki etkileşim kuvvetleri etkili olmaktadır. Reolojik model, sanayi proseslerinde kullanılan akışkanlarla ilgili aletlerin kontrolü için kullanılmaktadır. Çamurun reolojik özelliklerinin araştırılmasıyla çamurun bertarafı için yapılacak işlemlerin yönteminin belirlenmesinde ve çamurun hidrolik taşınmasında borularda ve pompalarda oluşabilecek yük kaybı hesaplarında önem arz etmektedir.

3.2. Çamura Ait Reolojik Özelliklerin Belirlenmesi

Değişik katı madde konsantrasyonlarında özellikle yüksek konsantrasyonlardaki çamura ait viskozite değerleri oldukça yüksektir. Çamurun reolojik parametreleri Fann viskometresiyle değişik sayılarında (N) okunan θ_N değerleri yardımıyla hesaplanabilir. Kayma hızı, kayma gerilmesi, görünür viskozite, Bingham akma gerilmesi ve Plastik viskozite çamura ait reolojik parametrelerdir. Bu parametrelere ait bağıntılar aşağıda verilmiştir.

Kayma Hızı (γ)

Fann viskometresi gibi rotasyonel viskometrelerde kayma hızı, burulma (torsiyon) ve rotasyon silindirleri arasındaki boşluk (dR) ile akışın hız değişimine (dv) değişimine bağlı olarak aşağıdaki gibi verilir (API Bul 13 D, 1985).

$$\gamma = dv/dR$$

(3.1)

Burada;

γ : kayma hızı, s^{-1}

Kayma hızı ayrıca ampirik bir bağıntı halinde rotasyonel viskometrenin dönme sayısı (N) bağlı olarak 3.2 denklemi ile hesaplanabilir (API Spec 10, 1990).

$$\gamma = 1.703 N \quad (3.2)$$

N: dönme sayısı, devir/dak.

Kayma Gerilmesi (τ)

Rotasyonel viskometrelerde silindirlerin arasındaki mesafenin herhangi bir R noktasındaki tork (T),

$$T = \tau (2\pi R_b H) R_b \quad (3.3)$$

ile verilir (Rogers, 1963)

Burada;

R_b : Torsiyon silindiri yarı çapı (1.7245 cm)

H: Torsiyon silindiri uzunluğu (3.80 cm)

T: Rotasyon silindiri döndüren tork.

R_c : Rotasyon silindiri yarı çapı (1.8415 cm)

Standart rotasyonel viskometrelerde tork (T) viskometrenin yay sabiti olan α 'nin bir fonksiyonudur.

$$T = \alpha \theta_N \quad (3.4)$$

Burada $\alpha = 360.5$ olarak sabit bir değer alınabilir.

3.4 bağıntısı 3.3 bağıntısında yerine koyarak ve denklem düzenlenerek kayma gerilmesi eşitliği;

$$\tau = 0.51 \theta_N \quad (3.5)$$

elde edilir.

Burada;

τ , kayma gerilmesi N/m^2

Görünür Viskozite (μ_a)

Newton akışkanların kayma gerilmesi-kayma hızı arasındaki ilişki doğrusal olduğu için akışkan viskozitesi doğrunun eğimi olarak tanımlanmaktadır. Fakat, üs yasasına uyan Newton olmayan akışkanlarda bu ilişki doğrusal olmadığından grafikteki orijin noktasını eğirinin herhangi bir noktasına bağlayan bir doğru eğimine görünür viskozite denir. Görünür viskozite

$$\mu_a = 0.3 \theta_N / N \quad (3.6)$$

bağıntısıyla verilmektedir.

Plastik Viskozite (μ_p)

Bingham plastik akışkanlarda plastik viskozite, kayma gerilmesi-kayma hızı arasında çizilen grafikte oluşan doğrunun eğimi olarak bilinmektedir. Fann viskometresinde yapılan ölçüm sonuçları yardımıyla elde edilen aşağıdaki bağıntı plastik viskozite hesabı için kullanılabilir.

$$\mu_p = 0.3 (\theta_{N_m} - \theta_{N_{m-1}}) / (N_m - N_{m-1}) \quad (3.7)$$

Burada; ($N_m - N_{m-1}$ Fann viskometrede ard arda gelen iki dönme sayısıdır (örneğin: $N_{600} - N_{300}$ gibi)

μ_p : plastik viskozite, ($N.s/m^2$)

Bingham Akma Gerilmesi (τ_y)

Bingham plastik akışkanlarda, akışkanın akabilmesi için belli bir gerilme uygulanır. bu gerilmeye Bingham akma gerilmesi denir ve τ_y notasyonu ile gösterilir. Bingham akma gerilmesi Fann viskometresinde θ_N ve N değerleri kullanılarak aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir,

$$\tau_y = \theta_N - \mu_p N/300 \quad (3.8)$$

Ayrıca, kayma gerilmesi-kayma hızı grafiğinden akış eğirisinin kayma gerilmesi eksenini kestiği nokta ile orijin noktası arasındaki mesafeye Bingham akma gerilmesi olarak tariflenir.

Üs Yasasının Akışkanlarının Parametreleri

Üs yasası parametreleri n ve K dır. Bir akış kan, üs yasasına yani $\tau = K(\gamma)^n$ denkleminde uyulmu ise üs yasası parametreleri aşağıdaki bağıntılarla hesaplanmaktadır (API Bul 13D,1985). Üs yasası üssü (n) hesaplanmasında Fann viskometresi uygulanmasıyla üs yasası üssü,

$$n = \frac{\log (\theta_{N_m} / \theta_{N_{m-1}})}{\log (N_m / N_{m-1})} \quad (3.9)$$

ile verilmektedir. Yine, kayma gerilmesi-kayma hızı ilişkisi log-log kağıdı üzerine çizildiğinde ortaya çıkan doğrunun eğimi, üs yasasının üssü olan (n) değerini vermektedir.

Üs yasası ikinci sabiti (K)'nın hesaplanmasında yine Fann viskometresi ölçüm sonuçlarından yararlanılır. K parametresi :

$$K = 510 \theta_N / (1.703 N)^n \quad (3.10)$$

şeklinde verilmektedir.

Kayma gerilmesi-kayma hızı ilişkisi log-log kağıdı üzerine çizildiğinde ortaya çıkan doğrunun kayma gerilmesi eksenini kestiği noktanın orijine olan mesafeyi üs yasası sabiti (K) yı temsil etmektedir.

3.3. Çamurların Reolojik Modeli

Fann viskometresiyle çamurun çeşitli toplam katı madde konsantrasyonlarında yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlar 3.2 ve 3.5 denklemlerinde kayma hızı ve kayma gerilmesi hesaplanabilir. Çamurun değişik toplam katı madde konsantrasyonları ve sabit sıcaklıkta ayrıca sabit konsantrasyonlarda ve değişik sıcaklıklarda yapılan ölçüm sonuçlarında elde edilen değerlerle hesaplanan kayma gerilmesi y eksenini olarak ve kayma hızı x eksenini olarak işaretlenerek çizilen grafikler genellikle üs yasası veya Bingham plastik modeline uygunluk arz etmektedir.

Bingham plastik modelinin oluşturulması için plastik viskozite ve Bingham akma gerilmesi 3.7 ve 3.8 bağıntıları yardımıyla hesaplanabilmektedir.

Üs yasası çamuru reolojik modeli oluşturulması ise üs yasası parametrelerinden üs yasası üssü (n) ve (K) sabiti 3.9 ve 3.10 denklemleri kullanılarak belirlenebilir.

3.4. Reolojik Özelliklere Dayanarak Yük Kaybı Hesabı

Tek fazlı su, yağ ve buna benzeri maddeler Newton akışkanlar sınıfına girmektedir. Bu akışkanlarda basınç kaybı ya da yük kaybı laminar şartları altında, akışkan hızı ve viskozitesiyle orantılıdır. Akışkan hızı kritik değeri geçtiği zaman akışkan türbülanslı olmaktadır. Laminer-türbülans geçişi akışkan viskozitesiyle ters orantılı olan Reynold sayısına (Re) bağlıdır.

İçme suyu ve atıksu arıtma tesislerinde meydana gelen çamurlar genellikle Newton olmayan akışkanlardır. Dolayısıyla akım sırasındaki basınç kaybı, Laminer şartlarda, akışkan viskozitesi sabit olmadığından akım ile orantılı değildir. Newton olmayan akışkanlar için türbülanslı akım şartlarında Reynold sayısı doğru olarak hesaplanamaz.

Arıtma çamuru reolojik modeli Bingham plastik modele uyduğundan bu modelin parametreleri Bingham akma gerilmesi ve plastik viskozitesidir. Bu parametrelerin ikisinin belirlenmesi ile basınç kaybı hesabı mümkün olmaktadır. Türbülanslı veya laminar akışkanlarda basınç kaybı,

$$\Delta P = f \rho L V^2 / d \quad \text{akışkanlarına yük kaybı 3.11 denklemi (3.11)}$$

bulunmaktadır. Fakat bu denklemde Fanning sürtünme faktörü (f) ile yazılan bağıntısıyla hesaplanabilmektedir (Tchobanoglous and Burton, 1991).

Burada;

f: Fanning sürtünme faktörü

ρ : akışkan yoğunluğu, kg/m^3

L: boru uzunluğu, m

V: akışkan hızı, m/s

d: boru çapı, m

Fanning sürtünme faktörü (f) türbülanslı akışkanda Reynold sayısı (Re) ve Hedstrom sayısı (He) gibi boyutsuz sayılara bağlı olarak şekil 3.1'den okunarak elde edilebilir. Reynold sayısının hesabında

$$Re = d \cdot \rho \cdot V / \mu_p \quad (3.12)$$

bağıntısı kullanılmaktadır.

Hedstrom sayısı ise;

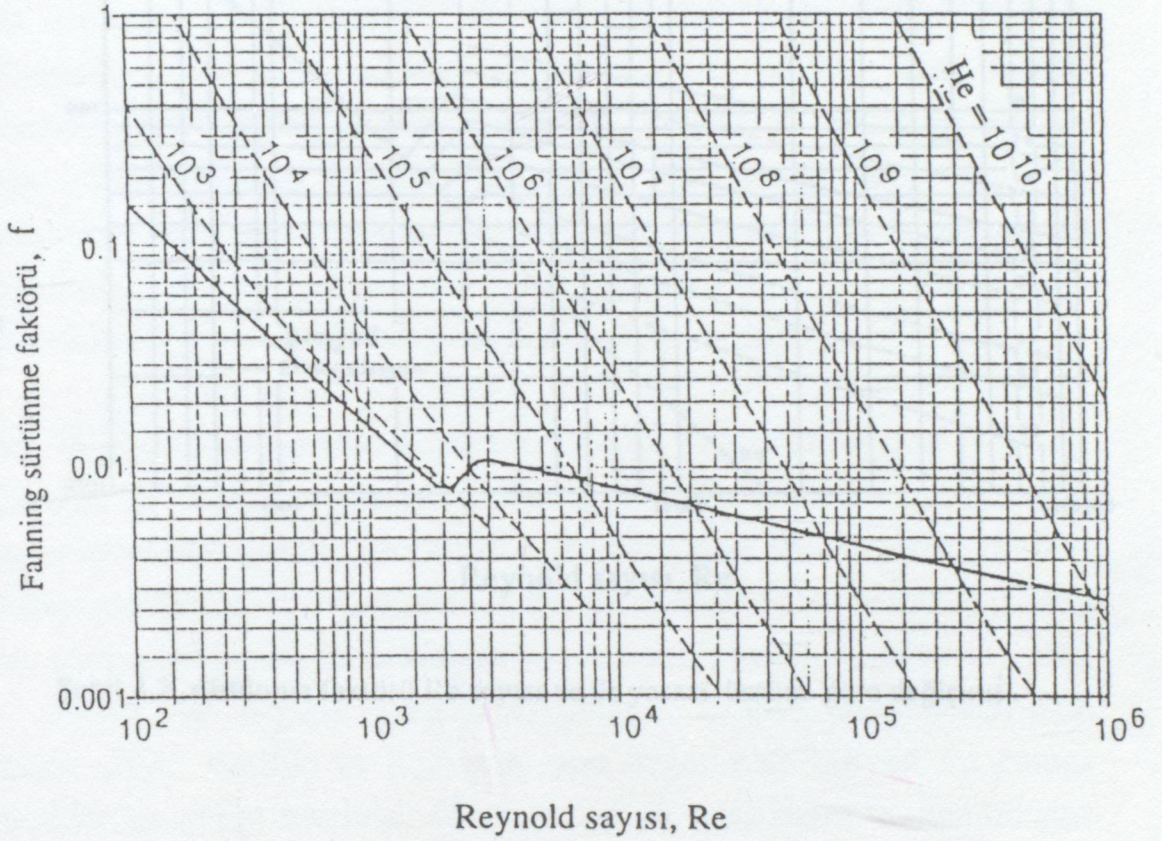
$$He = d^2 \tau_y \rho / \mu_p^2 \quad (3.13)$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanabilir (Tchobanoglous and Burton, 1991).

Şekil 3.1'deki Fanning sürtünme faktörü, saf su için yapılan hidrolik deneylerinden elde edilen sürtünme faktöründen farklıdır. Borunun pürüzlüğü gözönüne alınmayarak Fanning sürtünme faktörü ile Reynold sayısı şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Su gibi akışkanlar için borunun pürüzlüğü gözönüne alınarak elde edilen Fanning sürtünme faktörü, denklem (3.11)'de yerine yazılarak hesaplanan basınç kaybı ile şekil 3.1'den alınan Fanning sürtünme faktörü daha büyük ise borunun pürüzlüğü hakimdir ve Fanning sürtünme faktörü hesabı için borunun pürüzlüğü gözönüne alınması gerekir.

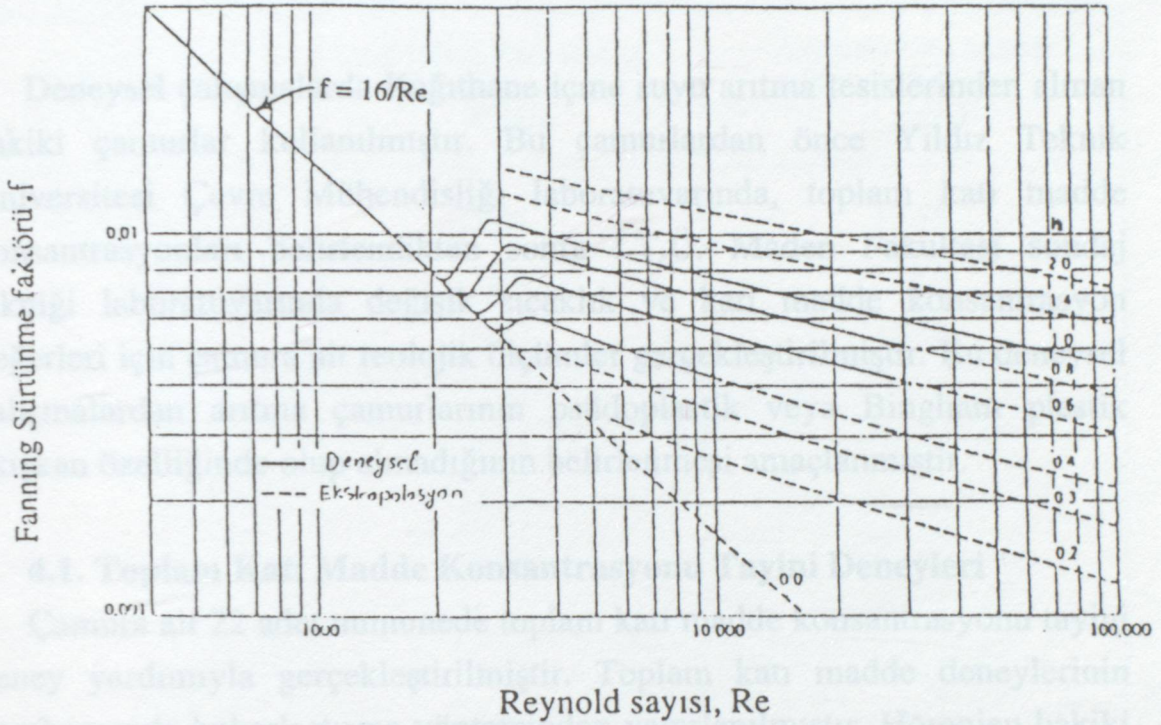
Borularda üs yasası akışkanlarına yük kaybı 3.11 denkleme göre bulunmaktadır. Fakat bu denklemde Fanning sürtünme faktörü (f) üs yasası sabiti (K) ve üssüne (n) ye bağlı olarak şekil 3.2'den okunmaktadır.



Şekil 3.1 Bingham plastik akışkanlarında sürtünme faktörü Re ve He ile değişimi

BÖLÜM 4

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR



Şekil 3.2. sürtünme faktörü Re sayısı ve üs yasası üssüne göre değişimi.

deney yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Toplam katı madde deneylerinin yapılmasında buharlaştırma yöntemi tercih edilmiştir. Homojen hakiki çamur konsantrasyonlarında bekletilmiş, üzerinde oluşan duru su alınarak daha sonra 100 g/l konsantrasyonunda, toplam katı madde miktarı 100 g/l olarak elde edilmiştir. Aynı özellik ve konsantrasyon değerlerini taşıyan bu çamur numuneleri fig gruba ayrılarak her biri değişik analizlerde kullanılmıştır. Kağıthane içme suyu arıtma tesisinden alınan alümin çamurunu alt orijinal toplam katı madde konsantrasyonu 12.64 g/l dir. Daha sonra bekletilip suyu azaltılan çamur numunelerinden 15.8, 16.26, 19.45, 23.3, 24.65, 26.64, 28.13, 28.88, 30.66, 33.45, 33.81, 49.12, 53.31, 55.63, 58.79, 60.36, 62.2, 63.4, 64.25, 66.4 ve 75.2 g/l konsantrasyon değerleri elde edilmiştir. Herbir toplam katı madde konsantrasyon değerindeki çamur numunelerinde önce suyu ve yaklaşık 20 °C oda sıcaklığında daha sonra muhtelif sıcaklıklarda Pompa viskozitesiyle değişik dönme sayılarına karşı gelen θ_N gösterge değerleri okunmuştur ve çamurun alt moleküler özellikler hesaplanmıştır. Yine aynı toplam katı madde konsantrasyon değerini taşıyan üçüncü grup çamur numunelerinde aşağıdaki katı madde konsantrasyonları filtrasyon yöntemiyle belirlenmiştir.

Çeşitli konsantrasyon değerlerindeki çamurların toplam katı madde konsantrasyon değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

BÖLÜM 4

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalarda Kağıthane içme suyu arıtma tesislerinden alınan hakiki çamurlar kullanılmıştır. Bu çamurlardan önce Yıldız Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği laboratuvarında, toplam katı madde konsantrasyonları belirlendikten sonra İ.T.Ü. Maden Fakültesi sondaj tekniği laboratuvarında değişik sıcaklık ve katı madde konsantrasyon değerleri için çamura ait reolojik ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel çalışmalardan arıtma çamurlarının psüdoplastik veya Bingham plastik akışkan özelliğinde olup almadığının belirlenmesi amaçlanmıştır.

4.1. Toplam Katı Madde Konsantrasyonu Tayini Deneyleri

Çamura ait 22 adet numunede toplam katı madde konsantrasyonu tayini deney yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Toplam katı madde deneylerinin yapılmasında buharlaştırma yönteminden yararlanılmıştır. Homojen hakiki çamur numunesi mezürde bekletilmiş, üzerinde oluşan duru su alınarak daha yüksek ve değişik konsantrasyonlarda çamur numuneleri elde edilmiştir. Aynı özellik ve konsantrasyon değerlerini taşıyan bu çamur numuneleri üç gruba ayrılarak her biri değişik analizlerde kullanılmıştır. Kağıthane içme suyu arıtma tesisinden alınan alum çamuruna ait orijinal toplam katı madde konsantrasyonu 12.64 g/l dir. Daha sonra bekletilip suyu azaltılan çamur numunelerinden 15.8, 16.26, 19.45, 23.3, 24.65, 26.64, 28.13, 28.88, 30.66, 33.45, 33.81, 49.12, 53.31, 55.63, 58.79, 60.36, 62.2, 63.4, 64.26, 66.4 ve 75.2 g/l konsantrasyon değerleri elde edilmiştir. Herbir toplam katı madde konsantrasyon değerindeki çamur numunelerinde önce sabit ve yaklaşık 20 °c oda sıcaklığında daha sonra muhtelif sıcaklıklarda Fann viskometresiyle değişik dönme sayılarına karşı gelen θ_N gösterge değerleri okunmuştur ve çamura ait reolojik özellikler hesaplanmıştır. Yine aynı toplam katı madde konsantrasyon değerini taşıyan üçüncü grup çamur numunesinde askıdaki katı madde konsantrasyonları filtrasyon yöntemiyle belirlenmiştir.

Çeşitli konsantrasyon değerlerindeki çamurların toplam katı madde konsantrasyon değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Çamur Numunelerinde Belirlenen Toplam Katı Madde ve Askıdaki Katı Madde Konsantrasyon Değerleri (20 °c).

Numune No	Toplam Katı Madde Konsantrasyonu C (g/l)	Askıdaki Katı Madde Konsantrasyonu C ₁ (g/l)
1	12.64	11.55
2	15.8	14.6
3	16.26	15.13
4	19.45	18.2
5	22.3	21.1
6	24.65	23.3
7	26.64	25.3
8	28.13	26.9
9	28.88	27.1
10	30.66	28.7
11	33.45	31.4
12	33.81	31.7
13	49.12	46.9
14	53.31	50.1
15	55.63	52.4
16	58.79	55.3
17	60.36	56.6
18	62.2	58.1
19	63.4	59.2
20	64.26	60.2
21	66.4	61.3
22	75.2	70.4

4.2. Arıtma Çamuruna Ait Reolojik Ölçümler

Bölüm 4.1'de belirtilen 22 adet toplam katı madde konsantrasyonlu 350 ml hacimli çamur numuneleri; 3,6,100,200,300 ve 600 devir/dakika dönme sayılarına karşılık gelen θ_N gösterge değerleri Fann viskometresinden okunmuştur. Reolojik ölçümlerin yapıldığı Fann viskometre fotoğrafı şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Fann Viskometresinin Fotoğrafı

Herbir toplam katı madde konsantrasyonunda çeşitli dönme sayılarına karşılık gelen θ_N değerleri Tablo E.1 ile Tablo E.22 arasında verilmiştir. Yine aynı tablolarda çamura ait kayma hızı γ , kayma gerilmesi τ , görünür viskozite μ_a , plastik viskozite μ_p ve akma gerilmesi τ_y değerleri sırayla 3.2, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 bağıntıları ile hesaplanarak verilmiştir.

çamurun reolojik özellikleri bağıntıları bölüm 3'te verilmiştir ve elde edilen tablolar o denklemlerden hesaplanarak (SI) birim sistemine çevrilmiştir.

Fann viskometresine ait paslanmaz çelik hazneye toplam katı madde konsantrasyonu belli çamur numuneleri konduktan sonra homojenlik sağlanması için iyice karıştırılıp viskometredeki yerine yerleştirilerek alet çalıştırılmıştır. Herbir numune için değişik dönme sayılarında θ_N ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yine toplam katı madde konsantrasyonları belli alum çamuru numuneleri viskometre kabına konduktan sonra 25,30,40,50,60 °C gibi çeşitli sıcaklık değerlerine kadar ısıtılarak alet θ_N değerleri ölçülmüştür.

4.3. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

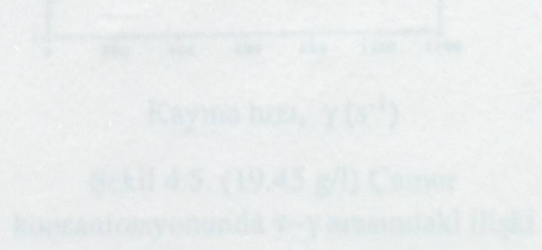
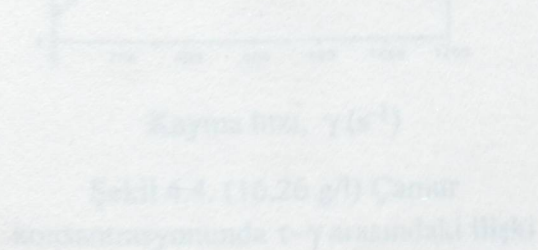
4.3.1. Arıtma Çamuru Örneklerindeki Reolojik Özelliklerinin Değerlendirilmesi

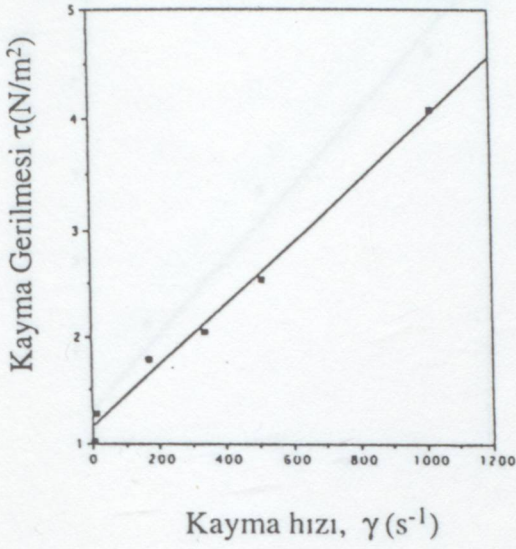
Kağıthane içme suyu arıtma tesisinde oluşan alum çamurları için hazırlanan 22 değişik katı madde konsantrasyonlarındaki numunelerde yaklaşık 20 °C'de reolojik ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde Fann viskometresi kullanılmıştır. Viskometrede 6 adet dönme sayısında θ_N değerleri okunmuştur. Okunan değerler kullanılarak farklı konsantrasyonlardaki çamurlar için 3.5 denklemiyle kayma gerilmesi, 3.2 denklemiyle kayma hızı, 3.6 denklemiyle görünür viskozite, 3.7 denklemiyle plastik viskozite ve 3.8 denklemiyle akma gerilmesi hesaplanmıştır. Hesaplanan sonuçlar herbir katı madde konsantrasyonu için tablo E.1 ile Tablo E.22 arası verilmiştir. Tablolardaki sonuçlardan yararlanarak kayma gerilmesi düşey ekseninde, kayma hızı yatay ekseninde işaretlenerek reolojik ölçümü yapılan herbir konsantrasyon için grafikler çizilmiş ve şekil 4.2 ile şekil 4.23 arasında verilmiştir. Ayrıca şekil 4.24'te

ise 12.64 g/l ile 75.2 g/l katı madde konsantrasyonları arasındaki reolojik ölçümü yapılan çamur örnekleri için kayma gerilmesi ile kayma hızı arasındaki ilişki toplu olarak verilmiştir. Grafiklerin tamamı Cricket Graph 1.3 versiyon ve Kaleida Graph bilgisayar programı ile çizilmiştir. Şekil 4.2-4.23 arasındaki grafiklerden alum çamuru tüm numuneleri için çamurun Bingham plastik reolojik modele uyduğu görülmüştür. Reolojik parametrelerin ölçümü yapılan arıtma çamuru örneklerine ait grafiklerden elde edilen reolojik bağıntılar tablo 4.2'de verilmiştir. Regrasyon analizinde tüm grafikler için korelasyon katsayısı: $R^2=0.96-0.99$ gibi yüksek seviyede elde edilmiştir. Grafiklerde kayma gerilmesi-kayma hızı arasındaki ilişki için orijinden geçmeyen doğrusal grafikler ortaya çıkmıştır.

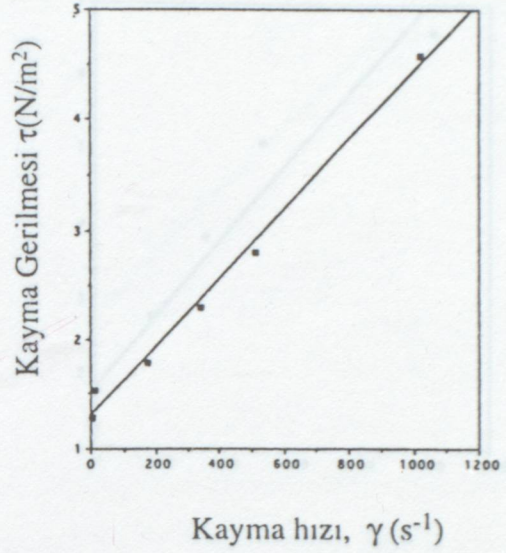
Alum çamur örneklerine ait reolojik ölçüm sonuçlarından çamurun Bingham plastik reolojik modele uyduğu ve kayma gerilmesi-kayma hızı ilişkisini gösteren grafiklerden doğrunun düşey eksenı kestiği nokta (τ_y) akma gerilmesini ve doğrunun eğiminde (μ_p) plastik viskoziteyi vermektedir. Ölçüm yapılan çamur örneklerine ait bu parametreler tablo 4.2'de verilmiştir. Çamura ait konsantrasyon değeri 12.64 g/l'den 75.2 g/l'ye kadar artarken akma gerilmesi 1.146 N/m²'den 4.954 N/m²'e kadar artmıştır. Dolayısıyla akışkanın yoğunluğu (ρ) artmıştır. Bu husus Hedstrom sayısının artmasına neden olmaktadır. Hedstrom sayısı (He) artmasıyla daha yüksek Fanning sürtünme faktörü oluşmakta ve borularda taşınan çamurların yük kaybı artmaktadır.

Çamura ait toplam katı madde konsantrasyonu 12.64 g/l'den 75.2 g/l'ye artarken ve artış oranı 5.95 iken akma gerilmesi artış oranı ($4.945 \text{ N.s/m}^2 / 1.146 \text{ N.s/m}^2 = 4.32$) olup katı madde konsantrasyonu oranında artmıştır. Buna karşılık basınç düşüşü yani yük kaybı artmaktadır.

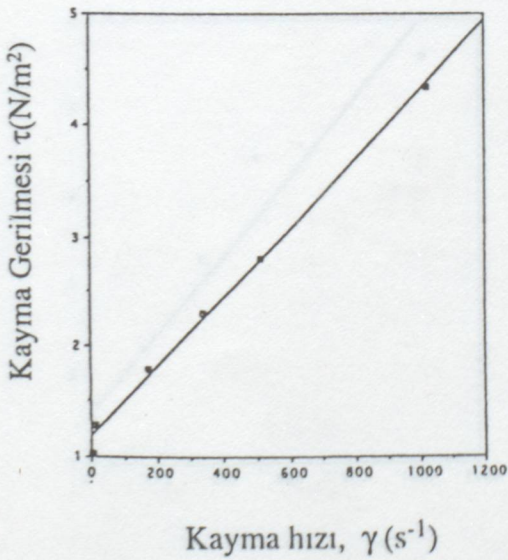




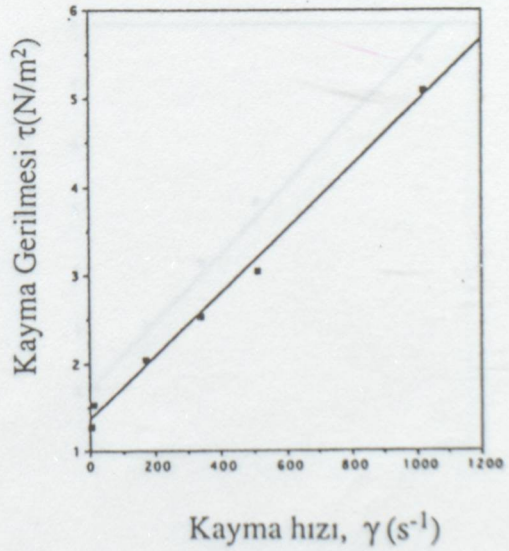
Şekil 4.2. (12.64 g/l) Çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki



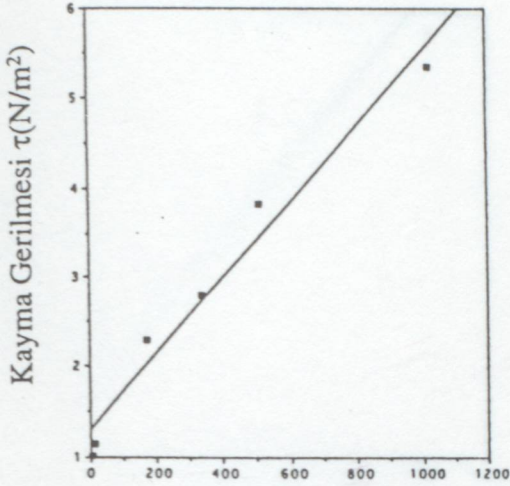
Şekil 4.3. (15.8 g/l) Çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki



Şekil 4.4. (16.26 g/l) Çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki

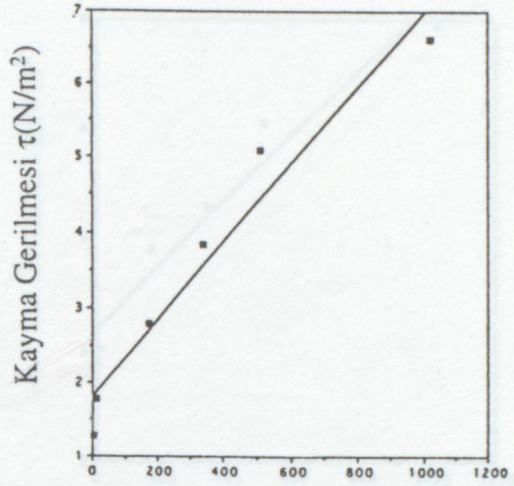


Şekil 4.5. (19.45 g/l) Çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki



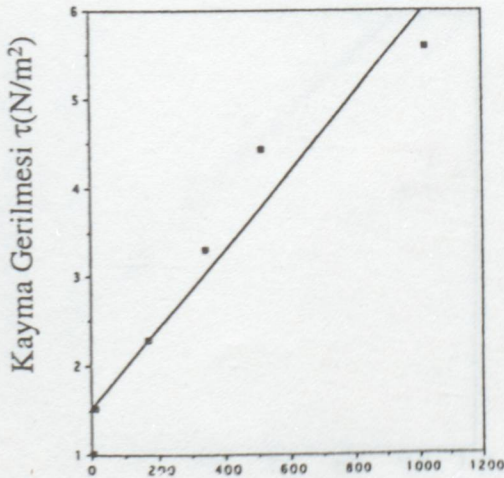
Kayma hızı, γ (s^{-1})

Şekil 4.6. (22.3 g/l) Çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki



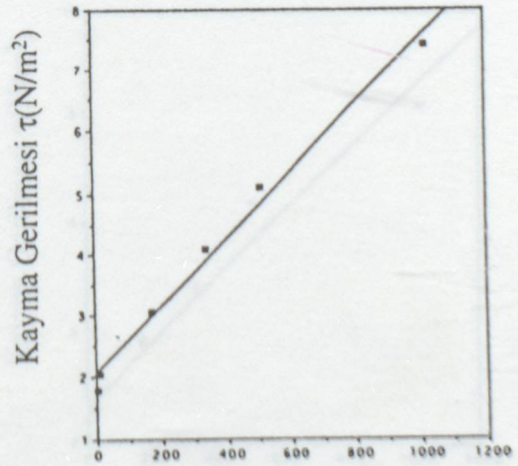
Kayma hızı, γ (s^{-1})

Şekil 4.7. (24.65 g/l) Çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki



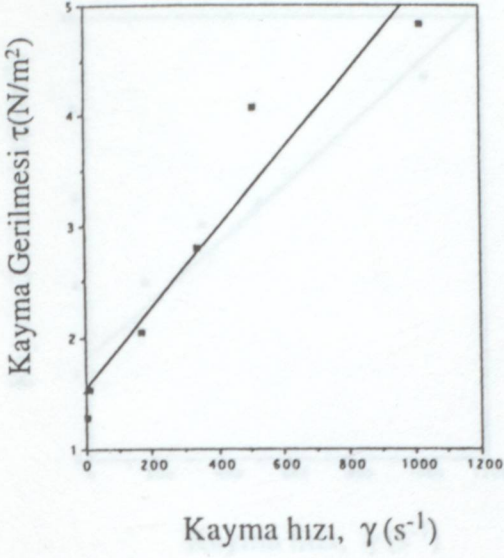
Kayma hızı, γ (s^{-1})

Şekil 4.8. (26.64 g/l) Çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki

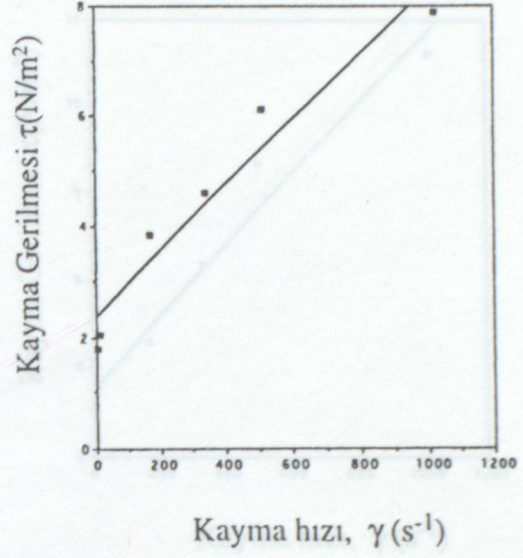


Kayma hızı, γ (s^{-1})

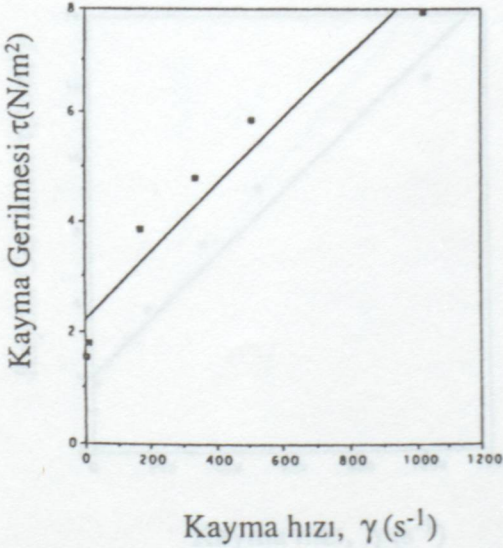
Şekil 4.9. (28.13 g/l) Çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki



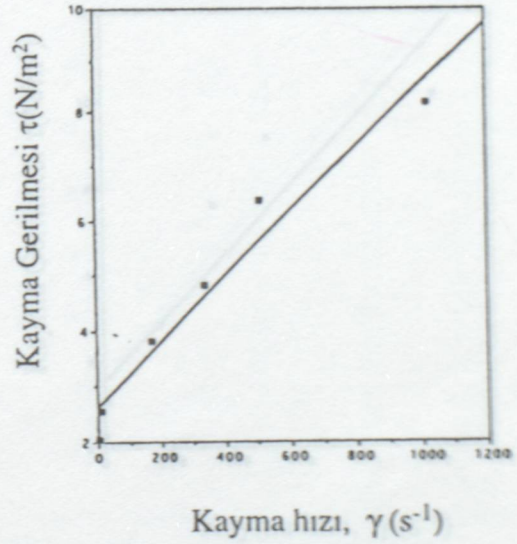
Şekil 4.10. (28.88 g/l) Çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki



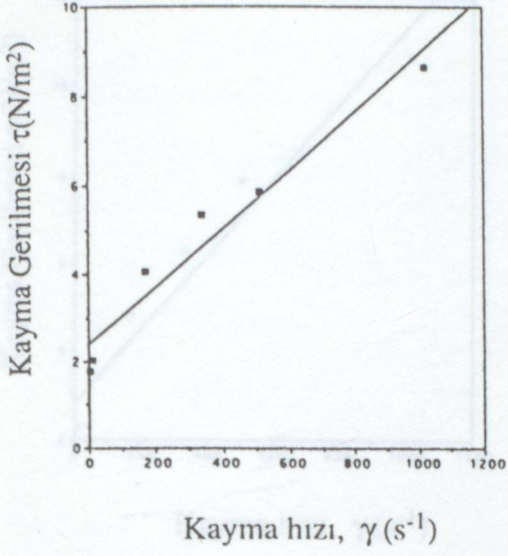
Şekil 4.11. (30.66 g/l) Çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki



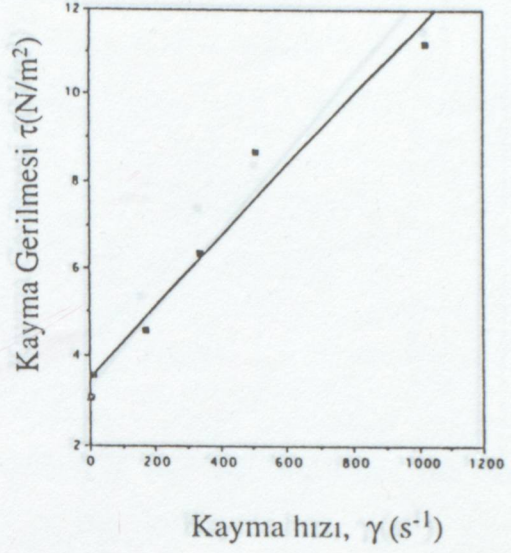
Şekil 4.12. (33.45 g/l) Çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki



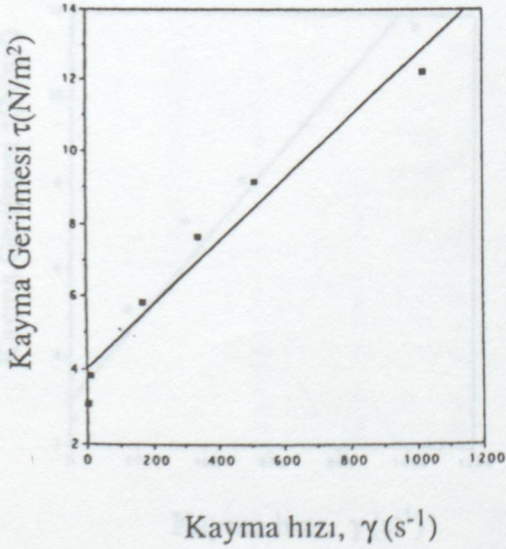
Şekil 4.13. (33.81 g/l) Çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki



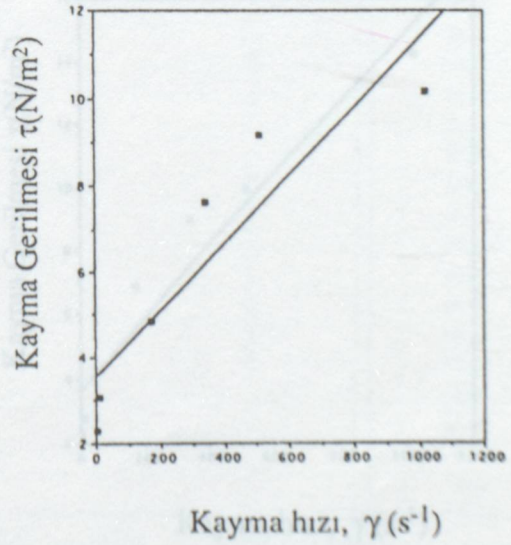
Şekil 4.14. (49.12 g/l) Çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki



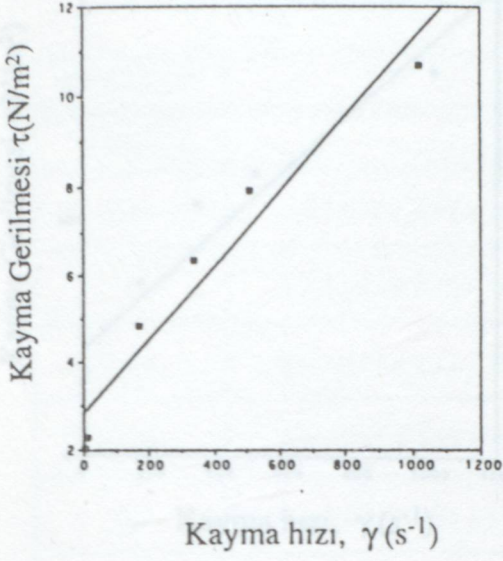
Şekil 4.15. (53.31 g/l) Çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki



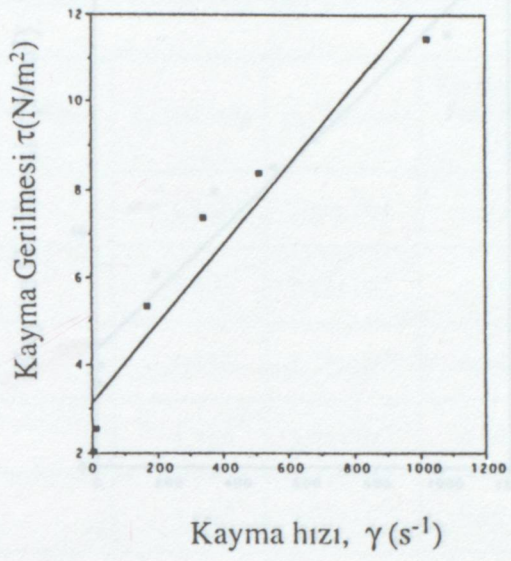
Şekil 4.16. (55.63 g/l) Çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki



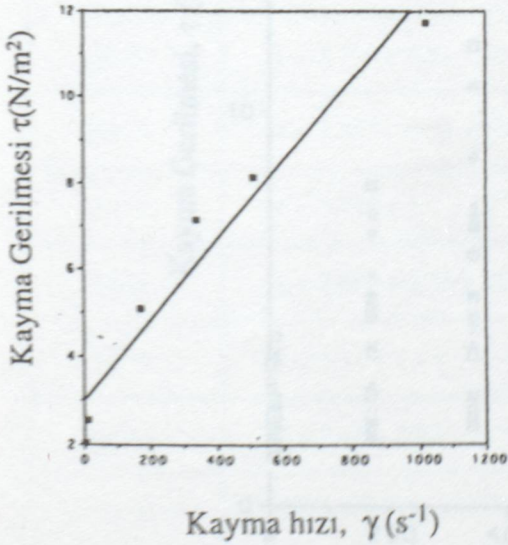
Şekil 4.17. (58.79 g/l) Çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki



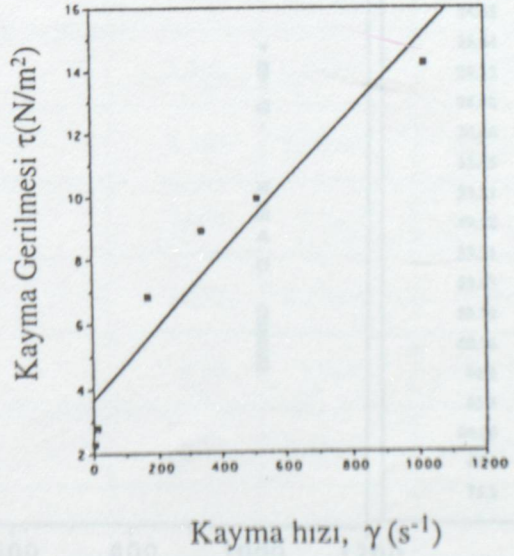
Şekil 4.18. (60.36 g/l) Çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki



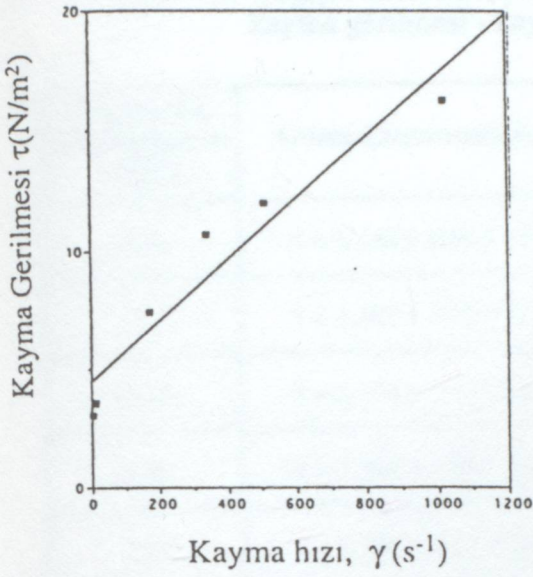
Şekil 4.19. (62.2 g/l) Çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki



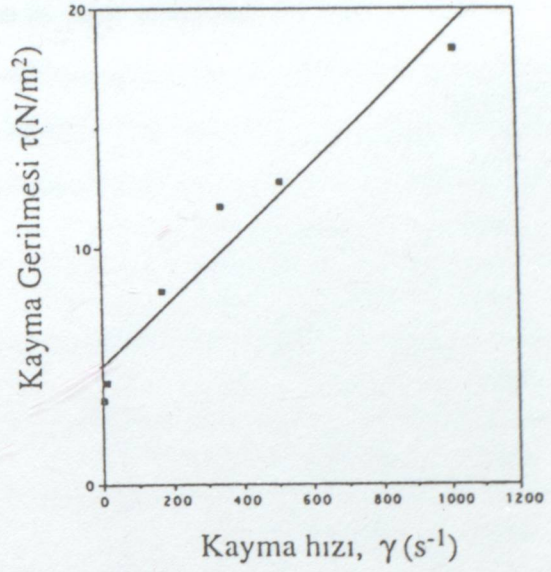
Şekil 4.20. (63.4 g/l) Çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki



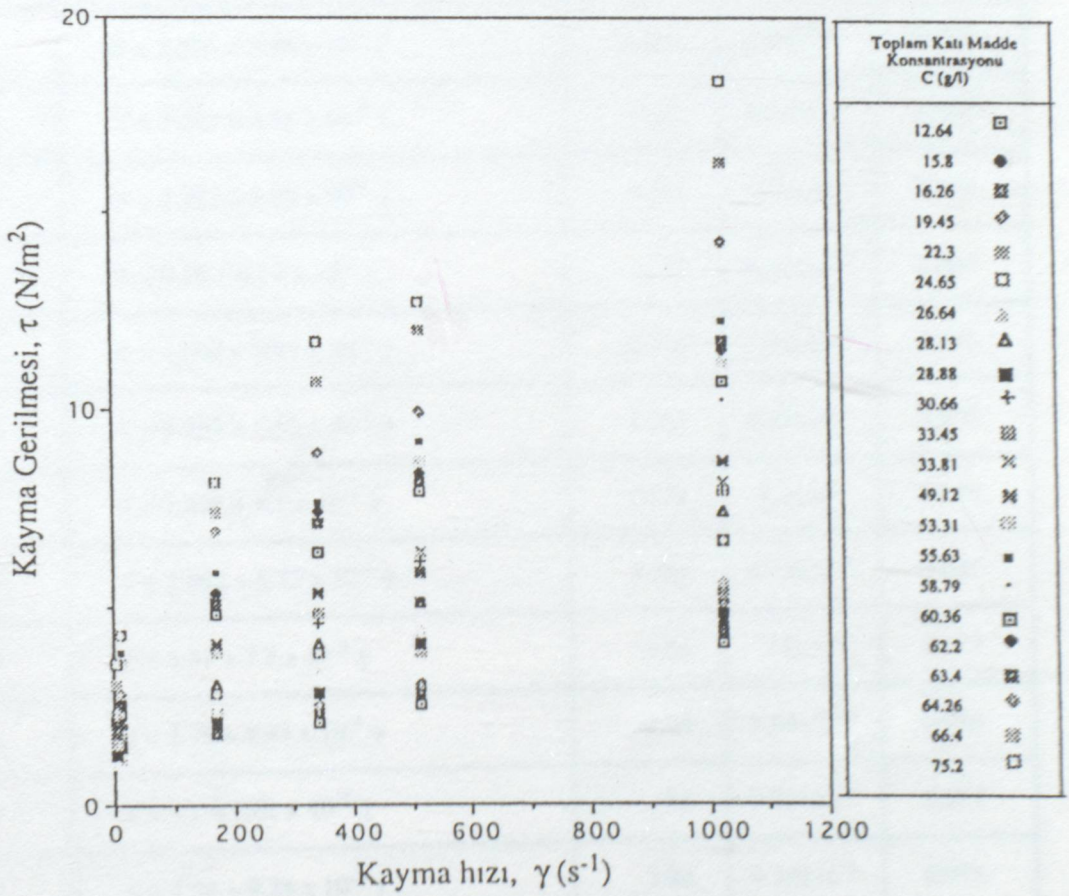
Şekil 4.21. (64.26 g/l) Çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki



Şekil 4.22. (66.4 g/l) Çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki



Şekil 4.23. (75.2 g/l) Çamur konsantrasyonunda τ - γ arasındaki ilişki



Şekil 4.24. (12.6-75.2 g/l) arasındaki Çamur konsantrasyonunda için τ - γ arasındaki ilişki

Tablo 4.2. Değişik konsantrasyonlar (12.64 - 75.2 g/l) için arıtma çamurunun kayma gerilmesi - kayma hızı reolojik modelleri (20 °c).

Çamura Ait Konsantrasyon C (g/l)	Arıtma Çamurunun Reolojik Modeli	τ_y (Ns/m ²)	μ_p (Ns/m ²)	Korelasyon Katsayısı R
12.64	$\tau = 1.146 + 2.84 \times 10^{-3} \gamma$	1.146	2.84×10^{-3}	0.994
15.8	$\tau = 1.302 + 3.12 \times 10^{-3} \gamma$	1.302	3.12×10^{-3}	0.995
16.26	$\tau = 1.174 + 3.13 \times 10^{-3} \gamma$	1.174	3.13×10^{-3}	0.996
19.45	$\tau = 1.355 + 3.58 \times 10^{-3} \gamma$	1.355	3.58×10^{-3}	0.996
22.3	$\tau = 1.289 + 4.21 \times 10^{-3} \gamma$	1.289	4.21×10^{-3}	0.984
24.65	$\tau = 1.794 + 5.15 \times 10^{-3} \gamma$	1.794	5.15×10^{-3}	0.974
26.64	$\tau = 1.516 + 4.41 \times 10^{-3} \gamma$	1.516	4.41×10^{-3}	0.967
28.13	$\tau = 2.036 + 5.44 \times 10^{-3} \gamma$	2.036	5.44×10^{-3}	0.994
28.88	$\tau = 1.527 + 3.58 \times 10^{-3} \gamma$	1.527	3.58×10^{-3}	0.963
30.66	$\tau = 2.327 + 5.95 \times 10^{-3} \gamma$	2.327	5.95×10^{-3}	0.971
33.45	$\tau = 2.18 + 6.14 \times 10^{-3} \gamma$	2.18	6.14×10^{-3}	0.967
33.81	$\tau = 2.596 + 5.91 \times 10^{-3} \gamma$	2.596	5.91×10^{-3}	0.977
49.12	$\tau = 2.382 + 6.53 \times 10^{-3} \gamma$	2.382	6.53×10^{-3}	0.975
53.31	$\tau = 3.454 + 8.1 \times 10^{-3} \gamma$	3.454	8.1×10^{-3}	0.982
55.63	$\tau = 3.592 + 8.73 \times 10^{-3} \gamma$	3.592	8.73×10^{-3}	0.977
58.79	$\tau = 3.51 + 7.8 \times 10^{-3} \gamma$	3.51	7.8×10^{-3}	0.917
60.36	$\tau = 2.79 + 8.43 \times 10^{-3} \gamma$	2.79	8.43×10^{-3}	0.973
62.2	$\tau = 3.1 + 9.01 \times 10^{-3} \gamma$	3.1	9.01×10^{-3}	0.962
63.4	$\tau = 2.94 + 9.24 \times 10^{-3} \gamma$	2.94	9.24×10^{-3}	0.975
64.26	$\tau = 3.62 + 11.3 \times 10^{-3} \gamma$	3.62	11.3×10^{-3}	0.961
66.4	$\tau = 4.419 + 12.8 \times 10^{-3} \gamma$	4.419	12.8×10^{-3}	0.962
75.2	$\tau = 4.954 + 14.1 \times 10^{-3} \gamma$	4.954	14.1×10^{-3}	0.972

4.3.2. Alum Çamuru Reolojik Özelliklerine Sıcaklık Etkisinin Araştırılması

Fann viskometresiyle 16.26, 28.13, 58.79 ve 75.2 g/l toplam katı madde konsantrasyonu değerlerinde ve her bir konsantrasyon için 20, 25, 30, 40, 50 ve 60 °C'de değişik sıcaklıklarda ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçümler Fann viskometresi ile yapılmıştır. Fann viskometresinde 3, 6, 100, 200, 300 ve 600 devir/dakika dönme sayılarında θ_N değerleri okunmuştur. Okunan bu değerler her bir konsantrasyon ve değişik sıcaklıklar için Ek 1'de tablo E.23 ile tablo E.26'da verilmiştir. Bu tablolardaki dönme sayılarına karşılık θ_N okuma değerleri ile hesaplanan kayma gerilmesi ve kayma hızı değerleri aralarındaki ilişkinin ve akma gerilmesi ile plastik viskozitenin belirlenebilmesi için grafikler hazırlanmıştır. Şekil 4.25 ile 4.30 arası 16.26 g/l için kayma gerilmesi-kayma hızı arasındaki ilişkiler görülmektedir. Şekil 4.31'de değişik sıcaklık değerlerinde ve 16.26 g/l toplam katı madde konsantrasyonu için yapılan ölçüm sonuçları bir arada verilmiştir. Grafiklerden çamurun Bingham plastik modeline uyduğu ve alum çamuru reolojik modeli parametreleri olan plastik viskozite ve akma gerilmesi sıcaklık artışıyla azalmıştır.

Şekil 4.32 ile şekil 4.38 arası 28.13 g/l toplam katı madde konsantrasyonlu çamur örneği şekil 4.39 ile şekil 4.45 arası 58.79 g/l çamur örneği ve şekil 4.46 ile 4.52 arasında 75.2 g/l toplam katı madde konsantrasyonlu çamur için değişik sıcaklıklardaki ölçüm sonuçlarına ait grafikler verilmiştir. Grafiklerden düşük sıcaklıklarda daha yüksek akma gerilmesi (τ_y) olduğu ve sıcaklık yükseldikçe akma gerilmesinin azaldığı gözlenmiştir.

Grafiklerde kayma gerilmesi ile kayma hızı arasındaki ilişkiyi gösteren doğrunun düşey eksenini kestiği nokta (τ_y) akma gerilmesi ve doğrunun eğimi plastik viskoziteyi vermektedir. Hazırlanan tüm grafikler için kayma gerilmesi ile kayma hızı arasındaki ilişkinin regrasyon analizi yapılarak korelasyon katsayısı: $R^2=0.97-0.99$ olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.3'te 20 °C ile 60 °C arasında değişik konsantrasyonlar için çamur örneklerine ait reolojik maddeler ve grafiklerden okunan τ_y ile μ_p değerleri verilmiştir.

Tablo 4.2'de 22 değişik toplam katı madde konsantrasyonlarında ve viskometrenin dönme sayıları için hesaplanan plastik viskozite değerleri verilmiştir. Ölçümlerin tamamı 20 °c'de gerçekleştirilmiştir. Tablo 4.2'teki verilen sonuçlardan yararlanarak düşey ekseninde plastik viskozite yatay ekseninde toplam katı madde konsantrasyon değerleri işaretlenerek şekil 4.57 elde edilmiştir. Bu şekle göre çamura ait katı madde konsantrasyon değeri artarken plastik viskozite de artmaktadır. Bu artışa ait matematik bağıntı doğrusal olup aşağıda verilmiştir.

$$\mu_p = 6.16 \times 10^{-4} + 1.51 \times 10^{-4} C$$

Şekil 4.58'de düşey ekseninde plastik viskozite yatay ekseninde de çamura ait askıdaki katı madde konsantrasyonu değerleri işaretlenerek plastik viskozite ile askıdaki katı madde konsantrasyonu arasındaki ilişkinin grafiği elde edilmiştir. Bu grafiğe göre askıdaki katı madde konsantrasyonu artarken çamurun plastik viskozitesi de artmaktadır. İlişki ile ilgili matematik bağıntı aşağıda verilmiştir.

$$\mu_p = 0.0024 \times 10^{0.010 C_1}$$

Şekil 4.59 ve şekil 4.60'da düşey ekseninde (τ_y) akma gerilmesi yatay ekseninde çamur sıcaklığı işaretlenerek grafikler elde edilmiştir. Her iki grafikte de sıcaklık artarken akma gerilmesi azalmaktadır.

Şekil 4.62'de yatay ekseninde katı madde konsantrasyonu düşey ekseninde akma gerilmesi işaretlenerek grafik elde edilmiştir. Çamura ait katı madde konsantrasyonu artarken τ_y akma gerilmesi de artmaktadır. Akma gerilmesi ile katı madde konsantrasyonu arasındaki ilişkinin matematik bağıntısı aşağıda verilmiştir.

$$\tau_y = 0.039 + 0.515C$$

Tablo 4.3'ten anlaşılabacağı üzere, sabit konsantrasyonlar için sıcaklık 20 °c'den 60 °c'e kadar artarken alum çamuruna ait Bingham akma gerilmesinin azaldığı görülmektedir. Bu azalma düşük toplam katı madde

konsantrasyonlu %7, yüksek toplam katı madde konsantrasyonlarında akma gerilmesindeki azalma oranı %60'a kadar ulaşmaktadır,

4.3.3. Çamurun Hidrolik Taşınmasında Oluşan Basınç Düşüşü Bağıntısının Geliştirilmesi

Çamura ait akma gerilmesinin sıcaklık arttıkça azalması ile Hedstrom sayısı da azalmaktadır. Dolayısıyla çamurun boru ile hidrolik taşınması sırasında oluşacak yük kaybı azalacaktır. Yük kaybının azalması ile daha düşük kapasiteli pompa gerekecek ve işletme maliyeti de azalmış olacaktır,

3.11 denklemi arıtma çamurunun 20 °c sıcaklıkta ve değişik toplam katı madde konsantrasyonu plastik viskozite ve akma gerilmesine dayanarak borularda yük kaybı (basınç düşüşü) için aşağıdaki denklem geliştirilmiştir,

$$\Delta P = \frac{Re}{He} f.L.V.\rho. \frac{(0.039 + 0.515 C) 10^4}{6.16 + 1.51 C}$$

Bu bağıntı kullanılarak çamur toplam katı madde konsantrasyonuna da bağlı olarak basınç düşüşü veya yük kaybı hesaplanabilecektir,



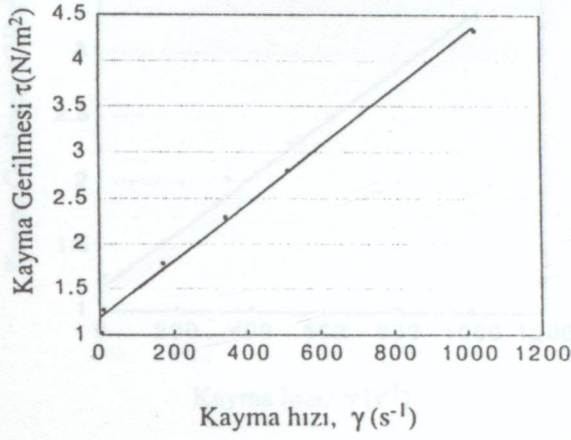
Şekil 4.25 20% toplam katı madde konsantrasyonunda

20 °C'de 7.5 m/s akış hızı için

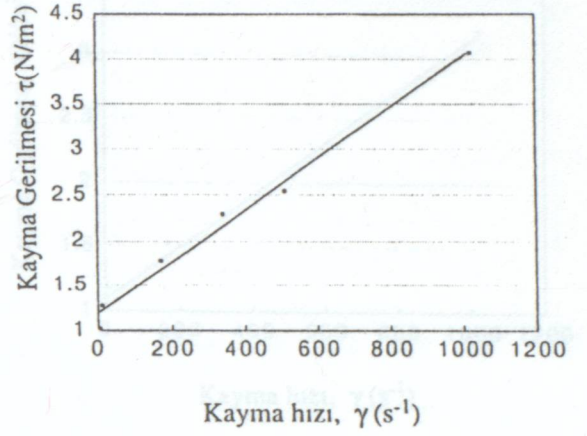


Şekil 4.26 20% toplam katı madde konsantrasyonunda

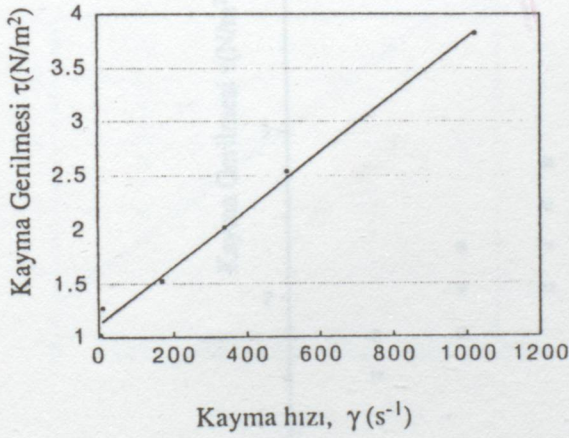
20 °C'de 7.5 m/s akış hızı için



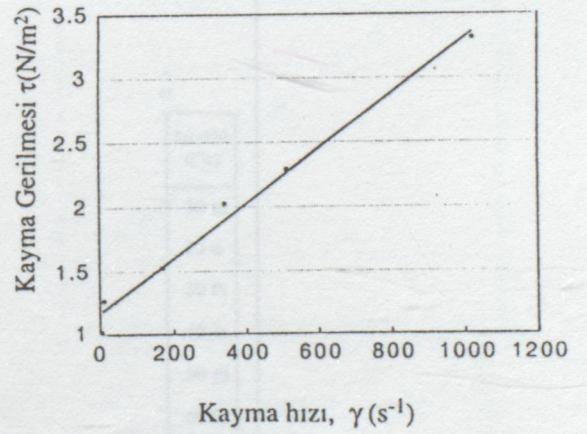
Şekil 4.25. (16.26 g/l) Çamur konsantrasyonunda ve 20 °C'de τ - γ arasındaki ilişki



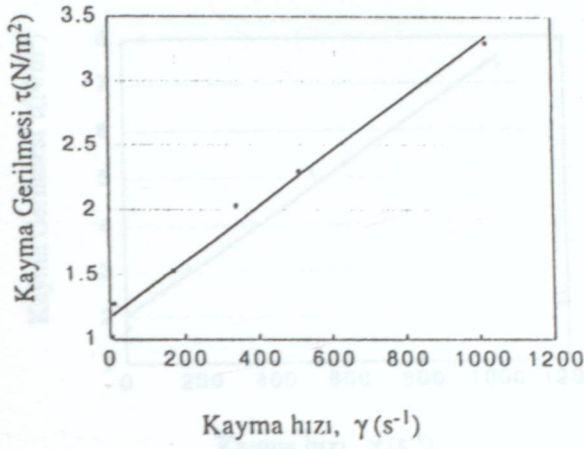
Şekil 4.26. (16.26 g/l) Çamur konsantrasyonunda ve 25 °C'de τ - γ arasındaki ilişki



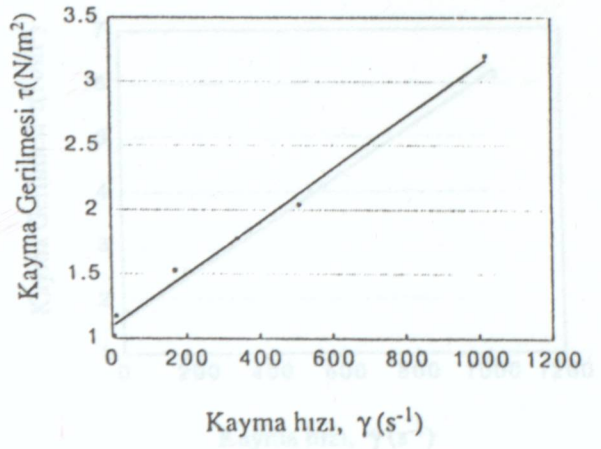
Şekil 4.27. (16.26 g/l) Çamur konsantrasyonunda ve 30 °C'de τ - γ arasındaki ilişki



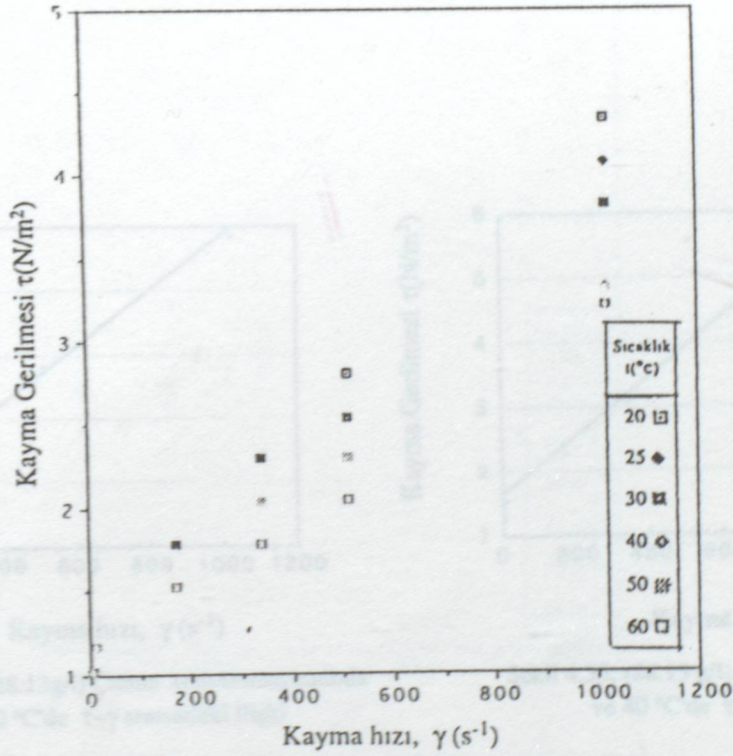
Şekil 4.28. (16.26 g/l) Çamur konsantrasyonunda ve 40 °C'de τ - γ arasındaki ilişki



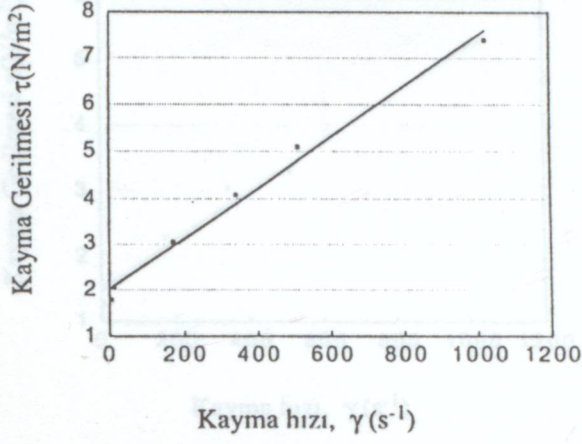
Şekil 4.29. (16.26 g/l) Çamur konsantrasyonunda ve 50 °C'de τ - γ arasındaki ilişki



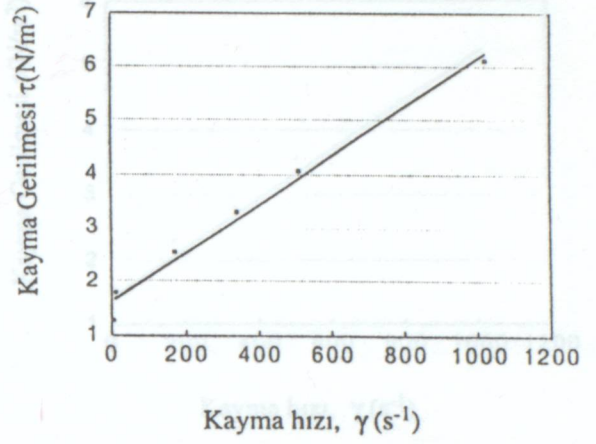
Şekil 4.30. (16.26 g/l) Çamur konsantrasyonunda ve 60 °C'de τ - γ arasındaki ilişki



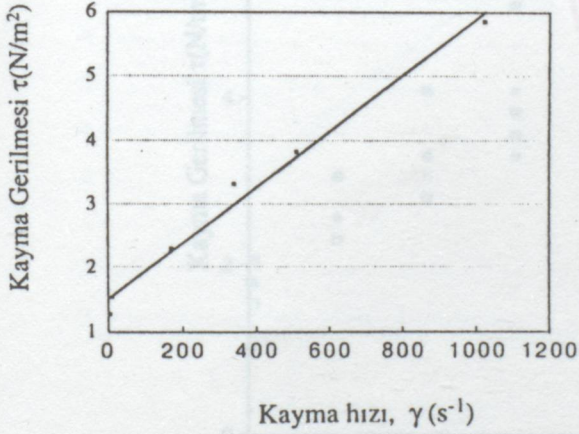
Şekil 4.31. (16.26 g/l) Sabit çamur konsantrasyonunda 20,25,30,40,50 ve 60 °C'de τ - γ arasındaki ilişki



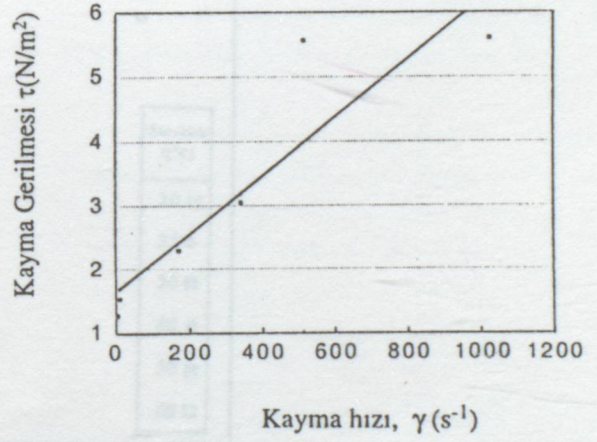
Şekil 4.32. (28.13g/l) Çamur konsantrasyonunda ve 20 °C'de τ - γ arasındaki ilişki



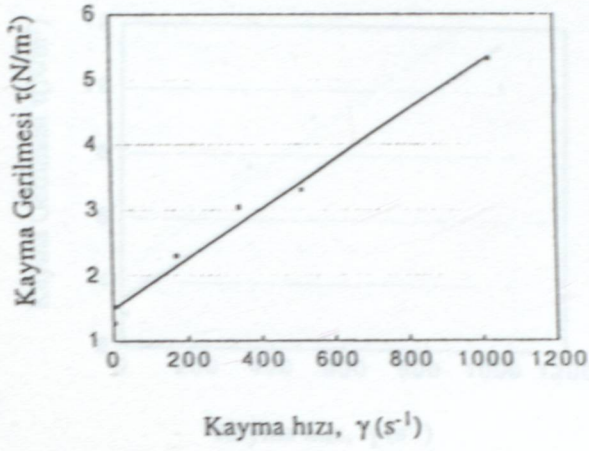
Şekil 4.33. (18.13g/l) Çamur konsantrasyonunda ve 25 °C'de τ - γ arasındaki ilişki



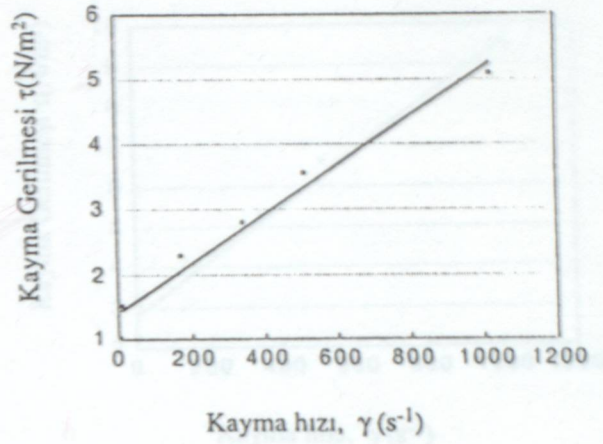
Şekil 4.34. (28.13g/l) Çamur konsantrasyonunda ve 30 °C'de τ - γ arasındaki ilişki



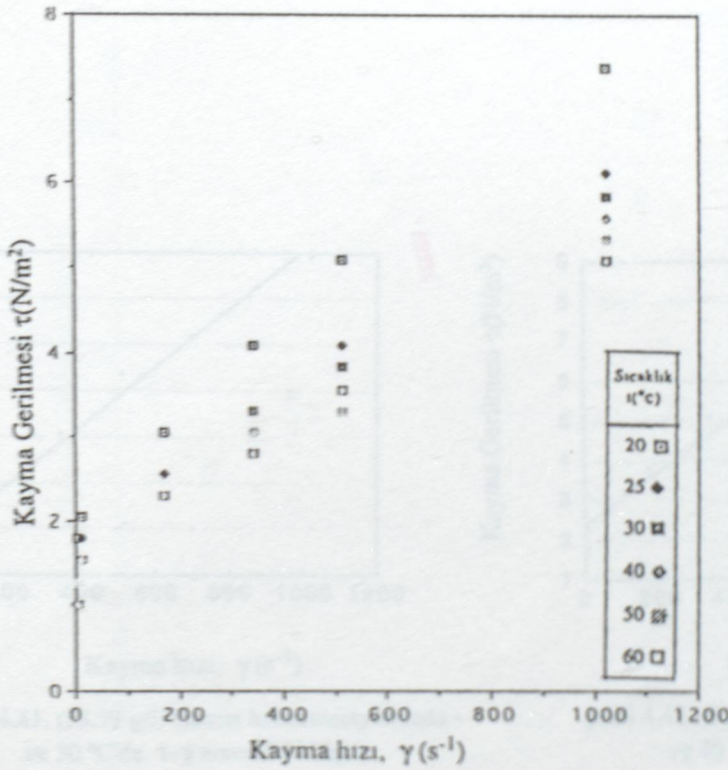
Şekil 4.35. (28.13 g/l) Çamur konsantrasyonunda ve 40 °C'de τ - γ arasındaki ilişki



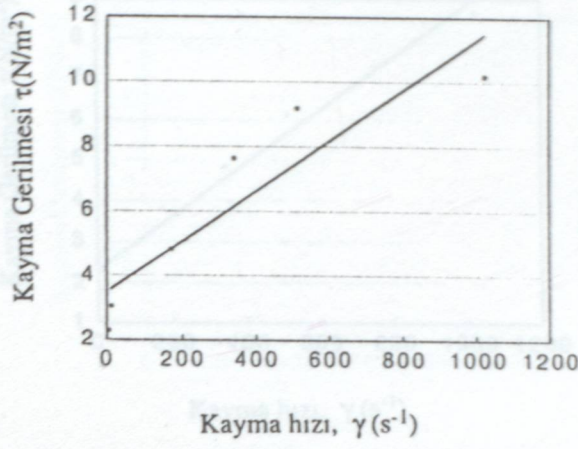
Şekil 4.36. (28.13 g/l) Çamur konsantrasyonunda ve 50 °C'de τ - γ arasındaki ilişki



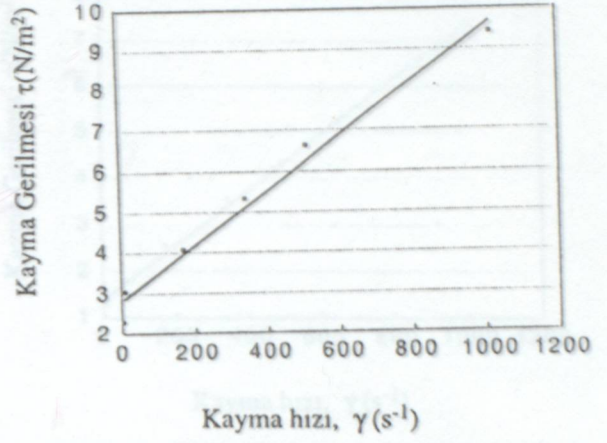
Şekil 4.37. (28.13 g/l) Çamur konsantrasyonunda ve 60 °C'de τ - γ arasındaki ilişki



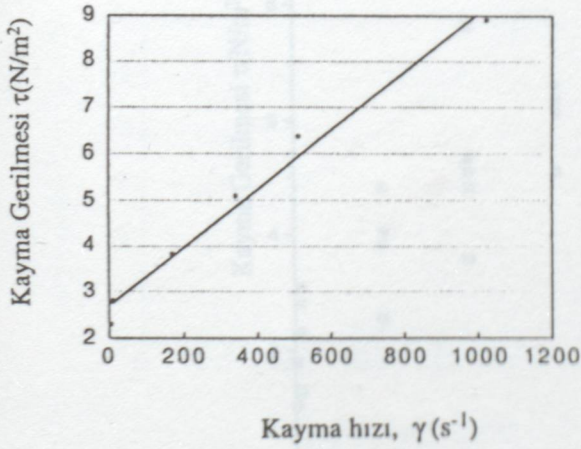
Şekil 4.38. (28.13 g/l) Sabit çamur konsantrasyonunda 20,25,30,40,50 ve 60 °C'de τ - γ arasındaki ilişki



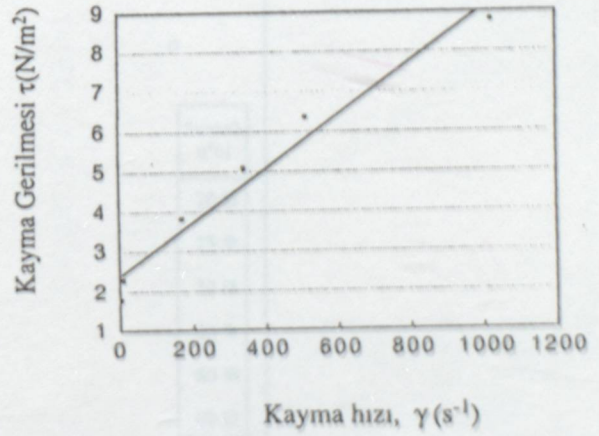
Şekil 4.39. (58.79 g/l) Çamur konsantrasyonunda ve 20 °C'de τ - γ arasındaki ilişki



Şekil 4.40. (58.79 g/l) Çamur konsantrasyonunda ve 25 °C'de τ - γ arasındaki ilişki

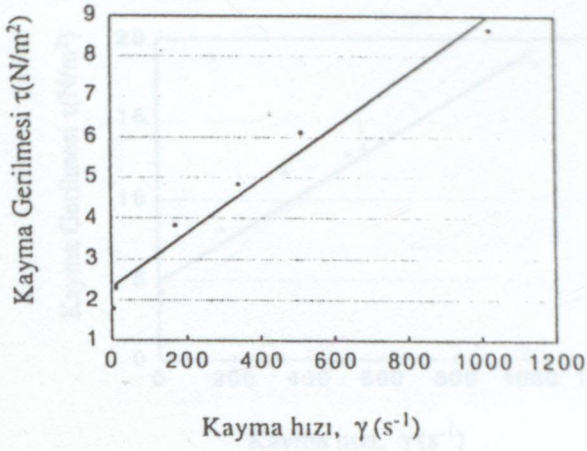


Şekil 4.41. (58.79 g/l) Çamur konsantrasyonunda ve 30 °C'de τ - γ arasındaki ilişki

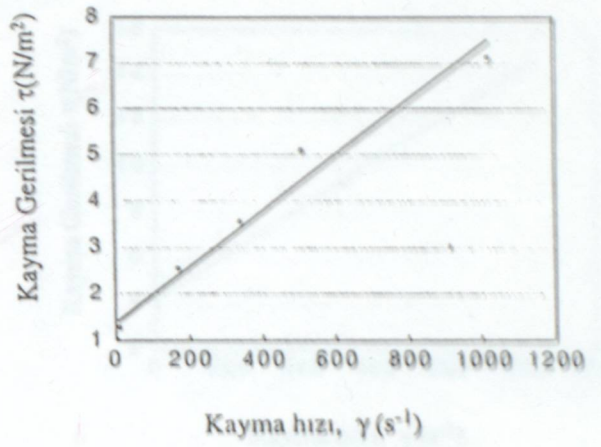


Şekil 4.42. (58.79 g/l) Çamur konsantrasyonunda ve 40 °C'de τ - γ arasındaki ilişki

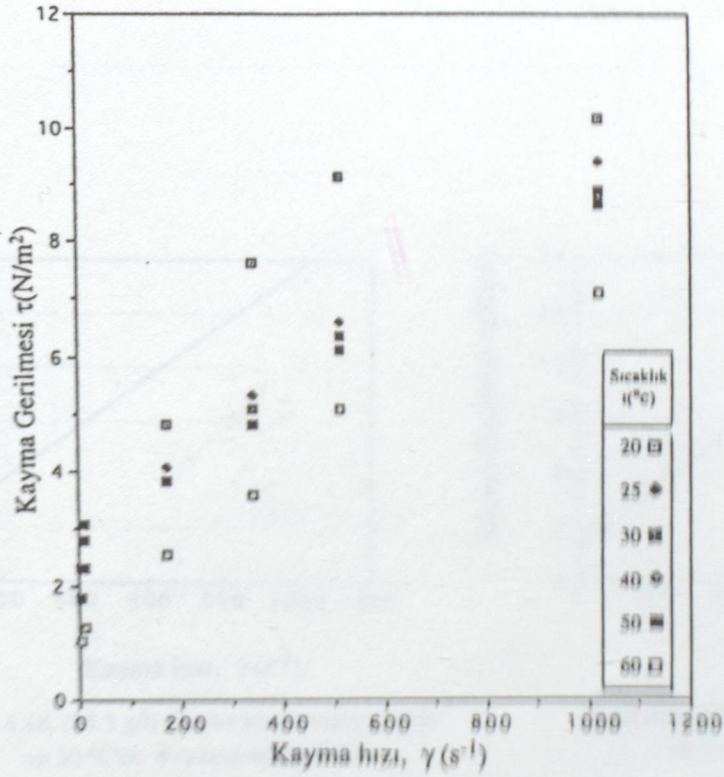




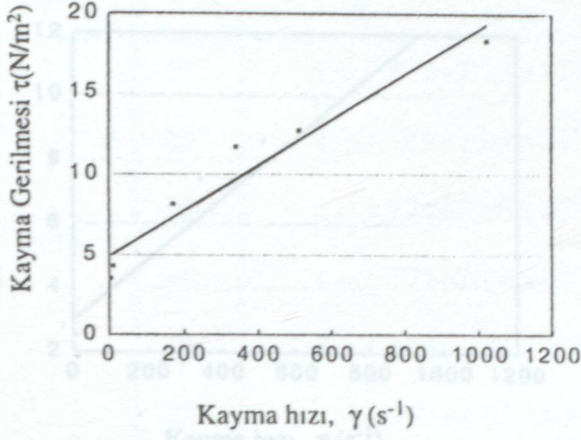
Şekil 4.43. (58.79 g/l) Çamur konsantrasyonunda ve 50 °C'de τ - γ arasındaki ilişki



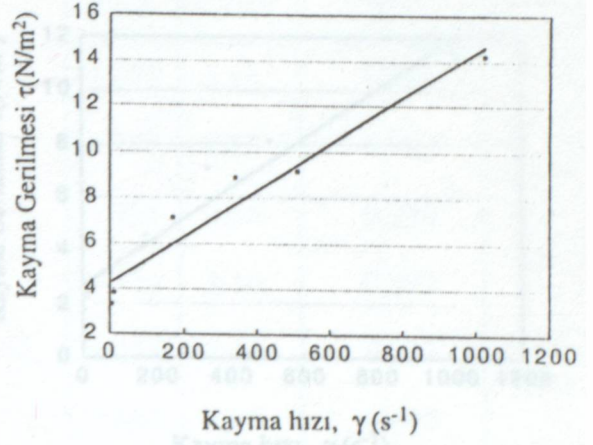
Şekil 4.44. (58.79 g/l) Çamur konsantrasyonunda ve 60 °C'de τ - γ arasındaki ilişki



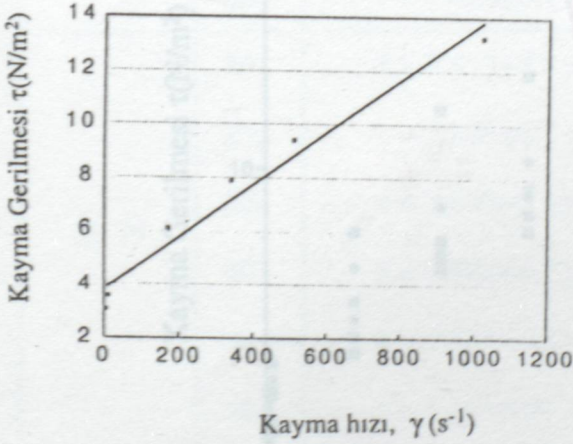
Şekil 4.45. (58.79 g/l) sabit çamur konsantrasyonunda 20,25,30,40,50 ve 60 °C'de τ - γ arasındaki ilişki



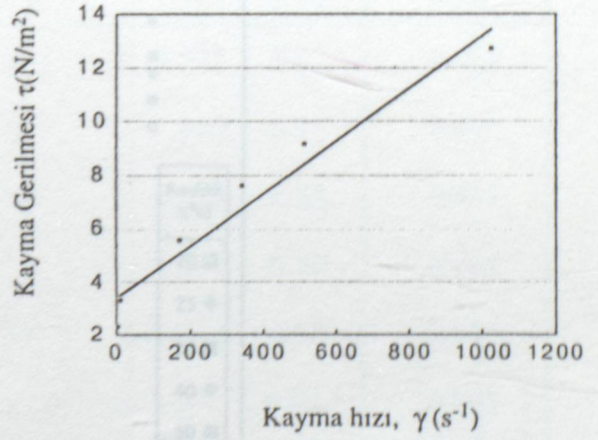
Şekil 4.46. (75.2 g/l) Çamur konsantrasyonunda ve 20 °C'de τ - γ arasındaki ilişki



Şekil 4.47. (75.2 g/l) Çamur konsantrasyonunda ve 25 °C'de τ - γ arasındaki ilişki

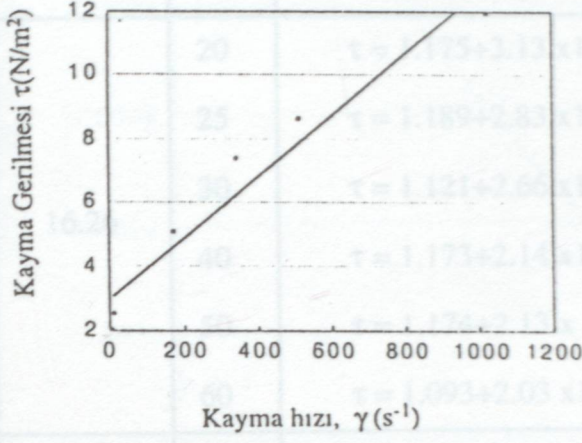


Şekil 4.48. (75.2 g/l) Çamur konsantrasyonunda ve 30 °C'de τ - γ arasındaki ilişki

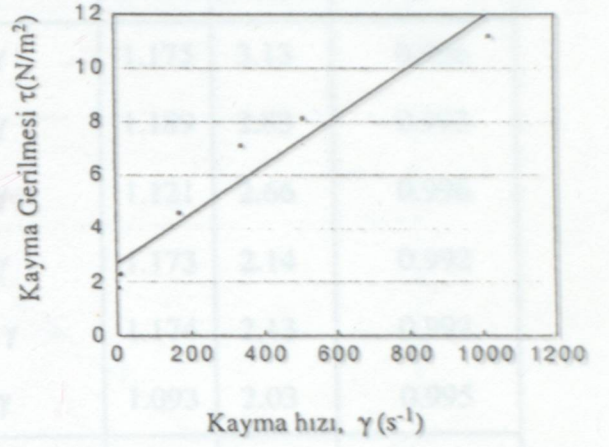


Şekil 4.49. (75.2 g/l) Çamur konsantrasyonunda ve 40 °C'de τ - γ arasındaki ilişki

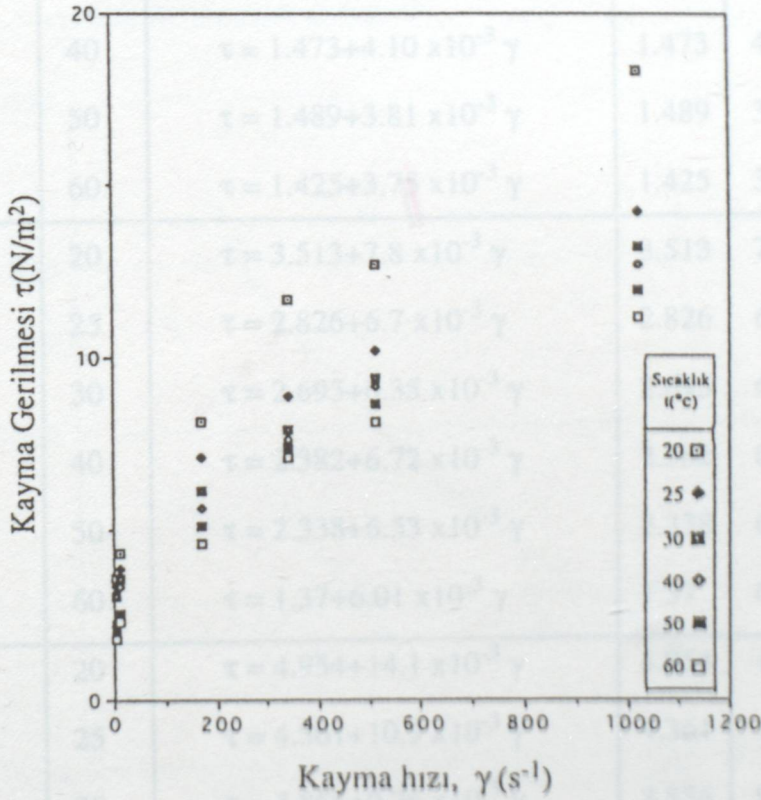
Tablo 4.3 20 °C - 60 °C arasıda kayma gerilimi - kayma hızı reolojik modelleri sabit konsantrasyon için



Şekil 4.50. (75.2g/l) Çamur konsantrasyonunda ve 50 °C'de τ - γ arasındaki ilişki



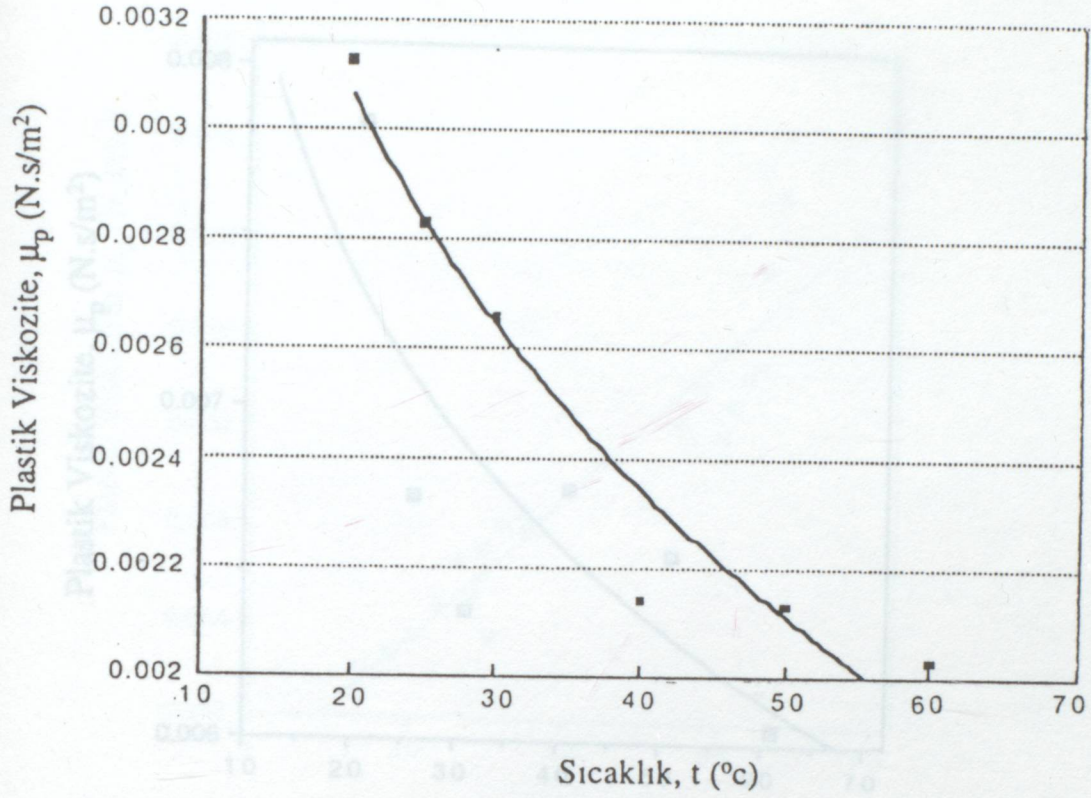
Şekil 4.51. (75.2g/l) Çamur konsantrasyonunda ve 60 °C'de τ - γ arasındaki ilişki



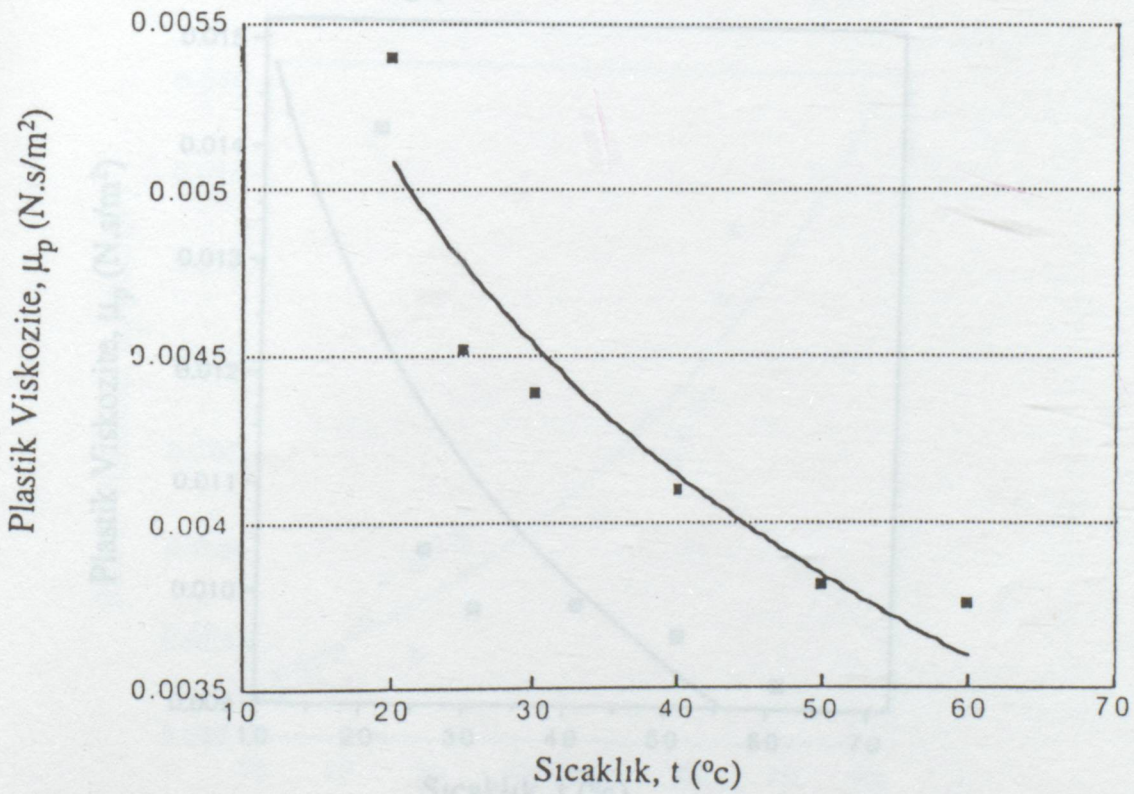
Şekil 4.52. (75.2g/l) Sabit çamur konsantrasyonunda 20, 25, 30, 40, 50 ve 60 °C'de τ - γ arasındaki ilişki

Tablo 4.3 20 °C - 60 °C arasında kayma gerilmesi - kayma hızı reolojik modelleri sabit konsantrasyon için

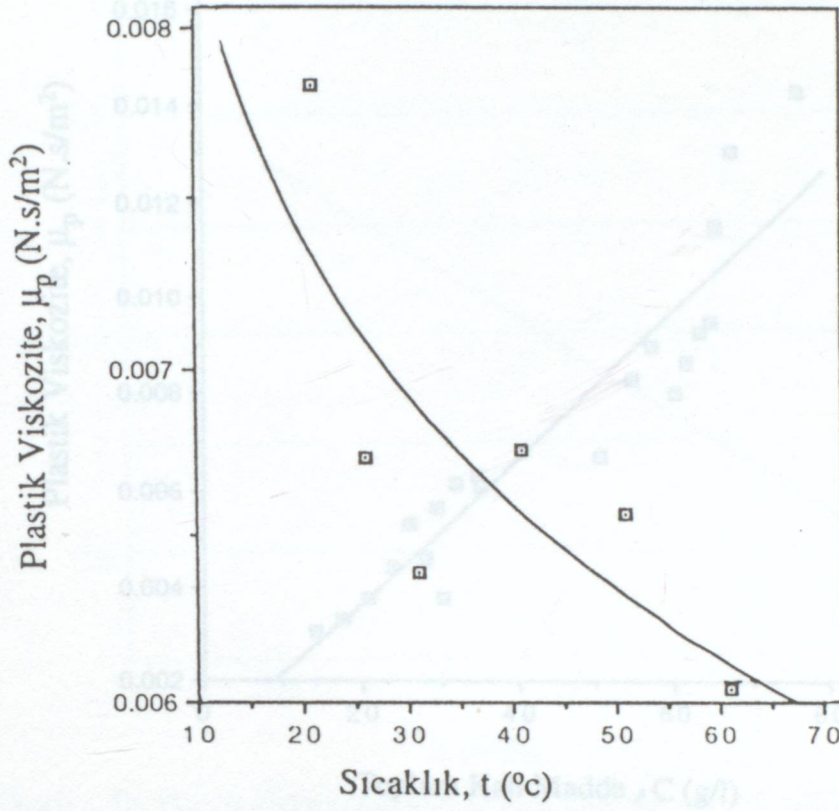
konsantrasyon C(g/l)	Sıcaklık t(°C)	Aritma çamurunun reolojik modeli	τ_y (N/m ²)	$\mu_p \times 10^{-3}$ (N.s/m ²)	Regrasyon katsayısı R
16.26	20	$\tau = 1.175 + 3.13 \times 10^{-3} \gamma$	1.175	3.13	0.996
	25	$\tau = 1.189 + 2.83 \times 10^{-3} \gamma$	1.189	2.83	0.993
	30	$\tau = 1.121 + 2.66 \times 10^{-3} \gamma$	1.121	2.66	0.996
	40	$\tau = 1.173 + 2.14 \times 10^{-3} \gamma$	1.173	2.14	0.992
	50	$\tau = 1.174 + 2.13 \times 10^{-3} \gamma$	1.174	2.13	0.992
	60	$\tau = 1.093 + 2.03 \times 10^{-3} \gamma$	1.093	2.03	0.995
28.13	20	$\tau = 2.036 + 5.4 \times 10^{-3} \gamma$	2.036	5.4	0.994
	25	$\tau = 1.629 + 4.52 \times 10^{-3} \gamma$	1.629	4.52	0.992
	30	$\tau = 1.503 + 4.39 \times 10^{-3} \gamma$	1.503	4.39	0.993
	40	$\tau = 1.473 + 4.10 \times 10^{-3} \gamma$	1.473	4.10	0.995
	50	$\tau = 1.489 + 3.81 \times 10^{-3} \gamma$	1.489	3.81	0.992
	60	$\tau = 1.425 + 3.75 \times 10^{-3} \gamma$	1.425	3.75	0.98
58.79	20	$\tau = 3.513 + 7.8 \times 10^{-3} \gamma$	3.513	7.8	0.995
	25	$\tau = 2.826 + 6.7 \times 10^{-3} \gamma$	2.826	6.7	0.990
	30	$\tau = 2.695 + 6.35 \times 10^{-3} \gamma$	2.695	6.35	0.991
	40	$\tau = 2.382 + 6.72 \times 10^{-3} \gamma$	2.382	6.72	0.982
	50	$\tau = 2.338 + 6.53 \times 10^{-3} \gamma$	2.338	6.53	0.986
	60	$\tau = 1.37 + 6.01 \times 10^{-3} \gamma$	1.37	6.01	0.985
75.2	20	$\tau = 4.954 + 14.1 \times 10^{-3} \gamma$	4.954	1.41	0.972
	25	$\tau = 4.361 + 10.3 \times 10^{-3} \gamma$	4.361	1.03	0.973
	30	$\tau = 3.856 + 9.76 \times 10^{-3} \gamma$	3.856	9.76	0.983
	40	$\tau = 3.414 + 9.82 \times 10^{-3} \gamma$	3.414	9.82	0.976
	50	$\tau = 2.985 + 9.59 \times 10^{-3} \gamma$	2.985	9.59	0.971
	60	$\tau = 2.719 + 9.12 \times 10^{-3} \gamma$	2.719	9.12	0.966



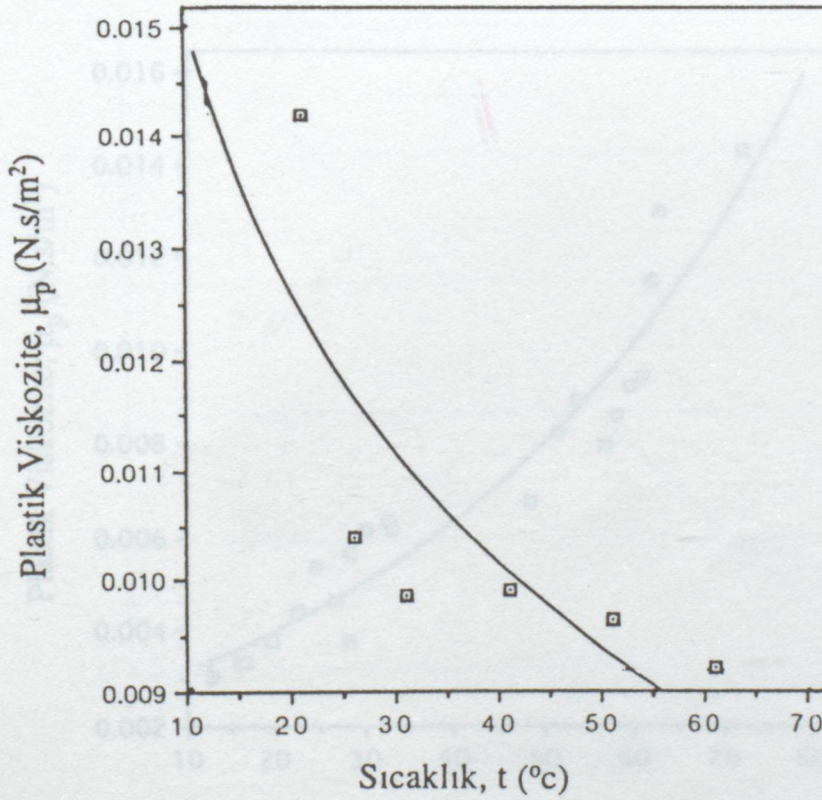
Şekil 4.53. (16.26 g/l) toplam katı madde konsantrasyonlu arıtma çamuru için plastik viskozite ile sıcaklık değişimi.



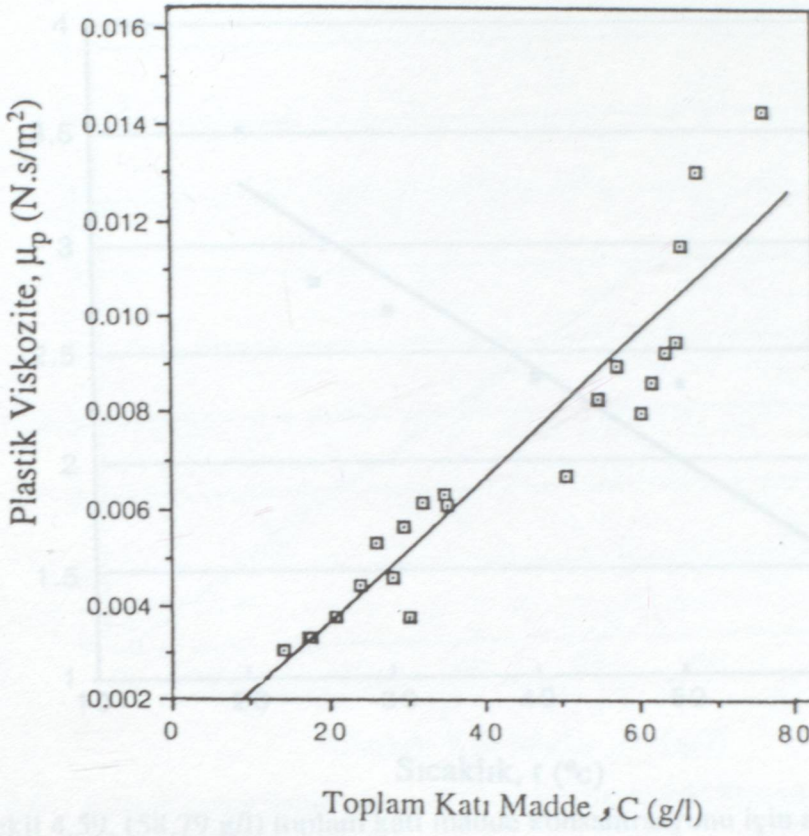
Şekil 4.54. (28.13 g/l) toplam katı madde konsantrasyonlu arıtma çamuru için plastik viskozite ile sıcaklık değişimi.



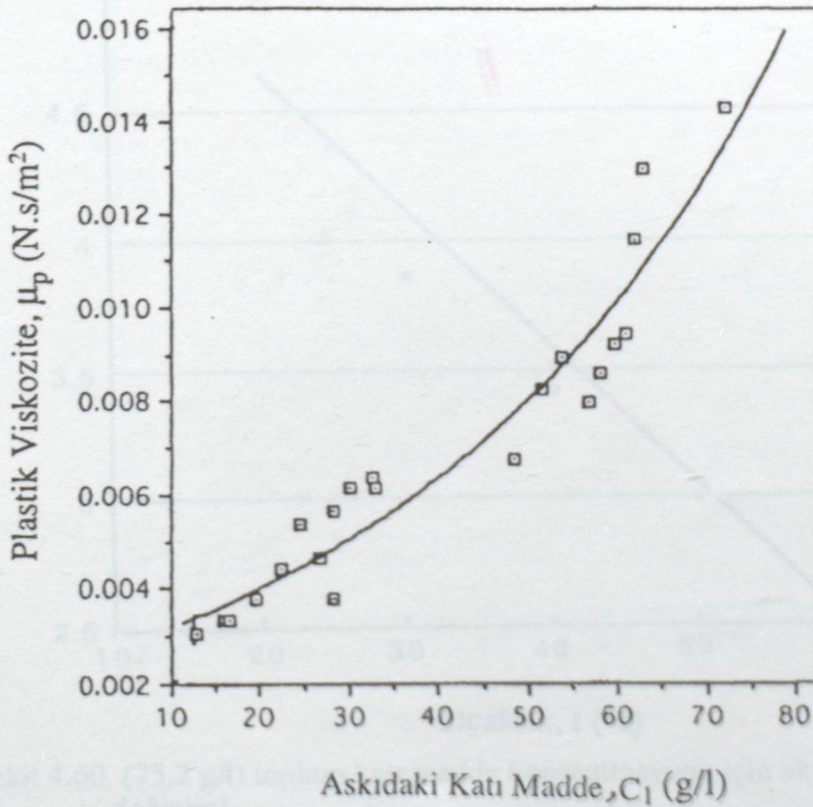
Şeli 4.55. (58.79 g/l) toplam katı konsantrasyonlu arıtma çamuru için plastik viskozite ile sıcaklık değişimi.



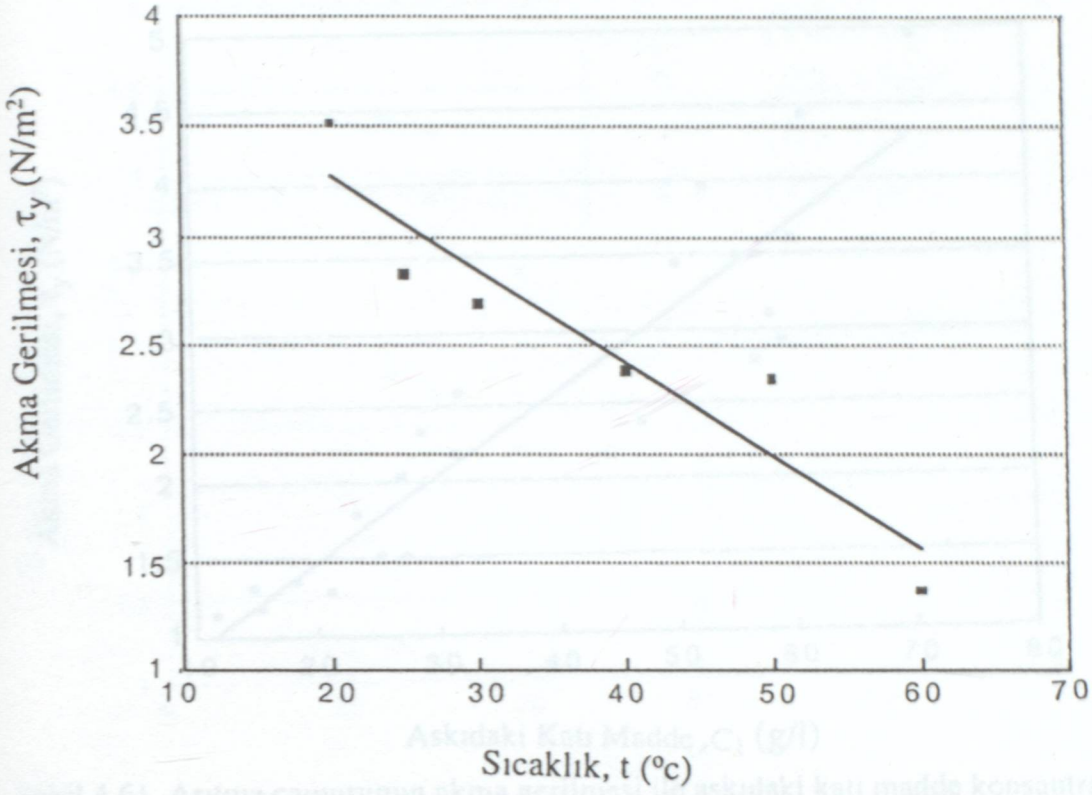
Şekil 4.56. (75.2 g/l) toplam katı konsantrasyonlu arıtma çamuru için plastik viskozite ile sıcaklık değişimi.



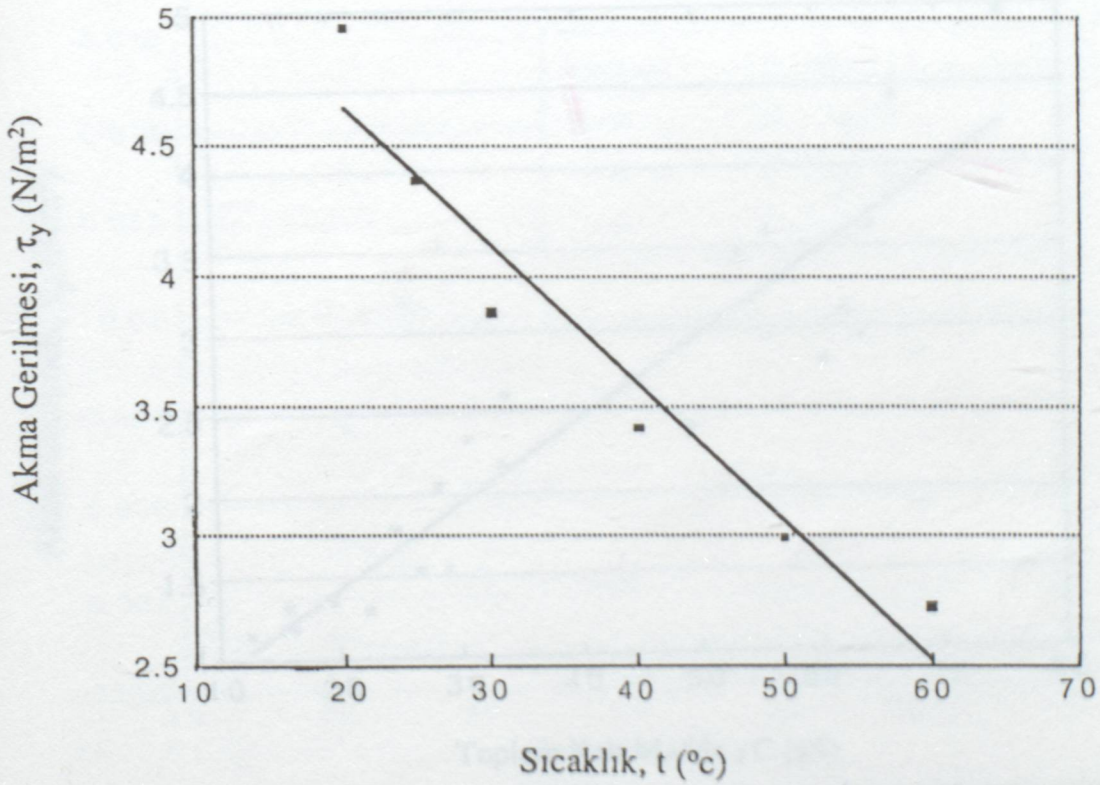
Şekil 4.57. Plastik viskozite ile toplam katı madde konsantrasyonu arasındaki ilişkiyi gösteren grafik.



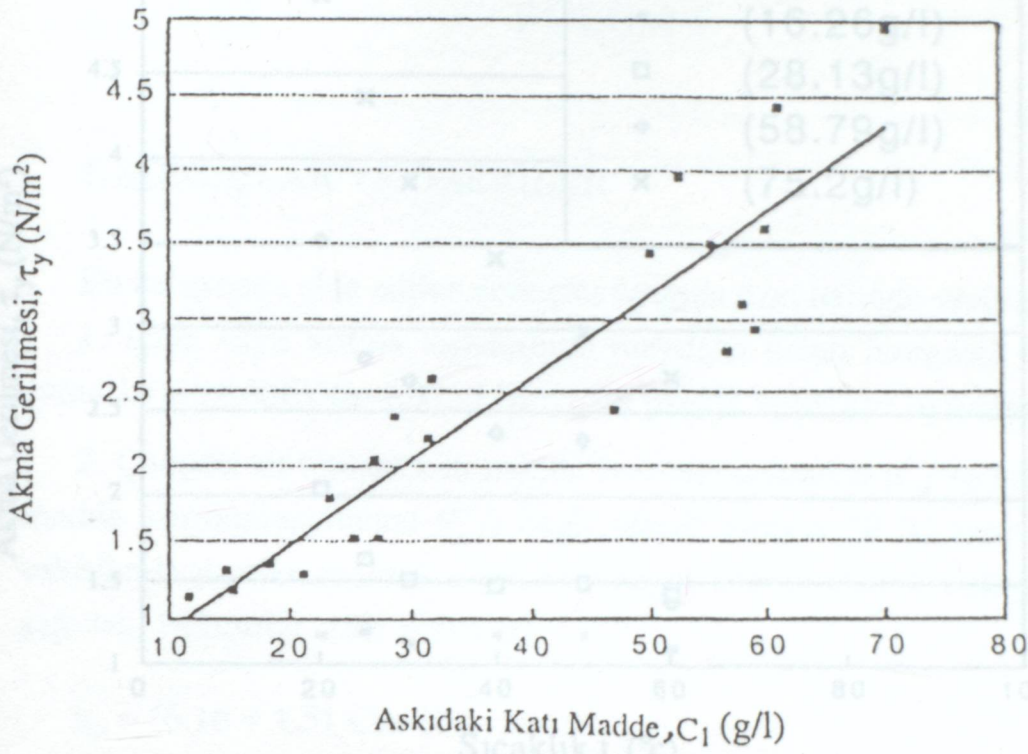
Şekil 4.58 Plastik viskozite ile askıdaki katı madde konsantrasyonu arasındaki ilişkiyi gösteren grafik.



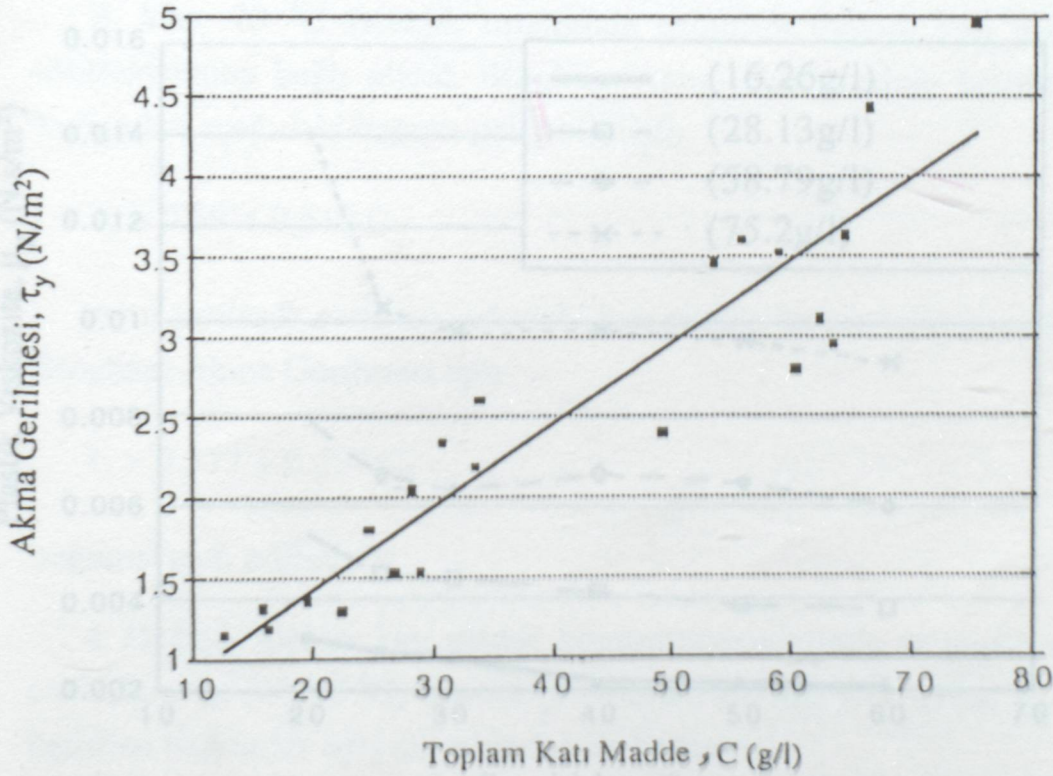
Şekil 4.59. (58.79 g/l) toplam katı madde konsantrasyonu için akma gerilmesi ile sıcaklık değişimi.



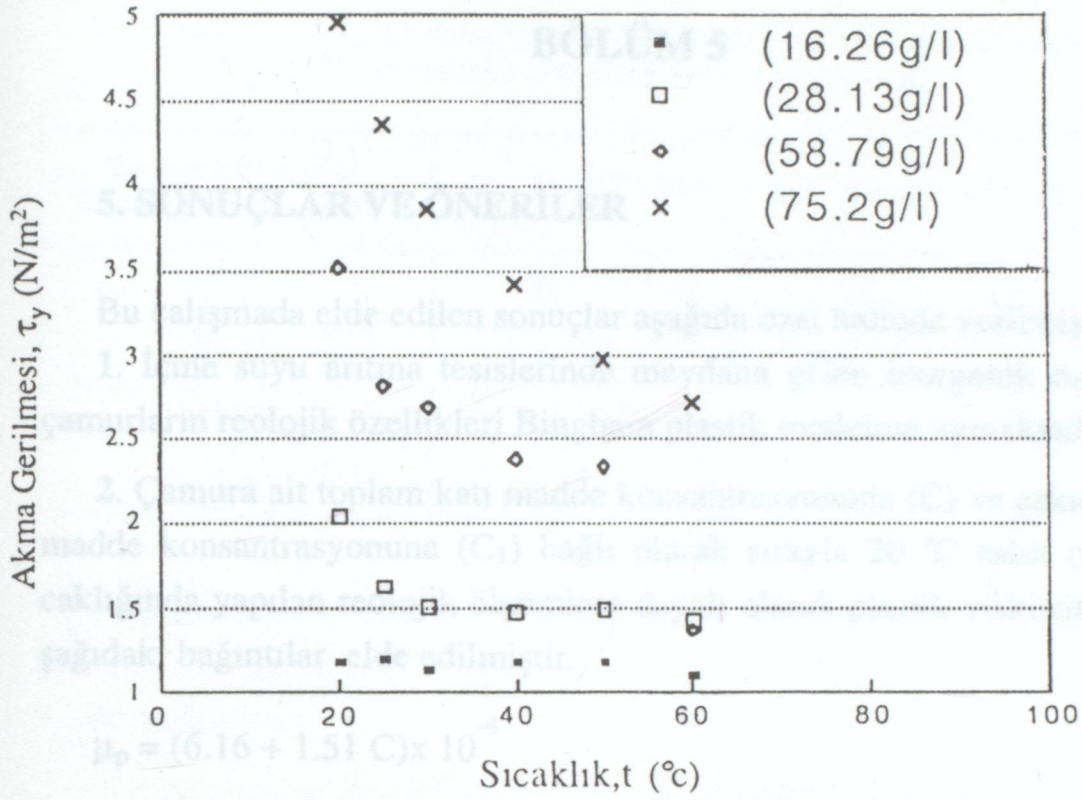
Şekil 4.60. (75.2 g/l) toplam katı madde konsantrasyonu için akma gerilmesi ile sıcaklık değişimi.



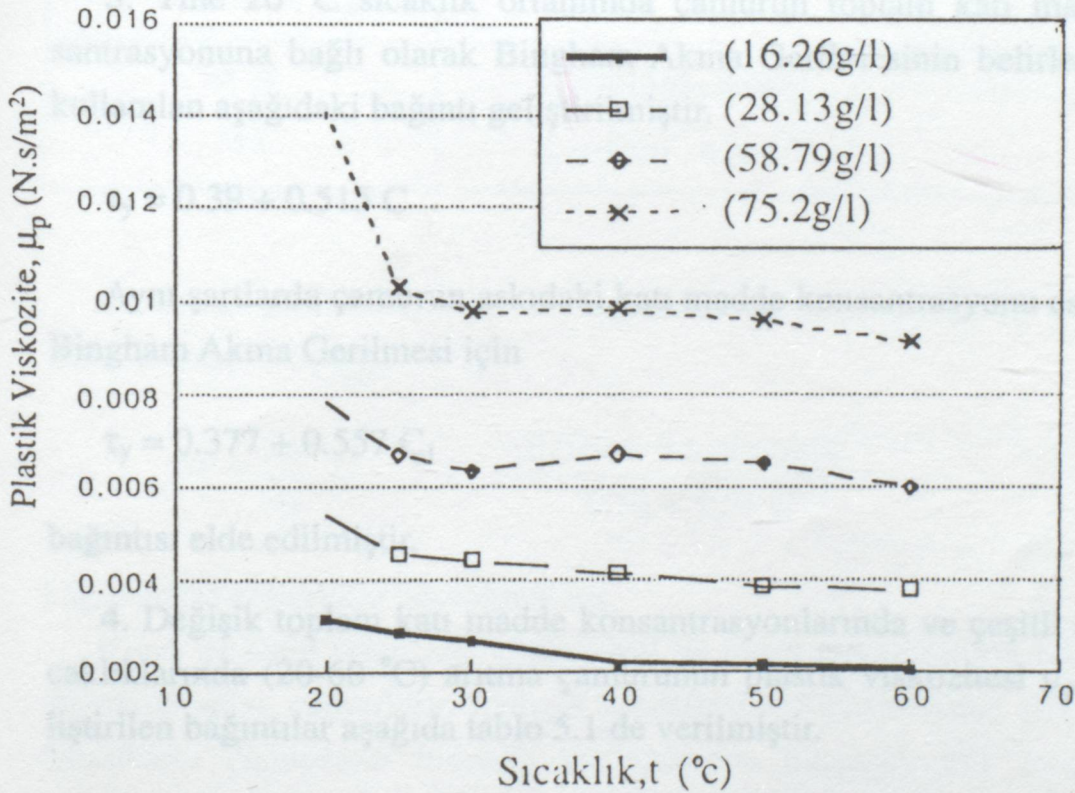
Şekil 4.61. Arıtma çamurunun akma gerilmesi ile askıdaki katı madde konsantrasyonu ilişkisi gösteren grafik.



Şekil 4.62. Arıtma çamurunun akma gerilmesi ile toplam katı madde konsantrasyonu arasındaki ilişkiyi gösteren grafik.



Şekil 4.63. Değişik toplam katı madde konsantrasyonları için arıtma çamurunun akma gerilmesi ile sıcaklık değişimi.



Şekil 4.64. Değişik toplam katı madde konsantrasyonları için arıtma çamurunun plastik viskozite ile sıcaklık değişimi.

BÖLÜM 5

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özet halinde verilmiştir.

1. İçme suyu arıtma tesislerinde meydana gelen inorganik özellikteki çamurların reolojik özellikleri Bingham plastik modeline uymaktadır.

2. Çamura ait toplam katı madde konsantrasyonuna (C) ve askıdaki katı madde konsantrasyonuna (C₁) bağlı olarak sırayla 20 °C sabit ortam sıcaklığında yapılan reolojik ölçümlere dayalı olarak plastik viskozite için aşağıdaki bağıntılar elde edilmiştir.

$$\mu_p = (6.16 + 1.51 C) \times 10^{-4}$$

$$\mu_p = 2.4 \times 10^{-3} \times 10^{0.01 C_1}$$

3. Yine 20 °C sıcaklık ortamında çamurun toplam katı madde konsantrasyonuna bağlı olarak Bingham Akma Gerilmesinin belirlenmesinde kullanılan aşağıdaki bağıntı geliştirilmiştir.

$$\tau_y = 0.39 + 0.515 C$$

Aynı şartlarda çamurun askıdaki katı madde konsantrasyonu esas olarak Bingham Akma Gerilmesi için

$$\tau_y = 0.377 + 0.557 C_1$$

bağıntısı elde edilmiştir.

4. Değişik toplam katı madde konsantrasyonlarında ve çeşitli ortam sıcaklıklarında (20-60 °C) arıtma çamurunun plastik viskozitesi μ_p için geliştirilen bağıntılar aşağıda tablo 5.1 de verilmiştir.

Tablo 5.1. Değişik konsantrasyonlar için çamurun plastik viskozitesi ile (t) sıcaklık arasında geliştirilen bağıntılar.

Toplam katı madde konsantrasyonu, C(g/l)	Plastik Viskozite İçin Geliştirilen Bağıntılar
16.26	$\mu_p = 0.00618 - 0.0024 \log t$
28.13	$\mu_p = 0.0092 - 0.0031 \log t$
58.79	$\mu_p = 0.011 - 0.0026 \log t$
75.2	$\mu_p = 0.022 - 0.0078 \log t$

5. Çamura ait geliştirilen Bingham Akma Gerilmesi modeli değişik ortam sıcaklıkları ve çeşitli toplam katı madde konsantrasyonları için tablo 5.2 de verilmiştir.

Tablo 5.2 Değişik konsantrasyonlar için çamurun akma gerilmesi ile (t) sıcaklık arasında geliştirilen bağıntılar.

Toplam katı madde konsantrasyonu, C(g/l)	Plastik Viskozite İçin Geliştirilen Bağıntılar
58.79	$\tau_y = 4.1315 - 0.043 t$
75.2	$\tau_y = 5.707 - 0.053 t$

6. Arıtma çamurunun hidrolik taşınmasında meydana gelen Yük Kaybı veya Basınç Düşüşü

$$\Delta P = \frac{Re}{He} \cdot f \cdot L \cdot V \cdot \rho \cdot \frac{(0.039 + 0.515 C) \times 10^4}{6.16 + 1.51 C}$$

bağıntısıyla kolaylıkla hesaplanabilir.

Konu ile ilgili öneri ise, endüstriyel ve evsel atıksu arıtma tesislerinde meydana gelen çamurların reolojik modelleri geliştirilmelidir. Böylece her özellikteki çamurların hidrolik taşınmasında oluşacak yük kayıplarının gerçekçi bir şekilde hesaplanması mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Allen, E., 1989 Nonhomogeneous sedimentation in viskolastic fluids, *Journal of Rheology*, 33(4): 627-638
2. API Bulletin 13 D, 1985. Bulletin on the rheology of oil-well drilling fluids, Second edition, My 15, Washington.
3. API Specification 10 (SEPC 10), 1990. Fifth Edition, July, Specification for materials and testing for well cements.
4. Aral, N. 1984. Arıtma çamuru yoğunlaştırıcılarının boyutlandırılması üzerine bir araştırma, Doktora Tezi, İTÜ İnşaat Fakültesi. Y.Ü. Matbaası.
5. Bannister, C. E., 1980. Rheological evulation of cement slurries-methods and models, SPE 9284, P. O. Box 833836, Richardson, Texas.
6. Batchelor, G.K., and Green, J.T., 1972. *Journal of Fluid Mechanics*, 56(3): 401.
7. Batchelor, G.K., 1977. *Journal of Fluid*, 83(1): 97.
8. Beenakker, C.W.J. 1984. 128 A:48.
9. Bennette, C.O., and Mayer, J.E., 1974. Introduction to fluid behoviuor, Momentum, Heat and Mass Transfer, Second edition, Mc Graw Hill. Inc, P: 15-27.
10. Bird, R. B., and Steward, W.E., 1960. Transport Phenomena, Wiley, Copyright John Wiley & Sons Inc. New York, chp 1: 3-26
11. Cheng, D.C., 1984. Further observations on the rheological behaviour of dense suspension. *Powder Technology*, 37: 255-273.
12. Dick, R.I., and Ewing, B.B., 1967. The rheology of activated sludge, *Journal WPCF*, vol. 39 (4): 543-560.
13. Eilers, H., 1943. *Kolloid-Z*, 102:154.
14. Einstein, A., 1956. in *Investigations the Theory af the Brownian Movement*, R. Furth, ed., Dover New York.
15. Fredrickson, A. G., 1964. Principles and Applications of Rheology, (Prentice-Hall, Englewood cliffs): 1-5, 194.
16. Fujiyama, M., 1990., *Journal of Applied Polymer Sience*, vol 40:67-88.
17. Gleible, W., and Windhab, E., 1985, The Twin capillary, a simple device to separete shear and slip flow of fluids, *Exp Fluids*, 3:177-180.
18. Hanks, R. W., 1963, The laminar-turbulent transition for fluids with a yield stress, *AIChE J*, 9:306.

19. Hedstrom, B.O.A., 1952. Flow of plastic materials in pipes, Ind. Eng. Chem. 44:651-656.

20. Keller, D.S., 1991. the effect of particle size distribution on the antithixotropic and shear thickening properties of cool-water dispersion. Journal of Rheology, 35(1): 113-133.

21 Mannheim, R.J., 1983. Effect of slip on flow properties of cement slurries, oil Gas Journal. December: 144-147.

22 Mannheim, R.J., 1991. Laminar and turbulent flow of cement slurries in large diameter pipe., Journal of Rheology 35 (1): 113-133

23. Mooney, M., 1931. Explicit formulas for slip and fluidity, Journal of Rheology (2):210.

24. Muslu, Y., 1985. Su Temini ve Çevre Sağlığı, Cilt III, İTÜ Matbaası, İstanbul: 124-128.

25. Pal, R., and Rhodes, E., 1989. Viscosity/Concentration relations for emulsion, Journal of Rheology, 33(7): 1021-1045.

26. Park, J.T., Mannheim, R.J., and Grimley, W.T.A., 1989. Pipe flow measurement of transparent non-Newtonian slurry, Journal of Fluid engineering 111:331-336.

27. Reiner, M., 1960. Deformation, Strain and Flow. New York.

28. Rogers, W.F., 1963. Composition and Properties of Oil Well Drilling Fluids, Gulf Publ. Co. Houston, Texas: 271-333

29. Roscoe, Br., 1952. Journal of Applied Physics (3): 267

30. Soğukoğlu, M., 1982. Kolaylıkla şekil değiştirebilen partiküller varlığının Newtonsel akışkan reolojik davranışına olan etkisinin incelenmesi ve açıklığa kavuşturulması, L.T.Ü. Doktora Tezi, İstanbul.

31. Sherman, P., 1983. in Encyclopedia of Emulsion technology, P. Becher, Ed., Marcel Dekker, Inc. New York: 415-420.

32. Takahashi, H., Matsuoka, T., and Kurauchi, T., 1985. Rheology of Polymer melts in high shear rate. Journal of Applied polymer science, vol (30): 4669-4684.

33. Van Der Werff, J.C., and De Kruif, C.G., Hard-sphere colloidal dispersion, Journal of Rheology, 33(3): 421-454.

34. Woskoboienko, F., Siemon, R. and Creasy, D.E., 1989. The Rheology of victorian brown coal slurries., Fuel, January: 120-124

EK1

DEĞİŞİK KONSANTRASYONLAR VE SICAKLIKLAR İÇİN ARITMA ÇAMURUNUN ÖLÇÜLEN VE HESAPLANAN REOLOJİK ÖZELLİKLERİ

Table E.1. (12.64 g/l) Konsantrasyonda arıtma çamurunun
hesaplanan reolojik özellikleri (20 °C).

Reolojik Parametreler	Dönme hızı, N (devir/dak)					
	3	6	100	200	300	600
θ_N	2	2.5	3.5	4	5	8
$\gamma(\kappa^{-1})$	5.1	10.21	170.3	340.6	510.9	1021.8
$\tau(N/m^2)$	1.02	1.27	1.78	2.04	2.54	4.08
$\mu_a(N.s/m^2)$	0.2	0.125	0.0105	0.006	0.005	0.004
$\mu_p(N.s/m^2)$	0.2	EKLER				
$\tau_y(N/m^2)$	0					

Table E.2. (15.8 g/l) Konsantrasyonda arıtma çamurunun
hesaplanan reolojik özellikleri (20 °C)

Reolojik Parametreler	Dönme hızı, N (devir/dak)					
	3	6	100	200	300	600
θ_N	2.5	3	3.5	4.5	5.5	9
$\gamma(\kappa^{-1})$	5.1	10.21	170.3	340.6	510.9	1021.8
$\tau(N/m^2)$	1.27	1.53	1.78	2.29	2.59	4.58
$\mu_a(N.s/m^2)$	0.25	0.15	0.0105	0.00675	0.0055	0.0045
$\mu_p(N.s/m^2)$	0.25	0.05	0.00159	0.003	0.003	0.0035
$\tau_y(N/m^2)$	0	0.96	1.425	1.2	1.2	0.9



EK1

DEĞİŞİK KONSANTRASYONLAR VE SICAKLIKLAR İÇİN ARITMA ÇAMURUNUN ÖLÇÜLEN VE HESAPLANAN REOLOJİK ÖZELLİKLERİ

Tablo E.1. (12.64 g/l) Konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20 °C).

Reolojik Parametreler	Dönme hızı, N (devir/dak)					
	3	6	100	200	300	600
θ_N	2	2.5	3.5	4	5	8
γ (s ⁻¹)	5.1	10.21	170.3	340.6	510.9	1021.8
τ (N/m ²)	1.02	1.27	1.78	2.04	2.54	4.08
μ_a (N.s/m ²)	0.2	0.125	0.0105	0.006	0.005	0.004
μ_p (N.s/m ²)	0.2	0.05	0.00319	0.0015	0.003	0.003
τ_y (N/m ²)	0	0.72	1.17	1.44	0.96	0.96

Tablo E.2. (15.8 g/l) Konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20 °C)

Reolojik Parametreler	Dönme hızı, N (devir/dak).					
	3	6	100	200	300	600
θ_N	2.5	3	3.5	4.5	5.5	9
γ (s ⁻¹)	5.1	10.21	170.3	340.6	510.9	1021.8
τ (N/m ²)	1.27	1.53	1.78	2.29	2.80	4.58
μ_a (N.s/m ²)	0.25	0.15	0.0105	0.00675	0.0055	0.0045
μ_p (N.s/m ²)	0.25	0.05	0.00159	0.003	0.003	0.0035
τ_y (N/m ²)	0	0.96	1.425	1.2	1.2	0.96

Tablo E.3. (16.26 g/l) Konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20 °C)

Reolojik Parametreler	Dönme hızı, N (devir/dak).					
	3	6	100	200	300	600
θ_N	2	2.5	3.5	4.5	5.5	8.5
γ (s ⁻¹)	5.1	10.21	170.3	340.6	510.9	1021.8
τ (N/m ²)	1.02	1.27	1.78	2.29	2.8	4.33
μ_a (N.s/m ²)	0.2	0.125	0.0105	0.00675	0.0055	0.00424
μ_p (N.s/m ²)	0.2	0.05	0.00319	0.003	0.003	0.003
τ_y (N/m ²)	0	0.72	1.17	1.2	1.2	1.2

Tablo E.4. (19.45 g/l) Konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20 °C).

Reolojik Parametreler	Dönme hızı, N (devir/dak)					
	3	6	100	200	300	600
θ_N	2.5	3	4	5	6	10
γ (s ⁻¹)	5.1	10.21	170.3	340.6	510.9	1021.8
τ (N/m ²)	1.27	1.53	2.04	2.54	3.05	5.09
μ_a (N.s/m ²)	0.25	0.15	0.012	0.0075	0.006	0.005
μ_p (N.s/m ²)	0.25	0.05	0.00319	0.003	0.003	0.004
τ_y (N/m ²)	0	0.96	1.41	1.44	1.44	0.96



Tablo E.5. (22.3 g/l) Konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20 °C).

Reolojik Parametreler	Dönme hızı, N (devir/dak)					
	3	6	100	200	300	600
θ_N	2	2.25	4.5	5.5	7.5	10.5
γ (s ⁻¹)	5.1	10.21	170.3	340.6	510.9	1021.8
τ (N/m ²)	1.02	1.15	2.29	2.79	3.82	5.34
μ_a (N.s/m ²)	0.2	0.1125	0.0135	0.00825	0.0075	0.00525
μ_p (N.s/m ²)	0.2	0.025	0.00717	0.003	0.006	0.003
τ_y (N/m ²)	0	0.84	1.01	1.68	0.72	1.68

Tablo E.6. (24.65 g/l) Konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20 °C).

Reolojik Parametreler	Dönme hızı, N (devir/dak)					
	3	6	100	200	300	600
θ_N	2.5	3.5	5.5	7.5	10	13
γ (s ⁻¹)	5.1	10.21	170.3	340.6	510.9	1021.8
τ (N/m ²)	1.27	1.78	2.78	3.84	5.09	6.62
μ_a (N.s/m ²)	0.25	0.175	0.0165	0.0113	0.01	0.0065
μ_p (N.s/m ²)	0.25	0.1	0.00638	0.006	0.0075	0.003
τ_y (N/m ²)	0	0.72	1.62	1.68	1.2	3.36

Tablo E.7. (26.64 g/l) Konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20 °C).

Reolojik Parametreler	Dönme hızı, N (devir/dak)					
	3	6	100	200	300	600
θ_N	2	3	4.5	6.5	8.7	11
γ (s ⁻¹)	5.1	10.21	170.3	340.6	510.9	1021.8
τ (N/m ²)	1.02	1.53	2.29	3.31	4.43	5.59
μ_a (N.s/m ²)	0.2	0.15	0.0135	0.00975	0.0087	0.0055
μ_p (N.s/m ²)	0.2	0.1	0.00478	0.003	0.0066	0.0023
τ_y (N/m ²)	0	0.48	1.39	2.16	1	3.07

Tablo E.8. (28.13 g/l) Konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20 °C).

Reolojik Parametreler	Dönme hızı, N (devir/dak)					
	3	6	100	200	300	600
θ_N	3.5	4	6	8	10	14.5
γ (s ⁻¹)	5.1	10.21	170.3	340.6	510.9	1021.8
τ (N/m ²)	1.78	2.04	3.05	4.08	5.09	7.39
μ_a (N.s/m ²)	0.35	0.2	0.018	0.012	0.01	0.00725
μ_p (N.s/m ²)	0.35	0.05	0.00638	0.006	0.006	0.0045
τ_y (N/m ²)	0	1.44	1.86	1.92	1.92	2.64



Tablo E.9. (28.88 g/l) Konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20 °C).

Reolojik Parametreler	Dönme hızı, N (devir/dak)					
	3	6	100	200	300	600
θ_N	2.5	3	4	5.5	8	9.5
γ (s ⁻¹)	5.1	10.21	170.3	340.6	510.9	1021.8
τ (N/m ²)	1.27	1.53	2.04	2.79	4.07	4.83
μ_a (N.s/m ²)	0.25	0.15	0.012	0.00825	0.00799	0.0047
μ_p (N.s/m ²)	0.15	0.05	0.00319	0.0045	0.0075	0.0035
τ_y (N/m ²)	0.48	0.96	1.41	1.2	0.24	0.96

Tablo E.10. (30.66 g/l) Konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20 °C).

Reolojik Parametreler	Dönme hızı, N (devir/dak)					
	3	6	100	200	300	600
θ_N	3.5	4	7.5	9	12	15.5
γ (s ⁻¹)	5.1	10.21	170.3	340.6	510.9	1021.8
τ (N/m ²)	1.78	2.04	3.82	4.58	6.11	7.89
μ_a (N.s/m ²)	0.35	0.2	0.0225	0.0135	0.012	0.00775
μ_p (N.s/m ²)	0.35	0.05	0.01116	0.0045	0.009	0.0035
τ_y (N/m ²)	0	1.44	1.81	2.88	1.44	4.08

Tablo E.11. (33.45 g/l) Konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20 °C).

Reolojik Parametreler	Dönme hızı, N (devir/dak)					
	3	6	100	200	300	600
θ_N	3	3.5	7.5	9	11.5	15.5
$\gamma (s^{-1})$	5.1	10.21	170.3	340.6	510.9	1021.8
$\tau (N/m^2)$	1.53	1.78	3.84	4.8	5.86	7.92
$\mu_a (N.s/m^2)$	0.3	0.175	0.0225	0.0135	0.0115	0.00775
$\mu_p (N.s/m^2)$	0.3	0.05	0.01276	0.0045	0.0075	0.004
$\tau_y (N/m^2)$	0	2.5	3.24	6	4	7.5

Tablo E.12. (33.81 g/l) Konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20 °C).

Reolojik Parametreler	Dönme hızı, N (devir/dak)					
	3	6	100	200	300	600
θ_N	4	5	7.5	9.5	12.5	16
$\gamma (s^{-1})$	5.1	10.21	170.3	340.6	510.9	1021.8
$\tau (N/m^2)$	2.04	2.54	3.82	4.83	6.36	8.16
$\mu_a (N.s/m^2)$	0.4	0.2	0.0225	0.01425	0.0125	0.008
$\mu_p (N.s/m^2)$	0.4	0.1	0.00795	0.006	0.009	0.0035
$\tau_y (N/m^2)$	0	1.44	2.32	2.64	1.68	4.32

Tablo E.13. (49.12 g/l) Konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20 °C).

Reolojik Parametreler	Dönme hızı, N (devir/dak)					
	3	6	100	200	300	600
θ_N	3.5	4	8	10.5	11.5	17
$\gamma (s^{-1})$	5.1	10.21	170.3	340.6	510.9	1021.8
$\tau (N/m^2)$	1.78	2.04	4.07	5.34	5.85	8.65
$\mu_a (N.s/m^2)$	0.35	0.2	0.024	0.01575	0.0115	0.0085
$\mu_p (N.s/m^2)$	0.35	0.05	0.01276	0.0045	0.003	0.0055
$\tau_y (N/m^2)$	0	1.44	1.79	3.36	4.08	2.88

Tablo E.14. (53.31 g/l) Konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20 °C).

Reolojik Parametreler	Dönme hızı, N (devir/dak)					
	3	6	100	200	300	600
θ_N	6	7	9	12.5	17	19
$\gamma (s^{-1})$	5.1	10.21	170.3	340.6	510.9	1021.8
$\tau (N/m^2)$	3.05	3.56	4.58	6.36	8.65	11.19
$\mu_a (N.s/m^2)$	0.6	0.35	0.027	0.01875	0.017	0.011
$\mu_p (N.s/m^2)$	0.6	0.1	0.00638	0.0105	0.0135	0.005
$\tau_y (N/m^2)$	0	2.4	3.29	2.64	1.68	4.8



Tablo E.15. (55.63 g/l) Konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20 °C).

Reolojik Parametreler	Dönme hızı, N (devir/dak)					
	3	6	100	200	300	600
θ_N	6	7.5	11	15	18	24
γ (s ⁻¹)	5.1	10.21	170.3	340.6	510.9	1021.8
τ (N/m ²)	3.05	3.82	5.82	7.63	9.16	12.21
μ_a (N.s/m ²)	0.6	0.375	0.033	0.0225	0.018	0.012
μ_p (N.s/m ²)	0.6	0.15	0.01116	0.012	0.009	0.006
τ_y (N/m ²)	0	2.16	3.42	3.36	4.32	7.2

Tablo E.16. (58.79 g/l) Konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20 °C).

Reolojik Parametreler	Dönme hızı, N (devir/dak)					
	3	6	100	200	300	600
θ_N	4.5	6	9.5	15	18	20
γ (s ⁻¹)	5.1	10.21	170.3	340.6	510.9	1021.8
τ (N/m ²)	2.29	3.05	4.83	7.63	9.16	10.18
μ_a (N.s/m ²)	0.45	0.3	0.0285	0.0225	0.018	0.01
μ_p (N.s/m ²)	0.45	0.15	0.1116	0.0165	0.009	0.008
τ_y (N/m ²)	0	1.44	2.77	1.92	4.32	1.92

Tablo E.17. (60.36 g/l) Konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20 °C).

Reolojik Parametreler	Dönme hızı, N (devir/dak)					
	3	6	100	200	300	600
θ_N	4	4.5	9.5	12.5	15.5	21
$\gamma (s^{-1})$	5.1	10.21	170.3	340.6	510.9	1021.8
$\tau (N/m^2)$	2.04	2.29	4.83	6.36	7.89	10.68
$\mu_a (N.s/m^2)$	0.4	0.225	0.0285	0.01875	0.0155	0.0105
$\mu_p (N.s/m^2)$	0.4	0.15	0.01595	0.009	0.009	0.0055
$\tau_y (N/m^2)$	0	0.72	2.01	3.12	3.12	4.8

Tablo E.18. (62.2 g/l) Konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20 °C).

Reolojik Parametreler	Dönme hızı, N (devir/dak)					
	3	6	100	200	300	600
θ_N	4	5	10.5	14.5	16.5	22.5
$\gamma (s^{-1})$	5.1	10.21	170.3	340.6	510.9	1021.8
$\tau (N/m^2)$	2.04	2.54	5.34	7.38	8.39	11.45
$\mu_a (N.s/m^2)$	0.4	0.25	0.0315	0.02175	0.0165	0.01125
$\mu_p (N.s/m^2)$	0.4	0.1	0.01755	0.012	0.0075	0.006
$\tau_y (N/m^2)$	0	1.44	2.23	3.12	4.32	5.04

Tablo E.19. (63.4 g/l) Konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20 °C).

Reolojik Parametreler	Dönme hızı, N (devir/dak)					
	3	6	100	200	300	600
θ_N	4	5	10	14	16	23
$\gamma (s^{-1})$	5.1	10.21	170.3	340.6	510.9	1021.8
$\tau (N/m^2)$	2.04	2.54	5.09	7.12	8.14	11.70
$\mu_a (N.s/m^2)$	0.4	0.25	0.03	0.021	0.016	0.0115
$\mu_p (N.s/m^2)$	0.4	0.1	0.01595	0.012	0.012	0.007
$\tau_y (N/m^2)$	0	1.44	2.25	2.88	1.92	4.32

Tablo E.20. (64.26 g/l) Konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20 °C).

Reolojik Parametreler	Dönme hızı, N (devir/dak)					
	3	6	100	200	300	600
θ_N	4.5	5.5	13.5	17.5	19.5	28
$\gamma (s^{-1})$	5.1	10.21	170.3	340.6	510.9	1021.8
$\tau (N/m^2)$	2.29	2.79	6.87	8.90	9.92	14.25
$\mu_a (N.s/m^2)$	0.45	0.275	0.0405	0.0262	0.0195	0.014
$\mu_p (N.s/m^2)$	0.45	0.1	0.0255	0.012	0.006	0.0085
$\tau_y (N/m^2)$	0	1.68	2.4	4.56	6.48	5.28

Tablo E.21. (6649 g/l) Konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20 °C).

Reolojik Parametreler	Dönme hızı, N (devir/dak)					
	3	6	100	200	300	600
θ_N	6	7	14.5	21	23.5	32
γ (s ⁻¹)	5.1	10.21	170.3	340.6	510.9	1021.8
τ (N/m ²)	3.05	3.56	7.38	10.68	11.96	16.28
μ_a (N.s/m ²)	0.6	0.35	0.0435	0.0315	0.0235	0.016
μ_p (N.s/m ²)	0.6	0.1	0.0239	0.0195	0.0075	0.0085
τ_y (N/m ²)	0	2.4	3.13	3.84	7.68	7.2

Tablo E.22. (75.2 g/l) Konsantrasyonlu arıtma çamurunun hesaplanan reolojik özellikleri (20 °C).

Reolojik Parametreler	Dönme hızı, N (devir/dak)					
	3	6	100	200	300	600
θ_N	7	8.5	16	23	25	36
γ (s ⁻¹)	5.1	10.21	170.3	340.6	510.9	1021.8
τ (N/m ²)	3.56	4.32	8.14	11.7	12.72	18.32
μ_a (N.s/m ²)	0.7	0.425	0.048	0.0345	0.025	0.018
μ_p (N.s/m ²)	0.7	0.15	0.0239	0.021	0.006	0.011
τ_y (N/m ²)	0	2.64	3.85	4.32	9.12	6.72

Tablo E. 23 Kayma gerilmesi - kayma hızı değerleri değişik sıcaklıklarda ve 16.26 g/l konsantrasyonlu çamur için.

kayma hızı, $\gamma(s^{-1})$	Kayma gerilmesi, $\tau(N/m^2)$					
	20°C	25°C	30°C	40°C	50°C	60°C
5.1	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
10.21	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.17
170.3	1.78	1.78	1.53	1.53	1.53	1.53
340.6	2.29	2.29	2.03	2.03	2.03	1.78
510.9	2.8	2.54	2.54	2.29	2.29	2.04
1021.8	4.33	4.07	3.82	3.31	3.3	3.2

Tablo E. 24 Kayma gerilmesi - kayma hızı değerleri değişik sıcaklıklarda ve 28.13 g/l konsantrasyonlu çamur için.

kayma hızı, $\gamma(s^{-1})$	Kayma gerilmesi, $\tau(N/m^2)$					
	20°C	25°C	30°C	40°C	50°C	60°C
5.1	1.78	1.27	1.27	1.27	1.27	1.02
10.21	2.04	1.78	1.53	1.53	1.53	1.53
170.3	3.05	2.54	2.29	2.29	2.29	2.29
340.6	4.08	3.31	3.31	3.05	3.05	2.8
510.9	5.09	4.07	3.82	5.56	3.31	3.56
1021.8	7.39	6.11	5.85	5.6	5.34	5.09



Tablo E. 25 Kayma gerilmesi - kayma hızı değerleri değişik sıcaklıklarda ve 58.79 g/l konsantrasyonlu çamur için.

kayma hızı, $\gamma(\text{s}^{-1})$	Kayma gerilmesi, $\tau(\text{N/m}^2)$					
	20°C	25°C	30°C	40°C	50°C	60°C
5.1	2.29	2.29	2.29	1.78	1.78	1.02
10.21	3.05	3.05	2.8	2.29	2.29	1.27
170.3	4.83	4.07	3.82	3.82	3.82	2.54
340.6	7.63	5.34	5.09	5.09	4.83	3.56
510.9	9.16	6.61	6.36	6.36	6.11	5.09
1021.8	10.18	9.41	8.9	8.8	8.65	7.12

Tablo E. 26 Kayma gerilmesi - kayma hızı değerleri değişik sıcaklıklarda ve 75.2 g/l konsantrasyonlu çamur için.

kayma hızı, $\gamma(\text{s}^{-1})$	Kayma gerilmesi, $\tau(\text{N/m}^2)$					
	20°C	25°C	30°C	40°C	50°C	60°C
5.1	3.56	3.31	3.05	2.29	2.04	1.78
10.21	4.32	3.82	3.56	3.31	2.54	2.29
170.3	8.14	7.12	6.11	5.6	5.09	4.58
340.6	11.7	8.9	7.89	7.63	7.38	7.12
510.9	12.72	9.18	9.41	9.16	8.65	8.14
1021.8	18.32	14.25	13.23	12.72	11.96	11.19

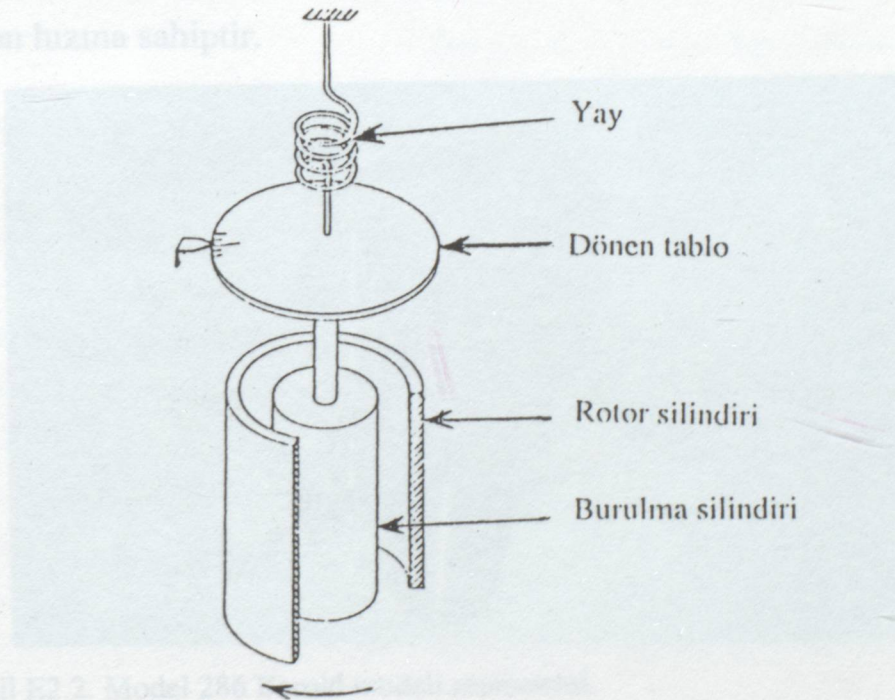


EK 2

ÇAMUR REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİ ÖLÇEN VİSKOMETRELER

E2.1. FANN Viskometresi

Viskozite ölçmekte kullanılan birçok alet geliştirilmiştir. Fakat özellikle FANN-viskometresi çamur viskozitesini ölçmek üzere yapılmıştır. bunların en yaygın olarak kullanılan şekil E 2.1 de şematik olarak görülmektedir.



Şekil E2.1. Fann viskometresinin şematik olarak görünüşü

E2.3. Couette Viskometresi

Şekil E2.1. Fann viskometresinin şematik olarak görünüşü

Bir rotasyon viskometresi olan Fann viskometresinin ana kısımları, motor, hız değiştirici ve rotasyon silindiri ile bunun içine yerleştirilmiş burulma (torsiyon) silindiridir. Viskozitesi ölçülerek çamur silindirik özel

bir kaba konulur, rotasyon ve torsiyon silindiri iyice çamur içine dalıncaya kadar yukarıya kaldırıp tesbit edilir. Motor aracılığı ile rotasyon silindiri döndürülür. Dönme hareketi, çamur aracılığı ile burulma (torsiyon) silindirine iletilir. Bunun ucuna gösterge bağlıdır ve göstergeden θ_N dönme değeri okunur. Rotasyon silindiri 3, 6, 100, 200, 300, 600, gibi 6 değişik hız ile dönebilir. görünür ve plastik viskozitelerin saptanması için bu hızlar gereklidir.

E2.2. Model 286 Baroid Reometresi

Baroid reometresi gerçek Coutte tipidir, konsantrik rotasyonel silindirli bir viskometredir. Tek veya birçok viskoziteyi bir arada tayin etmek için kullanılmaktadır. Boriod reometresi, Fann viskometresi gibi 6 değişik rotasyon hızına sahiptir.



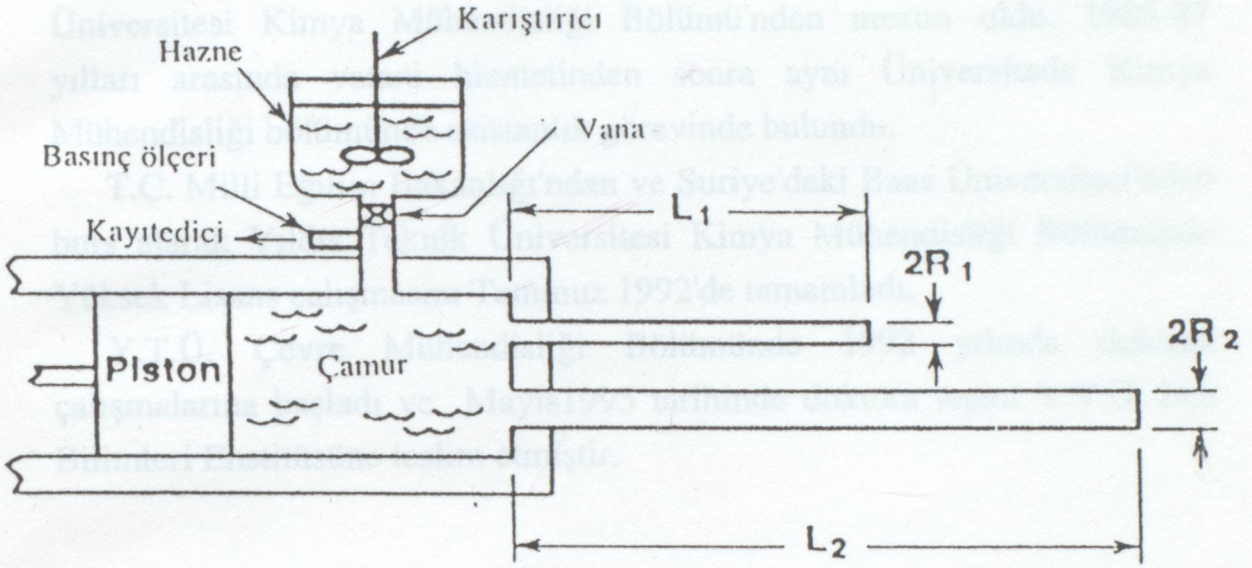
Şekil E2.2. Model 286 Baroid modeli reometresi.

E2.3. Coutte Viskometresi

Coutte viskometresi chan 35 tipinde genelde sondaj çamuru ve çimento çamuru için kullanılır. Dış silindirin (rotasyon) standart yarı çapı 18.43 mm dir. 12 değişik rotasyon hız için dönmektedir. Bu viskometre için Tork iç silindir ve sabit burulma (torsiyon) yarı çapı için ölçülür. Çamurun reolojik ölçümleri konsantrik silindir viskometresinde kayma aralığı (torsiyon ve rotasyon arasında mesafe mm cinsinden) değişmesiyle kayma hızı ölçülmektedir. (Mannheimer, 1991).

E2.4. Çiftli Tüp Viskometre

Şekil E2-3 te çiftli tüp viskometre görülmektedir.



Şekil E2-3 Çiftli tüp viskometre

Çiftli tüp viskometresi şekil E2-3'te şematik olarak gösterilmektedir. Bu viskometre ile reolojik ölçümler iki değişik tüple ($R_1 < R_2$) bulunması mümkündür (Gleibel and Windhab, 1985). İstenen çamurun reolojik özellikleri aynı kayma uygulanması ile iki değişik kayma aralığı için ölçülebilmektedir. Tüplerin boyutları $(L/R)_1 = (L/R)_2$ olarak seçilmiştir ve tüplerin ikisi hazneye bağlandıkları için aynı basınç kaybı altındadır. Ayrıca kinetik enerji ve giriş etkileri ihmal edilmesi ile $(\tau w)_1 = (\tau w)_2$ olur ve Newton kayma hızında $(4U/R)$ herhangi bir değişiklik tüplerin etkisi için duvar sürtünmesi hesabına yardım etmektedir (Fredrickson, 1964).



ÖZGEÇMİŞ

1958 yılında Suriye'nin Homs şehrinde dünyaya geldi. 1984'te Baas Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 1985-87 yılları arasında vatani hizmetinden sonra aynı Üniversitede Kimya Mühendisliği bölümünde asistanlık görevinde bulundu.

T.C. Milli Eğitim Bakanlığı'ndan ve Suriye'deki Baas Üniversitesi'nden burs alarak Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans çalışmasını Temmuz 1992'de tamamladı.

Y.T.Ü. Çevre Mühendisliği Bölümünde 1992 yılında doktora çalışmalarına başladı ve Mayıs 1995 tarihinde doktora tezini Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsüne teslim etmiştir.



