

**ANAEROBİK BATIK MEMBRAN
BİOREAKTÖRLERDE ÇAMUR REOLOJİSİNİN
İNCELENMESİ
Seda ÇELİK**

Yüksek Lisans Tezi

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Yusuf SAATÇI

TEMMUZ-2013

**T.C
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ANAEROBİK BATIK MEMBRAN BİOREAKTÖRLERDE ÇAMUR
REOLOJİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Seda ÇELİK

092112104

Anabilim Dalı: Çevre Mühendisliği

Programı: Çevre Bilimleri

Danışman: Doç. Dr. Yusuf SAATÇI

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 07 Haziran 2013

TEMMUZ-2013

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ANAEROBİK BATIK MEMBRAN BİOREAKTÖRLERDE ÇAMUR
REOLOJİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Seda ÇELİK

092112104

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07.06.2013
Tezin Savunulduğu Tarih : 04.07.2013**

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Yusuf SAATÇI (F.Ü)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ayhan ÜNLÜ (F.Ü)
Doç. Dr. M. Şaban TANYIDIZI (F.Ü)

TEMMUZ – 2013

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmalarında gösterdiği destek ve yardımlarından dolayı değerli hocam Sn. Doç. Dr. Yusuf SAATÇI' ya teşekkürlerimi sunarım.

110Y043 Nolu proje ile bu çalışmaya desteklerinden dolayı TÜBİTAK' a ve proje ekibine teşekkür ederim.

Çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Sn. Yrd. Doç.Dr. Özge HANAY ve Sn. Arş. Gör. Dr. M. Sara TUNÇ'a teşekkür ederim.

Çalışmalarımı destekleyen ve bugüne gelmemde büyük pay sahibi olan aileme teşekkür ederim. Tez çalışmam sırasında desteğini esirgemeyen ve her daim yanımda olan eşime teşekkür ederim. Yüksek lisans tezimi, ileride kaynak olarak kullanabilmesi ve daha başarılı çalışmalar gerçekleştirmesi dileğiyle oğluma atfederim.

Seda ÇELİK
ELAĞIĞ-2013

ÖZET

Sıvıların akış, katıların deformasyon özelliklerini tanımlayan reoloji, maddenin özelliklerinin belirlenmesinde büyük önem taşımaktadır. Reoloji kavramı, bize verilen problemin doğru formüle edilmesini sağlar. Bir reolojik çalışmada, ilk basamak reolojik verilerin toplanarak, sistemin hangi tip akış davranışı gösterdiğini belirlemektir. Elde edilen verilerin reolojik modellerden birine uyumu araştırılır.

Bu çalışmanın amacı, sabit kayma hızlarındaki çamur numunelerinin, zamana bağlı ölçümlerinin yapılması bu ölçümler sonucunda çamur numunelerinin nasıl bir reolojik davranış sergilediklerini belirlemektir.

Deneyler sonucunda, tavuk kesimhanesi ile sentetik atıksularından alınan çamur numunelerine uygulanan artan ve azalan kayma hızları neticesinde, her iki numunenin Newtonian olmayan bir akış özelliğine sahip oldukları anlaşılmıştır.

Belirlenen reolojik bulgulara uygulanan matematiksel modeller sonucunda, tüm numunelerde Herschel-Bulkley Modelinin en uygun olduğu saptanmıştır.

Reolojik modellerde tanımlanan ve numunelerin reolojik özelliklerini belirleyen viskozite (η), akma gerilimi (τ_0), akışkanlık katsayısı (K) ve akış davranış indeksi (n) ile çamurun katı madde içeriği arasındaki ilişkinin araştırılması sonucunda; numunenin katı madde konsantrasyonunun artmasıyla, akma gerilimi, akışkanlık katsayısı ve viskozite değerlerinde de artış olduğu, akış davranış indeksinde ise azalma olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Batık Anaerobik Membran Biyoreaktör, Çamur, Reoloji, Viskozite, Akma Gerilimi, Akışkanlık Katsayısı, Reolojik Modeller

SUMMARY

THE INVESTIGATION OF SLUDGE RHOLOGY IN SUBMERGED ANAEROBIC MEMBRANE BIOREACTORS

Rheology describes flow aspects of fluids, and deformation aspects of solids, it bears great importance in determining characteristics of substance. The concept rheology provides the correct formulation of the given problem. The first stage rheology data is gathered in a rheological study, and it determines which type of flow behavior has been displayed in the system. The harmony of the rheology models of the data which was derived will be researched later.

The purpose of this study is to evaluate the temporal assessment of the stable slip velocity of the mud samples taken from the ingrown anaerobic membrane bioreactors (SAnMBRs), fed with synthetic sewage and sewage of poultry slaughterhouses. At the end of the operations, the rheological attitudes of mud samples were determined.

As a result of the experiments, considering an increase and decrease slip velocity applied on mud samples obtained from the poultry slaughterhouse and anaerobic sewage, it has been considered that both samples have a Newtonian flow.

As a result of mathematical models applied on the determined rheology findings, it was determined that the Herschel- Bulkley Model fitted for all the samples.

As a result of researching the relation between viscosity (η), flow stress (τ_0), coefficient of fluidity (K), and flow behavior index (n) which were described in rheology models and determined the rheological characteristics of the samples, and the solid matter content of mud; the increase in the solid matter concentration of the sample, an increase occurred in the flow stress, coefficient of fluidity, and viscosity values, a reduce in the flow behavior index was assessed.

Key words: Submerged Anaerobic Membrane Bioreactor, Sludge, Rheology, Viscosity, Flow Stress, Coefficient of Fluidity, Rheological Models.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	I
ÖZET	II
SUMMARY	III
İÇİNDEKİLER	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ	VIII
SEMBOLLER LİSTESİ	IX
KISALTMALAR LİSTESİ	X
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1. Anaerobik Arıtım	4
2.2. Membran Biyoreaktör Sistemi	4
2.3. Atıksuların Arıtımında Anaerobik Membran Biyoreaktörler	5
2.4. Reolojik Terimler	6
2.4.1. Kayma Gerilmesi	6
2.4.2. Kayma Hızı	8
2.4.3. Akma Gerilimi	8
2.4.4. Çamur Viskozitesi	9
2.4.5. Newtonian Sıvılar	9
2.4.6. Newtonian Olmayan Sıvılar	11
2.5. Literatür Özeti	14
3. MATERYAL VE METOT	17
3.1. Anaerobik Batık Membran Biyoreaktör (SAnMBR) Sistemi	17
3.2. Yapılan Analizler ve Analiz Yöntemleri	19
3.2.1. Toplam Katı Madde (TKM)	19
3.2.2. Toplam Uçucu Katı Madde (TUKM)	19
3.2.3. Toplam Askıda Katı Madde (TAKM)	20
3.3. Sentetik Atıksularla Yapılan Çalışmalar	20
3.4. Tavuk Kesimhanesi Atıksuları İle Yapılan Çalışmalar	21
3.5. Reolojik Çalışmalar	22

3.5.1.	Viskozimetre.....	22
3.5.2.	Reolojik Ölçümler.....	23
4.	BULGULAR ve TARTIŞMA	25
4.1.	SAnMBR Sisteminde Çamur Numunelerinin Karakterizasyon Testleri	25
4.1.1.	Kayma Hızına Bağlı Viskozite Değerleri.....	25
4.2.	Reogramlar ve Model Uygunlukları	31
4.2.1.	Reolojik Ölçümlerde Kullanılan Modeller.....	31
4.2.1.1.	Ostwald De Vaele (Power Law) Modeli	31
4.2.1.2.	Casson Modeli	37
4.2.1.3.	Bingham Modeli	42
4.2.1.4.	Herschel-Bulkley Modeli	48
4.2.1.5.	NCA/CMA Casson Modeli	53
5.	SONUÇLAR.....	59
	KAYNAKLAR	61
	ÖZGEÇMİŞ	66

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1.	Basma, çekme ve kayma kuvvetleri).....	6
Şekil 2.2.	Farklı materyaller için kayma gerilmesi ile kayma oranı arasındaki ilişki	7
Şekil 2.3.	Viskozitenin temel tanımının şematik gösterimi	8
Şekil 2.4.	Newtonian davranışa ait; akış eğrisi (a), viskozite eğrisi (b).....	10
Şekil 2.5.	Kayma gerilmesi ile zaman arasındaki ilişki	13
Şekil 3.1.	SAnMBR Sisteminin En Kesit Şekli.....	17
Şekil 4.1.	N1 çamur numunelerinin kayma hızı-viskozite değişimi.....	26
Şekil 4.2.	N2 çamur numunelerinin kayma hızı-viskozite değişimi.....	26
Şekil 4.3.	N3 çamur numunelerinin kayma hızı-viskozite değişimi.....	27
Şekil 4.4.	N4 çamur numunelerinin kayma hızı-viskozite değişimi.....	28
Şekil 4.5.	NT1 çamur numunelerinin kayma hızı-viskozite değişimi	28
Şekil 4.6.	NT2 çamur numunelerinin kayma hızı-viskozite değişimi	29
Şekil 4.7.	NT3 çamur numunelerinin kayma hızı-viskozite değişimi	30
Şekil 4.8.	NT4 çamur numunelerinin kayma hızı-viskozite değişimi	30
Şekil 4.9.	Şematik Reogramlar	31
Şekil 4.10.	N1 çamur numunesinin Ostwald De Vaele (Power Law) modeline göre reogramı	32
Şekil 4.11.	N2 çamur numunesinin Ostwald De Vaele (Power Law) modeline göre reogramı	33
Şekil 4.12.	N3 çamur numunesinin Ostwald De Vaele (Power Law) modeline göre reogramı	33
Şekil 4.13.	N4 çamur numunesinin Ostwald De Vaele (Power Law) modeline göre reogramı	34
Şekil 4.14.	NT1 çamur numunesinin Ostwald De Vaele (Power Law) modeline göre reogramı.....	34
Şekil 4.15.	NT2 çamur numunesinin Ostwald De Vaele (Power Law) modeline göre reogramı.....	35
Şekil 4.16.	NT3 çamur numunesinin Ostwald De Vaele (Power Law) modeline göre reogramı.....	35
Şekil 4.17.	NT4 çamur numunesinin Ostwald De Vaele (Power Law) modeline göre reogramı.....	36
Şekil 4.18.	N1 çamur numunesinin Casson Modeline göre reogramı	38
Şekil 4.19.	N2 çamur numunesinin Casson Modeline göre reogramı	38
Şekil 4.20.	N3 çamur numunesinin Casson Modeline göre reogramı	39
Şekil 4.21.	N4 çamur numunesinin Casson Modeline göre reogramı	39
Şekil 4.22.	NT1 çamur numunesinin Casson Modeline göre reogramı.....	40
Şekil 4.23.	NT2 çamur numunesinin Casson Modeline göre reogramı.....	40
Şekil 4.24.	NT3 çamur numunesinin Casson Modeline göre reogramı.....	41

Şekil 4.25.	NT4 çamur numunesinin Casson Modeline göre reogramı.....	41
Şekil 4.26.	N1 çamur numunesinin Bingham Modeline göre reogramı.....	43
Şekil 4.27.	N2 çamur numunesinin Bingham Modeline göre reogramı.....	44
Şekil 4.28.	N3 çamur numunesinin Bingham Modeline göre reogramı.....	44
Şekil 4.29.	N4 çamur numunesinin Bingham Modeline göre reogramı.....	45
Şekil 4.30.	NT1 çamur numunesinin Bingham Modeline göre reogramı.....	45
Şekil 4.31.	NT2 çamur numunesinin Bingham Modeline göre reogramı.....	46
Şekil 4.32.	NT3 çamur numunesinin Bingham Modeline göre reogramı.....	46
Şekil 4.33.	NT4 çamur numunesinin Bingham Modeline göre reogramı.....	47
Şekil 4.34.	N1 çamur numunesinin Herschel Bulkey Modeline göre reogramı.....	48
Şekil 4.35.	N2 çamur numunesinin Herschel Bulkey Modeline göre reogramı.....	49
Şekil 4.36.	N3 çamur numunesinin Herschel Bulkey Modeline göre reogramı.....	49
Şekil 4.37.	N4 çamur numunesinin Herschel Bulkey Modeline göre reogramı.....	50
Şekil 4.38.	NT1 çamur numunesinin Herschel Bulkey Modeline göre reogramı.....	50
Şekil 4.39.	NT2 çamur numunesinin Herschel Bulkey Modeline göre reogramı.....	51
Şekil 4.40.	NT3 çamur numunesinin Herschel Bulkey Modeline göre reogramı.....	51
Şekil 4.41.	NT4 çamur numunesinin Herschel Bulkey Modeline göre reogramı.....	52
Şekil 4.42.	N1 çamur numunesinin NCA/CMA Casson Modeline göre reogramı.....	53
Şekil 4.43.	N2 çamur numunesinin NCA/CMA Casson Modeline göre reogramı.....	54
Şekil 4.44.	N3 çamur numunesinin NCA/CMA Casson Modeline göre reogramı.....	54
Şekil 4.45.	N4 çamur numunesinin NCA/CMA Casson Modeline göre reogramı.....	55
Şekil 4.46.	NT1 çamur numunesinin NCA/CMA Casson Modeline göre reogramı.....	55
Şekil 4.47.	NT2 çamur numunesinin NCA/CMA Casson Modeline göre reogramı.....	56
Şekil 4.48.	NT3 çamur numunesinin NCA/CMA Casson Modeline göre reogramı.....	56
Şekil 4.49.	NT4 çamur numunesinin NCA/CMA Casson Modeline göre reogramı.....	57

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1.	Sentetik atıksuyun kimyasal bileşimi	20
Tablo 3.2.	Sentetik atıksu ve aşı çamurunun özellikleri	21
Tablo 3.3.	Tavuk kesimhanesi atıksularının özellikleri	22
Tablo 4.1.	SAnMBR çamurundan alınan numunelerin karakterizasyonu.....	25
Tablo 4.2.	SAnMBR çamur numunelerinin Power Law Model parametreleri ve uygunlukları	36
Tablo 4.3.	SAnMBR alınan çamur numunelerinin Casson Model parametreleri ve uygunlukları	42
Tablo 4.4.	SAnMBR alınan çamur numunelerinin Bingham Model parametreleri ve uygunlukları	47
Tablo 4.5.	SAnMBR alınan çamur numunelerinin Herschel-Bulkley Model parametreleri ve uygunlukları.....	52
Tablo 4.6.	SAnMBR alınan çamur numunelerinin NCA/CMA Casson Model parametreleri ve uygunlukları	58

SEMBOLLER LİSTESİ

γ	: Kayma oranı
τ_0	: Başlangıç akma gerilimi
η	: Viskozite
τ	: Kayma gerilmesi
k	: Akışkanlık katsayısı
η_p	: Plastik Viskozite
A	: Kabul Oranı
R^2	: Regresyon Katsayıları
B	: 550 °C’ de yakmadan sonraki kroze ağırlığı
C	: Sabit tartımdaki boş kroze ağırlığı
D	: Buharlaştırma kalıntısı miktarı

KISALTMALAR LİSTESİ

CST	: Sıvıdaki Kılcal Emme
EPS	: Ekstrasellüler Polimer Maddeler
HRT	: Hidrolik Bekleme Süresi
KOI	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
MLSS	: Sıvıdaki Askıda Katı Madde
RPM	: Dakikadaki Dönüş Hızı
SCOD	: Suda Çözünmüş Kimyasal Oksijen İhtiyacı
SI	: Uluslararası Birim Sistemi
SRT	: Çamur Yaşı
TAKM	: Toplam Askıda Katı Madde
TKM	: Toplam Katı Madde
TN	: Toplam Azot
TP	: Toplam F
TUA	: Toplam Uçucu Asitler
TUKM	: Toplam Uçucu Katı madde
UASB	: Yukarı Akışlı Anaerobik Çamur Yatağı

1. GİRİŞ

Reoloji (Yunancadan gelen "rheos-akım" ve "logos-bilgi"); akım olaylarını kapsayan bir bilim dalıdır. Reoloji genellikle bir çamurun viskoz özellikleri şeklinde tarif edilebilir. Genel olarak katıların deformasyon ve sıvıların akış özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılır (Yılmaz, 2007; Kalkan, 2010).

Reoloji biliminin temelinde; bir akışkandaki kayma gerilmesi ile deplasman hızı arasındaki oransal ilişkiyi direkt olarak gösteren Newton yasası yatmaktadır. Fakat bu basit Newtonian ilişkisi çamurlar için geçerli olmamaktadır. Bu ilişkiyi şematik olarak gösteren diyagramlar "reogram" olarak isimlendirilir. Bir kanalizasyon çamurunun viskoz özelliği çoğu kez Newtonian yasasına uymamaktadır. Bu çamurlar ya pseudoplastik ya da Bingham reolojik modeller kullanılarak literatürde modellenmiştir. Çamura verilen kayma gerilmesiyle gösterdiği deplasman hızı arasındaki ilişki viskozimetreye ölçülüp bir reogramda gösterilir.

Aktif çamur değişen çevre şartları nedeniyle farklı boyutlara ve şekillere sahip floklardan oluşan bir biyolojik karışımdır. Bunun yanında çamurun akış özelliklerinin belirlenmesi için katı madde konsantrasyonu da önemli bir faktördür. Bu nedenle, çamurun akış (reolojik) özelliklerinin anlaşılması, pompa veya iletim sistemlerinin tasarlanması için önemli olduğu kadar, arıtma prosesinin kritik kontrol noktaları için de büyük önem taşımaktadır (Sanin, 2002). Aktif çamur, düşük katı madde konsantrasyonlarında reolojik özellik olarak su gibi Newtonian; yüksek katı madde konsantrasyonlarında ise Newtonian olmayan türde akış karakterine sahip olmaktadır (Sanin, 2002). Bu nedenle genel olarak aktif çamur, Newtonian olmayan bir plastik davranışı (Dick, 1986) veya pseudoplastik (yalancı plastik) davranışı göstermektedir (Moeller ve Torres, 1997; Kalkan, 2010). Çamurun reolojik özelliklerinden, mevcut arıtma tesislerinin geliştirilmesinde ve özellikle arıtma tesisinin çamur susuzlaştırma ve yoğunlaştırma ünitelerinin iyileştirilmesinde faydalanılmaktadır (Dentel ve diğ., 2000; Yen ve diğ., 2002).

Bingham plastik ve Herschel-Bulkley modellerindeki başlangıç akış gerginliğinin mevcudiyeti; yeterli gerilmenin katı fazın gerilme kuvvetini aştıktan sonraki deforme olan katı haldeki çamur direncinden dolayıdır. Bu olay yüksek katı fazlı çamurlarda benzer bir şekilde gelişir. Bir çamurdaki partiküllü yapıların dağılmasıyla birlikte akış gerginliği de azalmaya başlayacaktır, bu durum çamur şartlandırmada kullanılan kontrol metotları için

önemli bir konum arz eder. Akışkanın deplasman hızına karşı kayma gerilmesini ölçmek gerektiğinden, Non-Newtonian davranışlar çamurların reolojik karakterizasyonunda güçlüklerle sebep olur. Deplasman hızı direkt olarak belirlenememekte fakat bilinen bir hızla (toplam akış hızı ya da oransal bir hız gibi) ilişkilendirilir. Kayma gerilmesi basınç, kuvvet veya uygulanmış ya da ölçülmüş bir burulma momentiyle ilişkilendirilir. Reolojik karakterizasyonu ölçmedeki zorluklar genelde çoğu çamurun tioksotropik yapısı gereği ya da diğer bir ifadeyle zamana bağlı olarak reolojik tepkilerin bir sonucudur. Bu olay; esasen bu gibi süspansiyonların floklaşma eğiliminin bir sonucudur. Bu sebeple çamurun yaşı veya daha önceki geçirdiği evreler viskoziteyi belirlediğinden; yani yüksek viskozitede iyi floklaşma veya tersine düşük viskozitede dağılma gibi sonuçlardan dolayı reolojik davranışlarına etkisi önemli derecededir.

Reoloji kayma oranı ve zamanın bir fonksiyonu olarak süspansiyonların ve sıvıların viskoz davranışlarının bir göstergesidir. İlk kez Bingham tarafından ortaya atılmış ve 1929 yılında Amerikan Reoloji Birliği tarafından bu şekilde kabul edilmiştir. Boya, plastik, kauçuk, yağ ve asfalt gibi çok çeşitli malzemelerle, birbirinden çok farklı alanlarda reoloji çalışmaları yapılmaktadır. Günümüzde reoloji polimer reolojisi, biyoreoloji ve süspansiyon reolojisi gibi dallara ayrılmaktadır (Barnes ve diğ., 1989).

İster katı ister sıvı olsun her malzeme gerilme altında şekil değiştirir. Malzemelerin kendi ağırlığı da gerilme oluşturan bir unsurdur. Bu nedenle her malzeme dış yükleme olmasa da deformasyona uğrar. Fakat katı cisimler için kendi ağırlığından kaynaklanan deformasyon miktarı ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Bu olaya kanıt olarak tarihi binaların camları gösterilebilir. Asırlık bina camlarının alt ve üst kalınlıkları ölçüldüğünde camların alt kısımlarının üste göre daha kalın olduğu görülmüştür. Camlarda görülen akma olayı her cisim için farklı hızlarda gerçekleşmektedir. Şekil değişimi miktarı; cismin maruz kaldığı gerilmenin şiddetine, uygulama hız ve doğrultusuna, cismin yapıldığı malzemenin viskozitesine göre değişir. Viskozite cismin akmaya karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. Örneğin, bal suya kıyasla çok daha zor akar, diğer bir deyişle viskozitesi daha fazladır (Kalkan, 2010).

Reolojinin amacı, malzemelerin özellikleri arasındaki ilişkiyi anlamayı sağlamaktır. Reoloji kavramı, bize verilen problemin doğru formüle edilmesini sağlar. Reolojik davranışın iki uç örneği, Newtonian (tamamen viskoz) ve Hooken (tamamen elastik) malzemeleridir.

Reolojik ölçümlerde amaç, gerilim ve kayma hızı ve bazı durumlarda viskoelastisite arasındaki fonksiyonel ilişkiyi tayin etmektir. Newtonian akış gösteren sistemlerde hız gradyanı ile gerilim arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Bu nedenle, bu tip sistemlerin akış özelliğini ve viskozitesini tayin etmek için tek noktalı viskozimetreler kullanılmaktadır. Bu aletler tek kayma hızı ile çalışırlar. Akış eğrisi üzerinde tek bir nokta elde edilir, bu noktadan yapılan bir uzatma (ekstrapolasyon) ile tam bir akış eğrisi elde edilir.

Newtonian olmayan akış sistemlerinin viskozitesinin tek noktalı prensibe göre çalışan aletlerle ölçülmesi yanlış sonuçlar verir; ancak, değişik hız gradyanlarında çalışılarak ölçüm yapmak mümkün olabilir. Bu tip sistemlerin reogramı çok noktalı viskozimetreler kullanılarak çizilmelidir.

Viskozimetreler iki temel prensibe göre ölçüm yaparlar. Birincisi, tüp içindeki sıvının akışa karşı direncini ölçmek, ikincisi ise sıvının içindeki katı cismin hareketine gösterdiği direnci ölçmek. Reolojistlerin esas uğraşları; Newton Akışkanları ve Hooken elastikleri değil, her ikisine ait özelliklerin bir arada bulunduğu viskoelastik malzemelerdir (Kalkan, 2010).

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Anaerobik Arıtım

Havasız (anaerobik) çürütme, çamur stabilizasyonunda kullanılan en eski prosestir. Günümüzde atıksu arıtımından çıkan konsantre çamurların stabilizasyonun yanı sıra bazı endüstriyel atıksuların arıtımında da kullanılmaktadır. Havasız (anaerobik) arıtıma prosesleri, yüksek miktarda organik kirlilik içeren atıksuların arıtımında oldukça geniş kullanım alanı bulmuştur. Kuvvetli atıkların arıtımında havalı arıtıma proseslerine kıyasla çok daha ekonomik olduğu belirlenen havasız (anaerobik) arıtım prosesleri son yıllarda evsel atıksu arıtımında da kullanılmaktadır.

Havasız (anaerobik) arıtma prosesleri organik maddelerin oksijensiz ortamda biyokimyasal olarak ayrıştırılması esasına dayanmaktadır. Arıtma esnasında oluşan biyogaz yaklaşık olarak %65-85 metan ve %15-35 karbondioksit karışımından oluşmaktadır. Havasız (anaerobik) arıtma teknolojilerinin gelişimi 19. yüzyılın başlarına dayanmaktadır ve II. Dünya Savaşı sonrası enerji kaynaklarında yaşanan kriz nedeni ile hızlı bir gelişme yaşanmıştır (Alvarez, 2003).

Havasız (anaerobik) çamur çürütücüler standart-hızlı ve yüksek-hızlı olmak üzere iki ana grupta toplanabilir. Standart-hızlı olanlarda reaktörde karışma ve ısıtma yoktur. Hidrolik bekletme süresi 30-60 gün olup hidrolik bekletme süresi çamur yaşına eşit veya çok yakındır. Yüksek-hızlı havasız reaktörlerde ise karışım ve ısıtma yapılır. Hidrolik bekletme süreleri 20 günün altında tutulur. Kuvvetli organik atıkların anaerobik olarak arıtıldığı yüksek hızlı reaktörlerde ise 1 günden az hidrolik kalış sürelerinde bile yüksek verimlerle karbonlu organik madde giderimi sağlanabilmektedir

2.2. Membran Biyoreaktör Sistemi

Membran prosesleri 1960'lı yıllarda uygulanmaya başlanmış ve ilk olarak deniz suyunun demineralizasyonu için kullanılmıştır. Son 30 yılda membran teknolojilerinin gelişmesiyle bu prosesler deniz suyu arıtımı, içme suyu eldesi ve atıksu arıtımı gibi alanlarda uygulanmaya başlanmıştır (Kaleli, 2006).

MBR'da arıtma prosesi tek bir havuzda gerçekleştiği için sistem mekanik ve kontrol açısından konvansiyonel sistemlere göre daha kompleksir. Ancak %100 otomasyon sayesinde işletim kolaylaşır. İşletim sırasında zamanla membran gözenekleri tıkanır ve arıtılmış su çekimi (akı) azalır, bunu engellemek için belirli aralıklarda basınçlı hava/su (backpulse) ve kimyasallarla (sitrik asit, sodyum hipoklorit, gibi) gözenekler temizlenir (Judd, 2002).

Atıksuların ileri arıtılması amacıyla membran teknolojileri diğer arıtma proseslerine göre daha tercih edilmektedir. Bunun en önemli nedenleri, membran proseslerinin diğer ayırma teknikleriyle karşılaştırıldığında düşük enerji ihtiyacı gerektirmeleri, kesikli ve sürekli işletilebilmeleri, yüksek saflıkta ürün elde edilebilmesi, sıcaklık değişimlerinden fazla etkilenmemeleri, modüler olarak tasarımlarının yapılabilmesi ve fazla yer kaplamaması, kimyasal katkı ihtiyacının olmamasıdır (Kaya ve Barlas, 2003).

2.3. Atıksuların Arıtımında Anaerobik Membran Biyoreaktörler

Kırk yıldan fazla süreden beri, anaerobik arıtma konsantre endüstriyel ve evsel çamur yönetimi için tesis edilmiş iyi bir proses olmuştur. Son yıllarda bu proses mikrobiyolojisinin daha iyi anlaşılması ve gelişen reaktör tasarımı, düşük yoğunluklu atıksuların arıtımı için uygulanmasını mümkün kılmıştır. Anaerobik atıksu arıtma prosesinde temel zorluk, aktif bir biyokütle ve net büyüme hızının düşük olması nedeniyle yeterli miktarda alıkonmasıdır. Bir sonuç olarak, anaerobik sistemlerde daha uzun bir minimum çamur bekletme süresi (SRT) gerekir. Bu prosesi minimum SRT altında işletmek, sistem hatalarına yol açan büyüme hızlarından daha hızlı oranlarda sistem mikroorganizmalarının yorulması ile sonuçlanır.

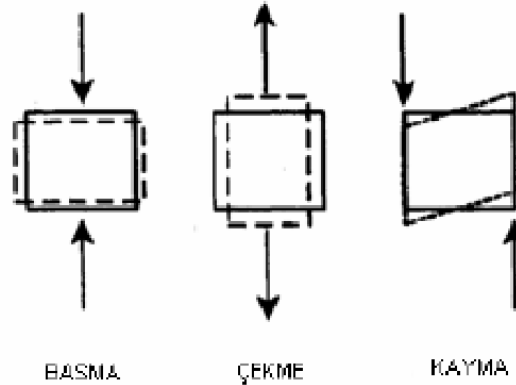
Anaerobik arıtmanın verimi düşük olduğundan bu arıtım popüler değildir. Metan gazı üretimi ve düşük çamur oluşumu avantajlarına rağmen, deşarj yönetmeliklerini karşılamada yetersiz olmaktadır. Ayrıca bu sistemler şok yüklemelere ve geniş dalgalanmalara karşı hassastır. Anaerobik atıksu arıtma sistemlerindeki yükleme oranları, yoğunlukla reaktördeki çamur yaşı ile karşılaştırılır. Yüksek çamur yaşı, daha iyi çıkış kalitesi ve gaz üretimine yol açan, iyi bir reaktör performansı sağlar. Daha düşük bir çamur yaşı daha uzun hidrolik bekletme süresine (HRT)'ne yol açar. Böylece daha büyük reaktör hacmi ve daha yüksek maliyet gerektirecektir. Eğer reaktördeki biyokütle minimum SRT'den daha uzun tutulabilse, bu problemlerin üstesinden gelinebilir ve böylece

biyokütle konsantrasyonu artırılabilir. Anaerobik fitleler, akışkan yataklı reaktörler, yukarı akışlı anaerobik çamur yataklı reaktörler (UASB), döner kondaktörler vb. gibi çeşitli anaerobik reaktör konfigürasyonları, daha uzun bekletme süresi ve daha kısa hidrolik bekletme süreleri ile desteklenmektedir. Tüm bu sistemler askıda büyüyen anaerobik sistemler ile kıyaslandığında daha az alana ihtiyaç duyarlar.

2.4. Reolojik Terimler

2.4.1. Kayma Gerilmesi

Belirli bir kayma hızında bir sıvının veya süspansiyonun kayması için gerekli olan uygulama alanı başına kayma kuvvetidir. Kayma gerilimi (τ) birbirine paralel zıt kuvvetin uygulanmasından kaynaklanan gerilimlerdir ve meydana gelen gerilim objeleri kaydırır (Şekil 2.1)



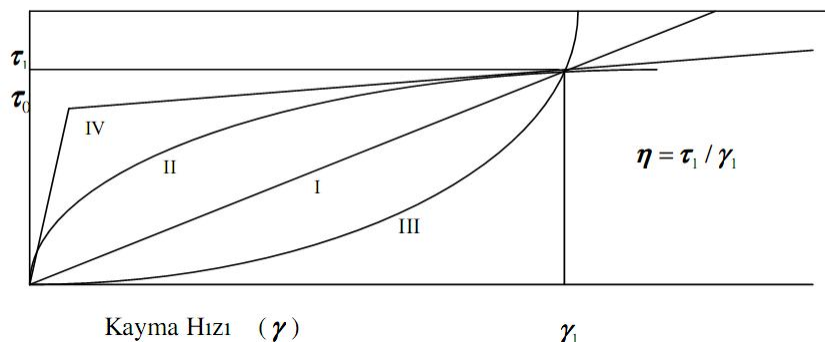
Şekil 2.1. Basma, çekme ve kayma kuvvetleri (Dinger, 2002).

Bir küp üzerinde bu olayı açıklarsak; basma gerilimleri küpü sıkıştırma, çekme gerilimleri küpü çekme etkisi gösterir. Küpün karşıt sol ve sağ yüzeylerinde düzenli olarak kuvvet uygulandığında ise, bu kuvvetler kayma gerilimleri oluşturur. Gerilimler küpü kaydırıldığında aynı zamanda deforme etmektedirler (Kalkan, 2010).

Gerilimler elastik katılara uygulandığı zaman katılar bastırılır, çekilir veya kayarlar. Elastik katılardan gerilimler uzaklaştırıldığı zaman elastik deformasyonlar yok olup objeler orijinal şekillerine geri döner. Bununla birlikte kayma gerilimleri sıvılara uygulandığı zaman sıvı moleküllerinin bağımsız tabakaları kısmen bir diğerine taşınır. Kayma gerilimi uzaklaştırıldığı zaman sıvı molekülleri yeni pozisyonlarını alır ve sıvı yeni moleküler düzenlemeler yapar. Kayma gerilimleri uygulandıktan sonra basit sıvılarda akma meydana

gelir. Akma gerilimi sergileyen sıvılarda akış, uygulanan kayma geriliminin miktarı ile ilgilidir. Sıvılar elastik deformasyon altında olabilir, fakat kayma gerilimi aşıldıktan sonra moleküller yeniden düzenlenir ve akma meydana gelir (Dinger, 2002).

Seramik proseslerindeki süspansiyonlar, viskoelastik malzemeler olarak bilinir. Çünkü elastik ve viskoz özelliklerin her ikisini de sergilerler (Dinger, 2002). Kayma gerilimi, kayma oranı ve viskozite terimlerin açıklamak ve tanımlamak için kullanılan temel diyagram Şekil 2.2'te verilmiştir.

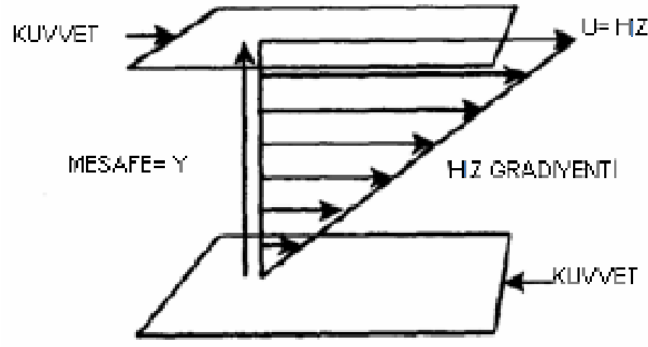


Şekil 2.2. Farklı materyaller için kayma gerilmesi ile kayma oranı arasındaki ilişki (I- newtonian davranış, II-pseudoplastik davranış, III-dilatant davranış, IV-bingham plastik davranış).

Newtonian, sıvıları üst üste binmiş tabakalardan ibaret olarak düşünmüş ve sıvıların akışını bir deste oyun kağıdının birbiri üzerinden kayarak dağılması hareketine benzetmiştir (Mart, 2002).

$$\text{Kayma Gerilimi} = \text{Kuvvet/Alan} = F/A = \tau/s \quad (2.1)$$

Kayma geriliminin boyutları genellikle basınç birimleri ile ilişkilidir. Mühendislik birimlerinde kayma gerilimi için yaygın birim psi' dir. Uluslararası birim sisteminde (SI) ise Kayma gerilmesinin yaygın birimi Pascal' dır (Dinger, 2002).



Şekil 2.3. Viskozitenin temel tanımının şematik gösterimi (Dinger, 2002).

Şekil 2.3’de paralel iki tabaka arasındaki sıvının akışı göz önüne alınmıştır. En üstteki düzlemde sağ tarafa bir kuvvet uygulandığında alt düzlemde bu kuvvete zıt ve eşit bir tepki kuvveti oluşur ve iki düzlem arasındaki sıvı kaymaya maruz kalır. Düzlem alanları boyunca üniform uygulanan kuvvetler kayma gerilimi üretir ve sıvı ile etkileşim içindeki düzlemlerden kayma gerilimleri sıvıya iletilir.

2.4.2. Kayma Hızı

Bir sıvıya bir kayma gerilimi uygulandığında sıvıda sabit bir oranda deformasyon meydana gelir. Bu deformasyon oranı kayma hızı (γ) olarak bilinir. Şekil 2.3’ de görülen geometri için basit bir sıvıda hız gradiyenti doğrusaldır. Ancak bu doğrusallık Non-Newtonian sıvılar için geçerli değildir. Kayma hızını hesaplamak için ilgili noktadaki hız gradiyetinin değerini hesaplamak gereklidir (Akdemir, 2006).

$$\text{Kayma oranı} = \frac{\text{Hızdaki Değişim}}{\text{Mesafe}} = \frac{\Delta U}{\Delta Y} = \gamma \quad (2.2)$$

Kayma hızının birimi s^{-1} olarak tanımlanmaktadır.

2.4.3. Akma Gerilimi

Bir süspansiyondaki akma gerilmesi veya başlangıç gerilimi, akmanın meydana gelmesi için aşılması gereken gerilimdir. Akma başlamadan önce, akma geriliminden (τ_0) daha az uygulanan bir gerilim jel yapı için elastik deformasyona neden olabilir. Akma durduğunda jelleşme yapısı yeniden oluşur. Basit sıvılar akma gerilimi göstermezler ve

uygulanan herhangi bir küçük gerilimde akarlar. Bir akma gerilimi olmadan şekillenen seramik bir eşya şeklini koruyamaz (Dinger, 2002).

2.4.4. Çamur Viskozitesi

Viskozite (η), paralel tabakaların birbiri üzerinden kayması şeklinde hareketleri sırasında, komşu tabakaların moleküllerinin birbirini çekmesinden kaynaklanan sıvının iç sürtünme özelliğidir. Birimi poise'dir. Bir kenarı 1 cm olan alt yüzü tespit edilmiş küp elemanın üst yüzeyine, 1 dyne'lik kuvvet uygulanması halinde, yüzeydeki moleküller 1 cm/sn hızla hareket ediyorsa bu sıvının viskozitesi 1 poise'dir [(1 poise = 1 dyne/cm².saniye, 1/100 poise = 1 centipoise (cp)]. Suyun 20°C sıcaklıktaki viskozitesi 1 cp olarak tanımlanmaktadır. Şekilsiz (amorf) malzemelerin ve akışkanların (sıvı malzemeler; su, asfalt, v.b.) molekül yapıları, birbirinden yavaş ve değişmeyen hızla ayrılır. Buna viskoz akma olayı denir. Viskozite katsayısı ne kadar büyükse o sıvının akma kabiliyeti veya hareket etme kabiliyeti o kadar azdır (Özkul ve Sağlam, 2002; Kalkan, 2010).

Sıvılar kayma gerilmesine maruz kaldıklarında akışa geçerler. Viskozite sıvıların akış özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan en önemli parametredir ve akışkanın şekil-biçim değişikliğine ya da katmanlarının birbirine göre bağıl hareketine karşı direncidir. Bu özellik tüm akışkanlarda değişik düzeylerde görülür. Akışkan molekülleri birbirini çekerek birbirlerine göre farklı ve bağıl hızlar kazanmalarını engellemeye çalışır. Çekim güçlüyse viskozite yüksek, zayıfsa viskozite düşük olur. Genel olarak sıvıların viskozitesi sıcaklıkla azalır, yani sıcaklık yükseldikçe sıvılar daha kolay akarlar, daha akışkan olurlar. Sıvıların viskozitesinin belirlenmesinde viskozite katsayısı (η) kullanılmaktadır (Kalkan, 2010).

2.4.5. Newtonian Sıvılar

Sıvılarda pratikte kayma gerilmesi (τ) hareket ettirme halinde oluşur. Dökme, püskürtme, karıştırma gibi etkiler sıvılarda kayma gerilmesini oluşturur. Sıvıya uygulanan kayma gerilmesi (τ) ile kayma hızı (deformasyonun oluşum hızı, $\dot{\gamma}$) doğru orantılıysa; diğer bir tabirle, sıvının viskozitesi değişmiyorsa bu sıvıya Newtonian sıvı adı verilir. Viskozite katsayısı Newtonian sıvılar için aşağıdaki formülle belirlenir (Kalkan, 2010).

$$\tau = \eta \cdot d\gamma/dt \quad (2.3)$$

Burada:

τ = Kayma Gerilmesi (dyne/cm²)

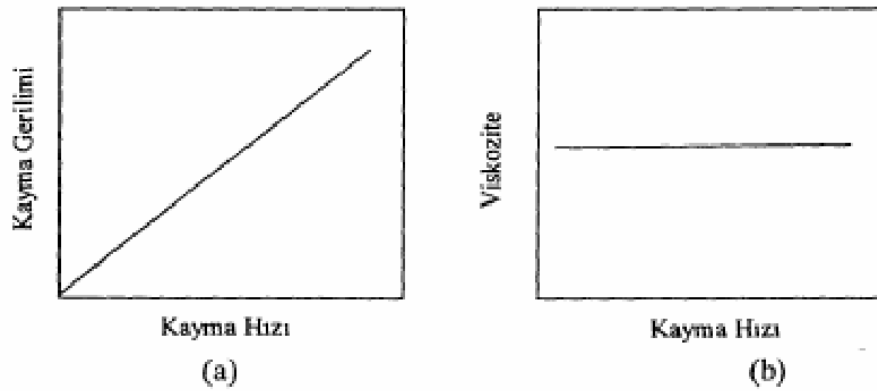
η = Viskozite (cP)

$d\gamma/dt$ = Kayma Hızı (s⁻¹)

Bu tür akışkanlar, sabit sıcaklık ve sabit basınç altında aşağıdaki özellikleri sergilerler:

- Basit kayma akışında oluşan gerilim, iki normal gerilim farkının sıfır olduğu kayma gerilimidir.
- Viskozite, kayma hızı ile değişmez.
- Viskozite, kayma işlemi devam ederken sabittir ve sıvıdaki gerilim, kayma işleminin kesilmesi durumunda hemen sıfıra iner. Ölçümün bir zaman aralığından sonra tekrarlanması durumunda yine aynı değer bulunur; viskozite zamanla değişmez.
- Farklı deformasyon durumlarında ölçülen viskozite değerleri, daima basit bir şekilde birbirleriyle orantılıdır (Barnes ve diğ., 1989).

Yukarıdaki özelliklerden sapma gösteren herhangi bir akışkan, Newtonian davranış göstermez. Saf su ve gliserin bu tür akışkanlara genel bir örnektir. Newtonian sıvı için kayma hızı ve kayma gerilimi arasındaki ilişki Şekil 2.4. (a)'da görülmektedir. Bu grafikteki doğrusal çizginin eğiminden viskozite belirlenmektedir (Van Olphen, 1977). Şekil 2.4. (b)'de ise viskozitenin kayma hızıyla değişmediği ifade edilmiştir.



Şekil 2.4. Newtonian davranışa ait; akış eğrisi (a), viskozite eğrisi (b) (Van Olphen, 1977).

2.4.6. Newtonian Olmayan Sıvılar

Newtonian olmayan sıvılarda kayma gerilmesi ile deformasyonun oluşum hızı arasında doğrusal bir ilişki yoktur (Kalkan, 2010). Akış, kayma gerilmesi ve kayma hızı arasında sabit bir orana sahip olmaz ve viskozite kayma hızı ya da kayma süresi ile değişir. Bu durumda genel viskozite denklemi yeniden düzenlenerek aşağıdaki genel eşitliğe dönüştürülür:

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \gamma^n \quad (2.4)$$

Burada:

τ = Kayma gerilmesi (dyne/cm²)

τ_0 = Başlangıç akma gerilmesi (dyne/cm²)

η = Viskozite (cP)

γ = Kayma hızı (s⁻¹)

n = Akış davranış indeksi

Buna göre; kayma gerilmesi ve kayma hızı arasındaki ilişkiye bağlı olarak çeşitli akış davranışları ve kavramları ortaya atılmıştır (Akdemir, 2006).

Pseudoplastik (yalancı plastik) davranış, düşük gerilmeler altında plastik, yüksek gerilme kuvvetleri altında viskoz davranış gösterir. Kayma hızının artışıyla birlikte viskozitede düşme gösteren sıvılar pseudoplastik sıvılar olarak tanımlanır. Pseudoplastik akış, kayma incilmesi veya incelen akış (shear thinning) olarak da bilinmektedir (Dinger, 2002). Boyalar, emülsiyonlar, dispersiyonlar ve polimerik çözeltiler bu tür akışkanlara örnek verilebilir (Barnes ve diğ., 1989, Alemdar, 2001). En çok rastlanan Newtonian olmayan akış çeşididir. Üs yasası (power-law) eşitliği ile ifade edilir;

$$\eta = K \cdot \gamma^n \quad (2.5)$$

Burada:

η = Viskozite (cP)

K = Akışkanlık katsayısı

γ = Kayma hızı (s⁻¹)

n = Akış davranış indeksi

Dilatant akış davranışı, askıda tutulan taneciklerin sıkı dolgunlaşmasıyla meydana gelmektedir. Yüksek kayma hızlarında, sıvının büyük bir kısmı boşluklarda hapis olmakta ve tanecikler artan kayma hızı ile daha fazla bir direnç göstermektedir (Barnes ve diğ., 1989, Alemdar, 2001). Bu tip akışkanlarda akış davranış indeksi (n) 1'den büyüktür (Dinger, 2002). Dilatant davranış özellikleri gösteren sıvılarda deformasyon hızındaki artışla viskozitede de artış meydana gelir. Pseudoplastik davranışa göre daha seyrek görülür. Özellikle kil, şeker çözeltileri, mısır nişastası-su karışımı, su-kum karışımı gibi süspansiyonlar dilatant özellik göstermektedir (Kalkan, 2010).

Plastik (Bingham plastiği), türündeki akışkanlar pseudoplastikler gibi davranmakla birlikte, sıvının akmaya başlaması için uygulanması gereken bir başlangıç gerilimine (τ_0) sahiptirler. Bu gerilmeye, sıfır kayma hızındaki kayma kuvveti de denmektedir (Yılmaz, 2007).

Bingham plastik ve Herschel-Bulkley modellerindeki başlangıç akış gerginliğinin mevcudiyeti; yeterli gerilmenin katı fazın gerilme kuvvetini aştıktan sonraki deforme olan katı haldeki çamur direncinden dolayıdır.

Bu olay yüksek katı fazlı çamurlarda benzer bir şekilde gelişir. Bir çamurdaki partiküllü yapıların dağılmasıyla birlikte akış gerginliği de azalmaya başlayacaktır, bu durum çamur şartlandırmada kullanılan kontrol metotları için önemli bir konum arz eder. Akışkanın deplasman hızına karşı kayma gerilmesini ölçmek gerektiğinden, Non-Newtonian davranışlar çamurların reolojik karakterizasyonunda güçlüklerle sebep olur. Deplasman hızı direkt olarak belirlenememekte fakat bilinen bir hızla (toplam akış hızı ya da oransal bir hız gibi) ilişkilendirilir. Kayma gerilmesi basınç, kuvvet veya uygulanmış ya da ölçülmüş bir burulma momentiyle ilişkilendirilir.

Kayma gerilimi akma gerilim değerini aştıktan sonra kayma gerilimi, kayma oranının lineer bir davranışıyla karakterize edilir. Bingham (plastik) reolojisi olarak adlandırılan bu akış türü, Newtonian davranış ve akma geriliminin toplamına eşittir (Dinger, 2002). Plastik davranış gösteren bir maddenin akış denklemi;

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma} \quad (2.6)$$

Burada:

τ : Kayma gerilmesi (dyne/cm²)

τ_0 : Başlangıç akma gerilmesi (dyne/cm²)

η_p : Plastik viskozite (cP)

γ : Kayma hızı (s⁻¹)

Bazı plastik akış davranımı gösteren sıvılar, üç parametrelili olan Herschel-Bulkley modeline uygun akış davranışı da gösterebilmektedir. Bu model, genelleştirilmiş Bingham akışkan veya yield-pseudoplastik akışkan olarak da adlandırılabilir ve aşağıdaki denklem ile ifade edilir (Mart, 2002).

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \gamma^n \quad (2.7)$$

Burada:

τ : Kayma gerilmesi (dyne/cm²)

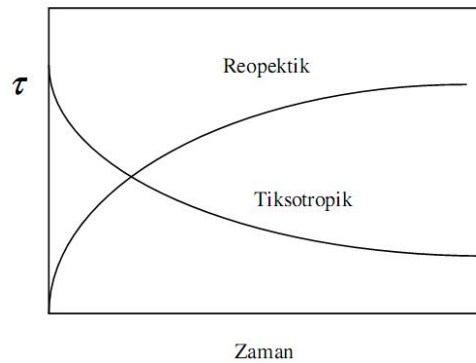
τ_0 : Başlangıç akma gerilmesi (dyne/cm²)

k : Akışkanlık katsayısı

γ : Kayma hızı (s⁻¹)

n : Akış davranış indeksi

Tiksotropik akışkanın viskozitesi zamana bağlıdır, yani sabit kayma hızında zamanla viskozite azalır. Reopektik akışkanlarda sabit kayma hızında zaman arttıkça viskozite de artar. Şekil 2.5’ de tiksotropik ve reopektik malzemeler için kayma kuvveti ile zaman arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Gres yağı, ağır mürekkepler tiksotropik, çimento hamuru ve harcı reopektik davranış göstermektedir (Kalkan, 2010).



Şekil 2.5. Kayma gerilmesi ile zaman arasındaki ilişki
(Yılmaz, 2007).

Zamana bağı Newtonian olmayan akışın reolojisinde, bir süspansiyon kaydırıldığı zaman onun bünyesindeki yapısal uzama ve değişimin ifadesi zamana bağı tiksotropik bir bozulma veya reopektik bir yapılanmanın ölçüsüdür. Viskozite, tiksotropik ifadede kayma hızı ve zaman ile azalır, reopektik ifade de ise artar (Bartos, 1992).

2.5. Literatür Özeti

Sanin (2002), yapmış olduğu araştırmada, kentsel atıksu arıtma tesisinden alınan atık aktif çamur numuneleri üzerinde reolojik deneyler gerçekleştirmiştir. Bu çalışmanın belirli bir bölümünde aktif çamurun reolojik özelliklerine katı konsantrasyonunun etkisi araştırılmıştır. Çamurun reolojik özellikleri, eksenel (dönel) viskozimetre ile ölçülmüştür. İki farklı katı madde konsantrasyonuna sahip olan aynı aktif çamurun reogramlarının değerlendirilmesi sonucu, her iki konsantrasyon için de aktif çamurun pseudoplastik bir akış karakteri gösterdiği tespit edilmiştir. Katı konsantrasyonu arttıkça K değerinin arttığı fakat n değerinin azaldığı ifade edilmiştir. Bu iki parametre arasındaki ilişki Ostwald de Vaele modeli ile tanımlanmıştır. Aynı zamanda katı madde konsantrasyonundaki bu artış çamurun viskozitesinde de önemli bir oranda artışa sebep olmuş ve çamurların güçlü bir Newtonian olmayan akışkan özelliği gösterdiği doğrulanmıştır.

Hasar ve diğ. (2004), çalışmalarında batık membrandan alınan çamur numunelerinin reolojik özellikleri üzerinde araştırmalar yapmıştır. Bu amaçla membrandan farklı katı madde konsantrasyonu içerikli çamur numuneleri alınmıştır. Numunelerin reolojik özelliklerinin belirlenmesinde Bingham ve Ostwald de Vaele matematiksel modelleri kullanılmıştır. Bu modellerden reolojik özellikleri belirleyen en uygun modelin Ostwald de Vaele modeli olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çamur konsantrasyonundaki logaritmik artışla ve viskozimetrenin dönüş hızındaki artışla birlikte viskozitenin logaritmik olarak azaldığı saptanmıştır.

Laera ve diğ. (2007), yapmış oldukları araştırmada farklı çamur bekleme sürelerindeki membran çamurlarının reolojik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Çalışmada reolojik özellikler zamana bağı olarak ölçülmüş, denge şartlarına erişildiği zamanda katı madde konsantrasyonu ile viskozite arasında ilişki kurulmuştur. Bu esnada iki matematiksel model kullanılmıştır. Bunlar; Bingham ve Ostwald modelleridir. Ölçülen parametrelerin denge durumundaki ortalama değerleri dengedeki biyokütle konsantrasyonu (MLSS) ile ilişkilendirilmiştir. Modellerin uygunluğu ortalama karesel hata kökü ile belirlenmiş ve

viskozite ile kayma hızı arasındaki ilişki katı madde konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Kayma gerilmesi değerleri dönüşlü bir viskozimetre ile ölçülmüştür. Araştırma sonucunda belirlenen ortalama karesel hata köküne göre Bingham modelin daha iyi sonuçlar verdiği saptanmıştır.

Batık membran biyoreaktördeki çamurun fizyolojik ve reolojik karakterleri filtreleme özellikleri ve membran kirlenmesi üzerine etkilerini sınıflandırmak amacıyla yapılan viskozite, tam karışımli sıvıdaki askıda katı madde (MLSS), ekstrasellüler polimer maddeler (EPS), suda çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı (SCOD), tam karışımli sıvıdaki kılcal emme (CST) açısından, karışık çözeltideki protein ve karbonhidrat emiliminin membran kirlenmesiyle ilgili uzun vadeli bir performans süresince araştırılmıştır. Membran kirlenmesinde karışık çözeltideki sıcaklık, viskozite, MLSS, EPS, CST, SCOD, protein ve karbonhidratların etkisini belirtmek için istatistiksel analiz kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucu yüksek konsantrasyonlarda MLSS ile birlikte yüksek görünen viskozite karışık çözeltideki reolojik özellikleri değiştirmiştir. Aynı zamanda batık MBR oksijen transfer katsayısını değiştirmiştir. Tüm bu değişkenler arasında çözeltinin içindeki viskozite, MLSS, EPS, CST, SCOD, karbonhidrat ve protein ile membran kirlenmesi arasında pozitif korelasyon olduğu tespit edilmiştir. Membran kirlenmesi üzerinde CST' nin büyük etkisi, ardından SCOD, sırasıyla karbonhidratlar, EPS, protein, görünen viskozite ve MLSS' nin etkisinin varlığı gözlemlenmiştir. Test sonuçlarına göre, sıcaklık ile membran kirlenmesi arasında negatif korelasyon olduğu görülmüştür (Zhichao ve diğ., 2006).

Krylow ve Fryzlewicz-Kozak (2007), yapmış oldukları araştırmada gerekli olan aktif çamur numunelerini Cracow ve Olkusz'daki evsel ve endüstriyel atıksu arıtma tesislerinin anaerobik çürütücü öncesi ve sonrası olmak üzere iki farklı noktadan almışlardır. Bu araştırmada çamurun reolojik özelliklerinin ölçümleri eksenel (dönel) reometre ile yapılmıştır. Deneylerde elde edilen sonuçlara göre akış ve viskozite eğimleri çizilmiş ve daha sonra Bingham, Ostwald-de Waele, Herschel-Bulkley, Casson, Cross, Carreau A, Carreau Yasuda, Meter ve Tscheuschner modellerine göre doğrulanmıştır. Sonuç olarak atıksu arıtma tesisi çamurlarının Newtonian olmayan akış özellikleri gösterdiği belirlenmiştir.

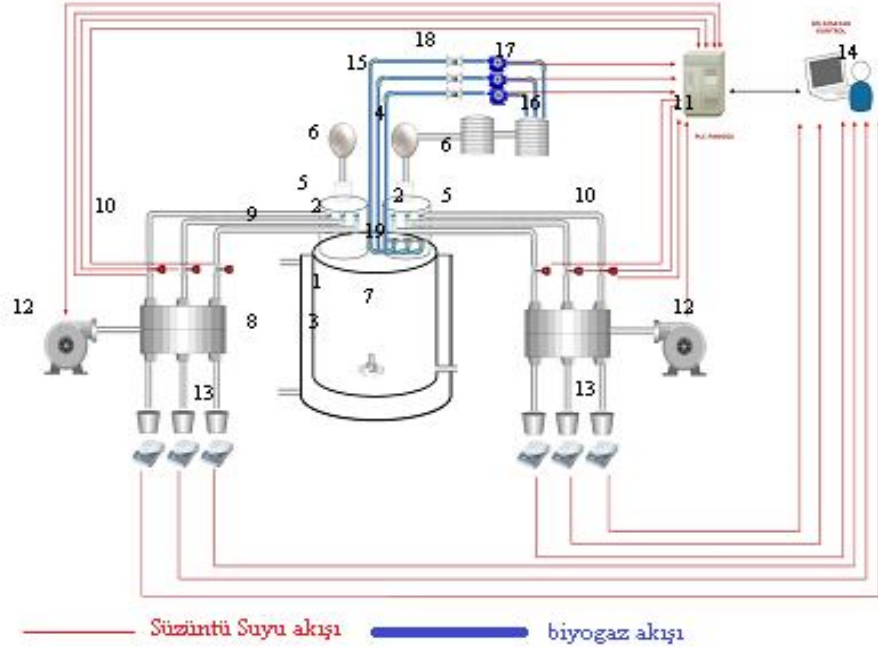
Bir yukarı akışlı anaerobik çamur yatağı (UASB) içinde granüler çamurun reolojik özellikleri araştırılmıştır. Çamur konsantrasyonu ve sıcaklık taneli çamur reolojik özellikleri üzerine etkileri değerlendirilerek Bingham model, reoloji açıklamak için kabul

edilmiştir. Buna ek olarak, görüntü analiz çamur boyut belirlemek için kullanılmıştır. Sonuçlar UASB taneli çamurun bir kayma-incelme davranış gösterdiği saptanmıştır. Bingham modeli, taneli çamur reolojisini tarif edebilmiştir. Ayrıca, taneli çamur reolojik özellikleri arasındaki ilişkinin doğruluğu model ile tarif edilebilmiştir (Mu ve Yu, 2006). Aynı çalışmada anaerobik hidrojen üreten flokların reolojik özellikleri araştırılmıştır. Sikso modeli, hidrojen üreten flokların reolojisini tanımlamış ve kısıtlayıcı viskozite belirlenmiştir. Buna ek olarak, çamur konsantrasyonu, sıcaklık, pH flok sınırlayıcı viskozite üzerine değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, hidrojen üreten flokların kayma-incelme davranışı gösterdiği tespit edilmiştir. Sikso modeli yeterince hidrojen üreten flokların reolojisi için tarif edilmiştir. Katı içeriği ile flok sınırlayıcı viskozite ve sıcaklık arasında ilişki olabildiği belirlenmiştir. Floktaki sınırlayıcı viskozitenin pH değişiminde hassas olmadığı gözlemlenmiştir (Mu ve Yu., 2006).

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Anaerobik Batık Membran Biyoreaktör (SAnMBR) Sistemi

Çalışma kapsamında yaptırılan laboratuvar ölçekli anaerobik batık MBR sistemi şeffaf fleksiglas malzemeden imal edilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. SAnMBR Sisteminin En Kesit Şekli (1. Anaerobik Reaktör, 2. Batık Membran Modülleri, 3.Su Çeketi, 4. Atıksu Girişi, 5. Biyogaz Çıkışı, 6. Gaz Toplama Balonu, 7. Mekanik Karıştırıcı, 8.Sıcak Su Girişi, 9.Sıcak Su Çıkışı, 10. Basınç Ölçer, 11. Kumanda Panosu, 12. Peristaltik Pompa, 13. Online Teraziler, 14. Bilgisayar, 15. Gaz Hattı, 16. Gaz Yıkama, 17. Gaz Pompaları, 18. Flowmetreler, 19. Difüzörler).

Reaktörde; besleme tankı, proses tankı, süzüntü suyunu deşarj eden 3 adet (üçer başlıklı) peristaltik pompa (Watson Marlow 320S), 2000 ml süzüntü suyu depolama tankları, membran modülleri (Hollow fiber), 3 adet biyogaz geri devrini sağlayan kompresör (KNF Lab., Germany), 3 adet gaz akış ölçer (Dwyer, RMA-26-SSV), membran gaz difüzörleri, transformator, sıcaklık göstergesi, manometreler, vanalar, PVC ve silikon bağlantı boruları bulunmaktadır. İki yönlü çalışan süzüntü suyu pompaları, merkezi kontrol paneli ile yarı otomatik olarak kontrol edilmektedir. Kontrol panelindeki zaman ayarlayıcı

ile gaz akış hızı ve süresi ayarlanabilmektedir. Alt kısımda çamur haznesi ve onun üzerinde iki hazneli batık membran ünitesi ve her bir reaktöre 5 cm aralıklarla çamur numune alma vanaları konulmuştur.

Sistem bir su ceketine sahiptir ve dikdörtgen şeklindeki su ceket i içerisinde silindirik şekilli anaerobik tank yer almaktadır. Sistemde sabit ısıyı sağlamak için 30 L hacminde termostatlı bir su ısıtma tankı ilave edilmiştir. Su ısıtma tankı, termostatlı bir rezistans ile ısıtılmış ve termostat probu ceket i içerisine daldırılarak, ceketteki su sıcaklığının istenen derecede tutulması sağlanmıştır (37 °C). Isıtma tankı içerisine yerleştirilen bir dalgıç pompayla su, ceket sisteme verilmiş ve sürekli devir sağlanmıştır.

Reaktörün toplam sıvı hacmi 21,5 litredir. Reaktörde tam karışımı sağlamak için pedallı karıştırıcı (Heidolph, RZR 2041) kullanılmıştır. Karıştırıcının hızı 0-150 rpm arasında değişebilmekte ve değerler dijital ekranda görülebilmektedir. Sistemde 6 adet manometre (Kellgr Drugmeststedhing, PA-21-BA) kullanılmıştır. Manometreler ve gaz akışları bir kontrol paneli vasıtasıyla kontrol edilmiş ve bu panel bilgisayar programıyla (DAQ factory run time) desteklenmiştir.

Akılar için alınan 6 adet terazi (AND, EK 3000i) bilgisayar programına (Rs multi ver. 1.10P) bağlanarak, anlık akı ve basınç değişimleri izlenmiştir (Resim 3.1). İki anaerobik batık membran biyoreaktör, aynı anaerobik sistem içerisinde oluşturularak sistemde oluşan gazların ayrı ayrı toplanması sağlanmıştır. Gaz geri devirli kısımda oluşan gazın geri devri için bir gaz düzeneği oluşturulmuştur.

Sistemde gaz toplama balonları, 3 adet manometre ve teflon diyaframlı hava pompaları kullanılmıştır. Gaz geri devrini sağlamak gaz geri devrinin uygulanacağı kısma 1mm göz genişliğine sahip olan membran difüzörler yerleştirilmiştir. Bu amaçla, bir hazır membran difüzörü 6 cm çapında kesilmiş ve önceden hazırlanan fiber haznelere preslenerek 4 cm çapında membran difüzörler oluşturulmuştur. Hazırlanan difüzörler reaktörün biyogaz geri devri uygulanacak kısmına monte edilmiştir

Reaktöre, numune alma vanaları ve proses besleme tankı (20 L) bağlanmıştır. Proses besleme tankı içerisine mini dalgıç pompa yerleştirilerek U borusu sistemine göre çalışan bir düzenek vasıtasıyla sistemdeki suyun akı şartlarında aynı seviyede kalması sağlanmıştır.

3.2. Yapılan Analizler ve Analiz Yöntemleri

Çalışma süresince toplam azot (Kit no:14537), sülfat (Kit no:14791), Toplam uçucu asitler (TUA) (Kit no:01763) ve toplam fosfor (Kit no:14543) Nova 60 Spectraquant® (Merck) test kitleri kullanılarak spektrofotometre ile belirlenmiştir. Çalışmadaki pH değerleri, iletkenlik ve NH₄-N konsantrasyonları multi parametre cihazı (Mettler Toledo – Seven Multi) ile ölçülmüştür.

Çamurun vizkoziteleri, AND Vibro-viskozimeter ile ölçülmüştür. TKM TUKM ve TAKM Standart Metotlar'a göre periyodik olarak izlenmiştir (AWWA, APHA, 1992).

3.2.1. Toplam Katı Madde (TKM)

100 ml iyice karıştırılmış numene sabit tartıma gelmiş ve darası alınmış bir porselen kroze konulmuş ve 103 °C'de etüvde sabit tartıma getirilmiştir. Desikatörde soğutulduktan sonra tartılmış ve aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır (APHA, AWWA, WEF; 1992).

$$\text{mg/L Buharlaştırma Kalıntısı} = \text{mg Kalıntı} \times 1000 / \text{ml numune} \quad (3.1)$$

3.2.2. Toplam Uçucu Katı Madde (TUKM)

Porselen krozedeki toplam katı madde (buharlaştırma kalıntısı) 550 °C'de kül fırınında 2 saat süreyle yakılmıştır. Kroze desikatörde soğutularak, tekrar tartılmıştır. Yakma ile meydana gelen kayıp uçucu maddelerin toplamı, kroze kalan maddeler ile toplam sabit kalıntı elde edilmiştir.

$$\text{mg/L Toplam Sabit Kalıntı} = (B - C) \times 1000 / \text{ml numune} \quad (3.2)$$

B= 550 °C'de yakmadan sonraki kroze ağırlığı

C= Sabit tartımdaki boş kroze ağırlığı

$$\text{mg/L Toplam Uçucu Katı Madde} = (D - B) \times 1000 / \text{ml numune} \quad (3.3)$$

D= Buharlaştırma kalıntısı miktarı

B= 550 °C' de yakmadan sonraki kroze ağırlığı (APHA, AWWA, WEF; 1992).

3.2.3. Toplam Askıda Katı Madde (TAKM)

Çok yüksek konsantrasyonda askıda madde ihtiva eden ve zor süzülen numuneler hariç iyice karıştırılmış numuneden 1 cm²'lik, filtrasyon alanına 14 ml veya daha fazla numune isabet edecek şekilde numune hacmi alınmış, 103 °C'de sabit tartıma getirilmiş ve 0,45 µm'lik filtre kâğıdından vakum altında süzölmüştür. 3 defa 10'ar ml'lik damıtık su ile yıkandıktan sonra vakum kesilerek, membran filtre 103 °C'de 1 saat etüvde kurutulmuş, desikatörde oda sıcaklığına soğutulduktan sonra tartılarak aşağıdaki formüle göre hesaplamalar yapılmıştır (APHA, AWWA, WEF; 1992).

$$\text{mg/L TAKM} = \text{mg askıda katı madde} \times 1000 / \text{numune hacmi (ml)} \quad (3.4)$$

3.3. Sentetik Atıksularla Yapılan Çalışmalar

Sistemde kullanılan sentetik atıksuyun bileşimi Tablo 3.1' de verilmiştir. Reaktör çamuru önceden sentetik atıksu ile aşı çamurunun alıştırdığı 37 °C de işletmeye alınan bir UASB reaktöründen alınmıştır. Efes Pilsen Bira Fabrikası (Adana) Anaerobik Atıksu Arıtma Tesisi'nden alınan çamur karakterize edilerek, sistemde aşı çamuru olarak kullanılmıştır. sentetik atıksu ve aşı çamuru özellikleri Tablo 3.2'de görölmektedir. Reaktör 1/3 oranında aşı/sentetik atıksu karışımıyla doldurulup, bu aşamada 1200 mg/L konsantrasyondaki sentetik atıksu ile beslenmiştir.

Tablo. 3.1. Sentetik atıksuyun kimyasal bileşimi

Bileşenler	Miktar (mg/L)
Sodyum Asetat CH ₃ COON	6000
Amonyum klorür (NH ₄ Cl)	1350
Potasyum di hidrojen orto-fosfat (KH ₂ PO ₄)	355
Magnezyum Sülfat (MgSO ₄)	384
Potasyum klorid (KCl)	296
EDTA	400
Sodyum bikarbonat (NaHCO ₃)	250
Kalsiyum klorür (CaCl ₂ .2H ₂ O)	65,6
Amonyum molibdat ((NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ .4 H ₂ O))	8,8
Bakır sülfat (Cu SO ₄).5 H ₂ O	14,4
Demir sülfat (FeSO ₄ .7H ₂ O)	40
Kobalt klorür (CaCl ₂ .6H ₂ O)	12,8
Çinko sülfat (Zn SO ₄ . 7H ₂ O)	176

Tablo 3.2. Sentetik atıksu ve aşı çamurunun özellikleri

Parametre	Birim	Atıksu	Aşı Çamuru
KOİ	mg/L	4500-5000	16000
AKM	mg/L	1250	7280
TKM	mg/L	2740	8100
TUKM	mg/L	783	6800
TN	mg/L	50	270
TP	mg/L	4	52
Sülfat	mg/L	42	36
Klorür	mg/L	97	101
pH	-	7,7	7,6
Alkalinite	mg/L CaCO ₃ /L	2078	2450

Alıştırma devresi süresince 2 (iki) litre hacmindeki akı toplama kapları terazilere yerleştirilerek sistem düşük akı şartlarında (3devir/dakika) çalıştırılmıştır. Alıştırma safhası süresince biriken biyogaz, vakum pompası vasıtasıyla reaktörün gaz geri devirli kısmına yerleştirilen her bir membran için 0,5 l/dk akış hızı sağlanarak verilmiştir. Alıştırma periyodu sonunda yeterli gaz oluşumunu sağlandığının belirlenmesi üzerine sistem işletmeye alınmıştır.

3.4. Tavuk Kesimhanesi Atıksuları İle Yapılan Çalışmalar

Sentetik atıksularla yapılan çalışmalar tamamlandıktan sonra, SAnMBR sisteminden membranlar çıkartıldı ve sistem tavuk kesimhanesi atıksularıyla mezofilik anaerobik şartlarda çalıştırıldı. Alıştırma devresinin ardından sistem, sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda optimize edilen şartlarda işletmeye alındı. Bu aşamada kullanılan atıksular Malatya’da bulunan özel bir tavuk kesimhanesinden temin edildi. Atıksular tavuk kesimhanesinde bulunan arıtma tesisi girişindeki kaba ve ince ızgaralardan geçirildikten sonra alındı. Ortalama her 4 günde bir alınan toplam 14 atıksu numunesi en kısa zamanda laboratuvar ortamına iletilerek, 1 mm elekten tekrar geçirildi ve karakterize edildi. SAnMBR sisteminin arıtma performansı ve kirlenme düzeylerini belirlemek amacıyla sistem, membran yıkanmaksızın 56 gün işletilmiştir. Çalışma süresince kullanılan tavuk kesimhanesi atıksılarında incelenen parametrelerin en düşük ve en yüksek değerleri ile ortalama değerleri Tablo 3.3’de görülmektedir.

Tablo 3.3. Tavuk kesimhanesi atıksularının özellikleri

Parametre	Aralık	Ortalama
pH	6.6–8.1	6.85 ± 1.25
Alkalinite, mg/L	1420–1860	1630 ± 230
KOI, mg/L	4460–6100	5280 ± 820
TP mg/L	5.8–12.1	8.95 ± 3.15
TN mg/L	194–488	341 ± 147
NH ₃ -N mg/L	190–475	335 ± 140
TKM, mg/L	1840–3650	2800 ± 950
TUKM	1440–2160	1900 ± 260
SO ₄ ⁼	350–572	460 ± 110

3.5. Reolojik Çalışmalar

3.5.1. Viskozimetre

Brookfield viskometresinde bir yay ile aletin motoruna bağlanan, farklı hızda dönüş yapabilen miller bulunmaktadır. Millerin geometrik şekilleri birbirinden farklıdır. Ölçülecek örneğin tipine göre mil seçildi. Milin örnek içinde dönmesiyle oluşan viskoz sürüklenme, kayma geriliminin fonksiyonu olarak aletin göstergesinden okudu. Milin dönüş hızı (d/d, rpm) genel olarak gerçek kayma hızı yerine, göstergede okunan değer ise gerçek kayma gerilimi yerine kullanıldı. Kullanılan milin boyutuna ve hızına bağlı olarak geliştirilen bir faktör yardımıyla okunan değerler viskoziteye çevrildi.

Reolojik ölçümler bu tez kapsamında alınan ve çok düşük viskoziteleri ölçebilen bir aparata sahip (UL adaptör), dönel (rotational) viskozimetre cihazı (Brookfield DV-II+ Pro) kullanılarak gerçekleştirildi. Ölçümler esnasında numunelerin sıcaklığının oda sıcaklığına gelmesi beklenmiştir. Resim 3.1'de reoloji çalışmalarında kullanılan Brookfield DV-II+Pro cihazı gösterilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan cihaz görünür (dinamik) viskozite değerlerini ölçmektedir. Dolayısıyla, tez içerisinde farklı bölümlerde bahsedilen tüm viskozite değerleri görünür viskoziteyi tanımlamaktadır. Kavram tekrarıdan kaçınmak adına bu parametre tez boyunca sadece "viskozite" olarak adlandırılmıştır.

Viskozimetre dönel eksenli 2.5 cm çapta 9 cm uzunlukta olup, aparatın rezervuarı ile arasında 0.15 cm mesafe bulunmaktadır. Cihaz çalıştırılmadan önce üzerinde mevcut olan su terazisi ile dengeli bir konumda olması sağlanmıştır. Viskozimetrenin çalışması

Rheocalc V3 1.1. programı aracılığıyla bilgisayarla kontrol edilmiş ve elde edilen veriler bu program sayesinde bilgisayardan alınmıştır.



Resim 3.1. Brookfield DV-II+Pro cihazı

3.5.2. Reolojik Ölçümler

Reolojik deneylere başlamadan önce yazılım aracılığı ile eksen (spindle) kalibre edilerek yazılımdaki test sekmesinden yapılacak deney tiplerine uygun olarak iki program oluşturulmuştur. Bu programlar artan ve azalan dakikadaki dönüş hızına (RPM) bağlı olarak dönüş hızı modu (speed ramp mode) ve zamana göre sabit dönüş hızı tabanlı analizlerin yapıldığı modda (time to stop mode) gerçekleştirilmiştir.

Çamurların reolojik ölçümleri sırasında numune hacmi 16 ml olarak sabit tutulmuştur. Diğer çamur numunelerinin reolojik ölçümlerinde ise üretici firmanın vermiş olduğu değerler dikkate alınmıştır. Reolojik ölçümler iki ayrı aşamada yapılmıştır. İlk aşamada (time to stop mode) amaç, çamurun zamana bağlı reolojik özelliklerinin ölçülmesi üzerinedir. Bu safhadaki ölçümlerde kayma hızları 1.22 s^{-1} 'den başlayıp her 10 dakikada bir doğrusal olarak artış göstererek 244.60 sn^{-1} 'ye ulaşacak ve her 10 dakikada 25 ölçüm yapacak şekilde programlanmıştır. İkinci safhada (speed ramp mode) yapılan ölçümler, her bir numune için tek yönlü doğrusal olarak artan ve azalan 10 farklı kayma hızı değerlerinde, her 1 dakikada tek ölçüm yapılmak suretiyle gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Excel dosyasına aktarılmıştır. Ardından elde edilen sonuçların grafiklere işlenmesi sonucunda çamur numunelerinin akış özellikleri ve model uygunlukları belirlenmiştir.

Reolojik ölçümler esnasında viskozimetre UL adaptör ile birlikte çalıştırılmıştır. Elde edilen tork değerlerinin yardımıyla, kayma gerilmesi ve viskozite değerleri üretici firmanın vermiş olduğu formüller kullanılarak hesaplanmıştır. Formüllerde kullanılan eksen boyutları üretici firmanın ilgili ürün için verdiği değerlerdir.

$$Kayma\ hızı = 1,223. (RPM)$$

$$Kayma\ gerilmesi = \frac{Maksimum\ tork\ (673,7). (\% tork)}{[(2.\pi. (spindle\ yarıçapı)^2. Spindle\ boyu, L = 9,074)]}$$

$$Vizkozite = \left[\left(\frac{6}{RPM} \right) . \% tork \right] \quad (3.5)$$

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. SAnMBR Sisteminde Çamur Numunelerinin Karakterizasyon Testleri

Laboratuvar ölçekli SAnMBR'den farklı katı madde konsantrasyonlarında alınan çamur numunelerinin fiziko-kimyasal özellikleri Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. SAnMBR çamurundan alınan numunelerin karakterizasyonu

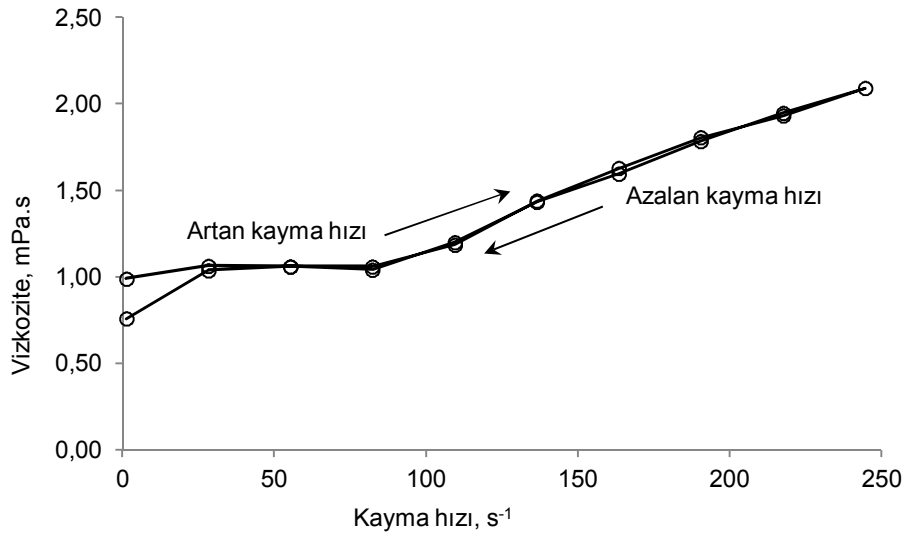
Parametre	N1 (83. gün)	N2 (96. gün)	N3 (122. gün)	N4 (156. gün)	NT1 (12. gün)	NT2 (27. gün)	NT3 (32. gün)	NT4 (45. gün)
TKOİ (mg/L)	6600	7280	9460	9920	7360	8220	7880	7700
TKM (mg/L)	7540	8280	8780	9800	7960	8140	8620	9280
TAKM (mg/L)	4280	4400	5160	6200	5540	6300	6580	7240
TÇKM (mg/L)	3260	3880	3620	3600	2420	1840	2040	2040
TUKM (mg/L)	1240	2460	2740	3480	3940	4180	4260	4040
Sıcaklık (°C)	24,7	25,2	23,6	25,5	25,0	25,4	2,06	25,7
pH	7,23	7,79	7,64	7,88	8,34	7,78	7,67	7,82

N: Sentetik atıksu ile işletilen sistem çamuru NT: Tavuk kesimhanesi ile işletilen sistem çamuru

4.1.1. Kayma Hızına Bağlı Viskozite Değerleri

Laboratuvar ölçekli SAnMBR'den farklı katı madde konsantrasyonlarında alınan çamur numunelerinin fiziko-kimyasal özellikleri Tablo 4.1 'de sunulmuştur. Çalışmamızın bu aşamasında, çamur numunelerinin artan ve azalan farklı kayma hızlarındaki değişimini inceleyerek, elde edilen bilgiler ile bir önceki bölümde gerçekleştirilen çalışma sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla laboratuvar ölçekli SAnMBR sisteminden 8 farklı katı madde konsantrasyonlarına sahip çamur numunelerine doğrusal olarak artan ve azalan kayma hızları uygulanmıştır. Numunelerden dördü sentetik atıksularla işletilen sistem çamurundan (N1-N4), diğer dördü ise tavuk kesimhanesi ile işletilen çamurdan (NT1-NT4) alınmıştır. Çalışma kapsamında her bir numune için tek yönlü doğrusal olarak artan ve azalan 10 farklı kayma hızı değerlerinde, her 1 dakikada tek ölçüm yapılmıştır. Reolojik testler oda sıcaklığında (24-26°C) gerçekleştirilmiştir.

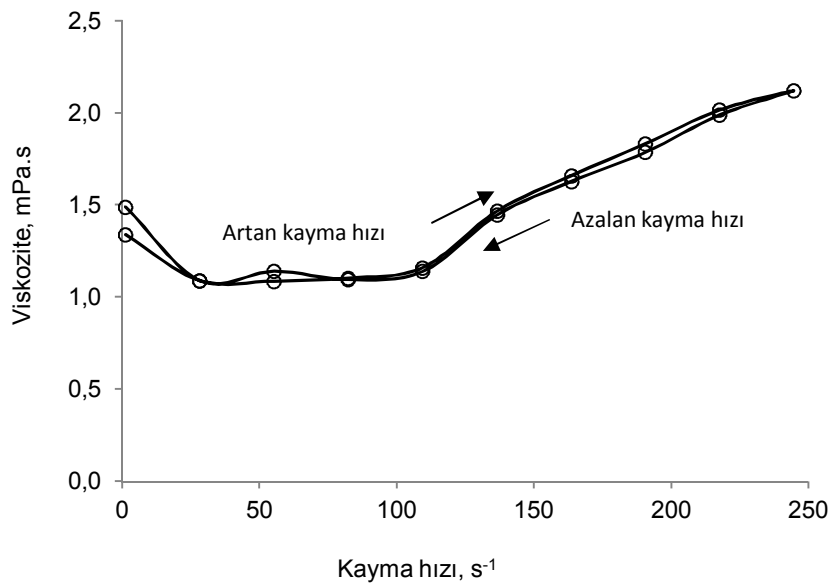
SAnMBR reaktöründen alınan N1 (TAKM: 4280 mg/L) çamur numunesine doğrusal olarak artan ve azalan kayma hızlarının uygulanması sonucu elde edilen viskozite değerlerinin değişimi Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. N1 çamur numunelerinin kayma hızı-viskozite değişimi

Şekil 4.1.'de viskozite değerlerinin artan kayma hızı ile arttığı, kayma hızındaki düşüşle birlikte viskozitenin tekrar eski seviyesine ulaştığı görülmektedir. N1 çamur numunesinin dilatant bir akış sergilediği gözlemlenmiştir.

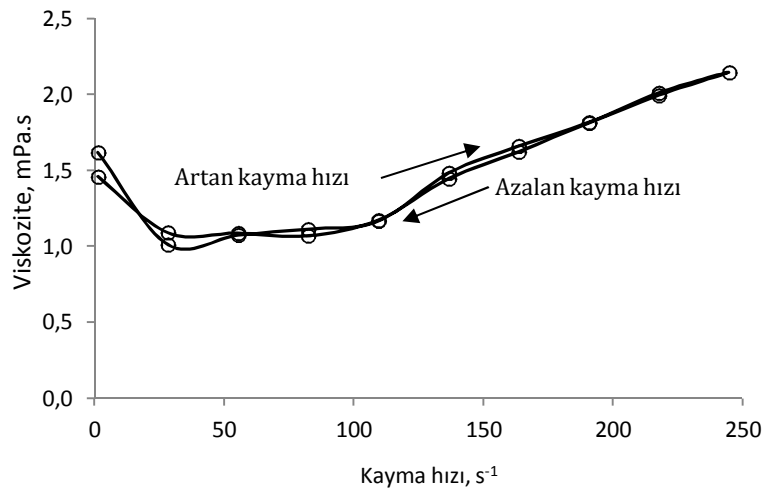
SAnMBR reaktöründen alınan N2 (TAKM: 4400 mg/L) çamur numunesine doğrusal olarak artan ve azalan kayma hızlarının uygulanması sonucu elde edilen viskozite değerlerinin değişimi Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. N2 çamur numunelerinin kayma hızı-viskozite değişimi

Şekil 4.2.'de viskozite değerlerinin artan kayma hızı ile önce küçük kayma hızı değerlerinde azaldığı, yüksek kayma hızlarında arttığı, azalan kayma hızlarıyla birlikte viskozitenin tekrar eski seviyesine ulaştığı görülmektedir. N2 çamur numunesinin dilatant bir akış gösterdiği belirlenmiştir.

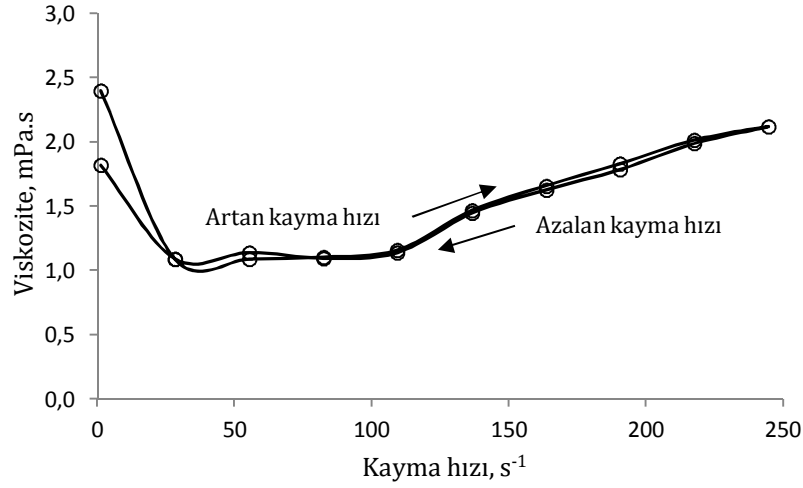
SAnMBR reaktöründen alınan N3 (TAKM: 5160 mg/L) çamur numunesine doğrusal olarak artan ve azalan kayma hızlarının uygulanması sonucu elde edilen viskozite değerlerinin değişimi Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. N3 çamur numunelerinin kayma hızı-viskozite değişimi

Viskozite değerlerinin artan kayma hızı ile önce azaldığı, sonra arttığı azaldığı ve kayma hızındaki düşüşle birlikte viskozitenin tekrar eski seviyesine ulaştığı görülmektedir (Şekil 4.3). Bu durum, diğer çamur numunelerinde elde edilen sonuçlara benzer olarak N3 çamur numunesinin dilatant akış sergilediği görülmüştür.

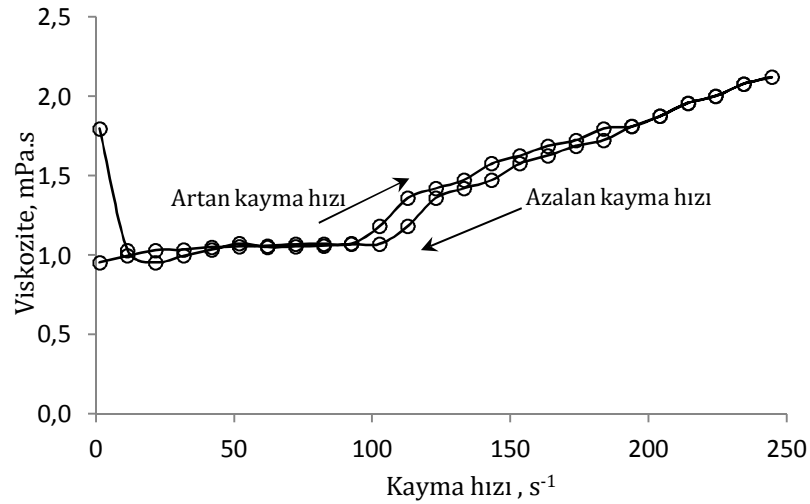
SAnMBR reaktöründen alınan N4 (TAKM: 6200 mg/L) çamur numunesine doğrusal olarak artan ve azalan kayma hızlarının uygulanması sonucu elde edilen viskozite değerlerinin değişimi Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. N4 çamur numunelerinin kayma hızı-viskozite değişimi

Şekil 4.4.'de viskozite değerlerinin artan kayma hızı ile önce azaldığı ve sonra arttığı, kayma hızındaki düşüşle birlikte viskozitenin tekrar eski seviyesine ulaştığı görülmektedir. Sonuç olarak, N4 çamur numunesi dilatant bir akış sergilemektedir.

Tavuk kesimhanesi atıksuları ile işletilen SAnMBR reaktöründen 12. gün alınan NT1 (TAKM: 5540 mg/L) çamur numunesine doğrusal olarak artan ve azalan kayma hızlarının uygulanması sonucu elde edilen viskozite değerlerinin değişimi Şekil 4.5'te görülmektedir.

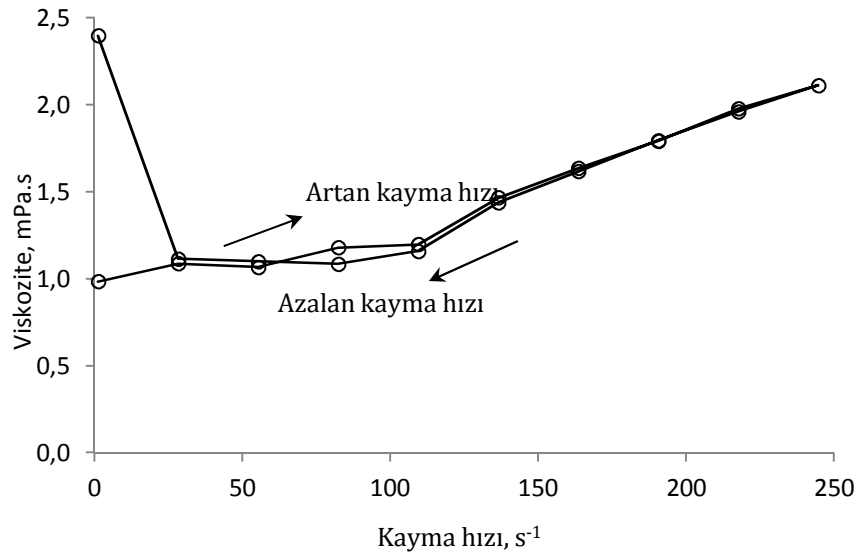


Şekil 4.5. NT1 çamur numunelerinin kayma hızı-viskozite değişimi

Sentetik atıksularla yapılan çalışmalara benzer şekilde, viskozite değerlerinin artan kayma hızı ile önce azaldığı, sonra arttığı azaldığı ve kayma hızındaki düşüşle birlikte

viskozitenin kısmen eski seviyesine ulaştığı görülmektedir (Şekil 4.5). NT1 çamur numunesinin dilatant akış sergilediği belirlenmiştir.

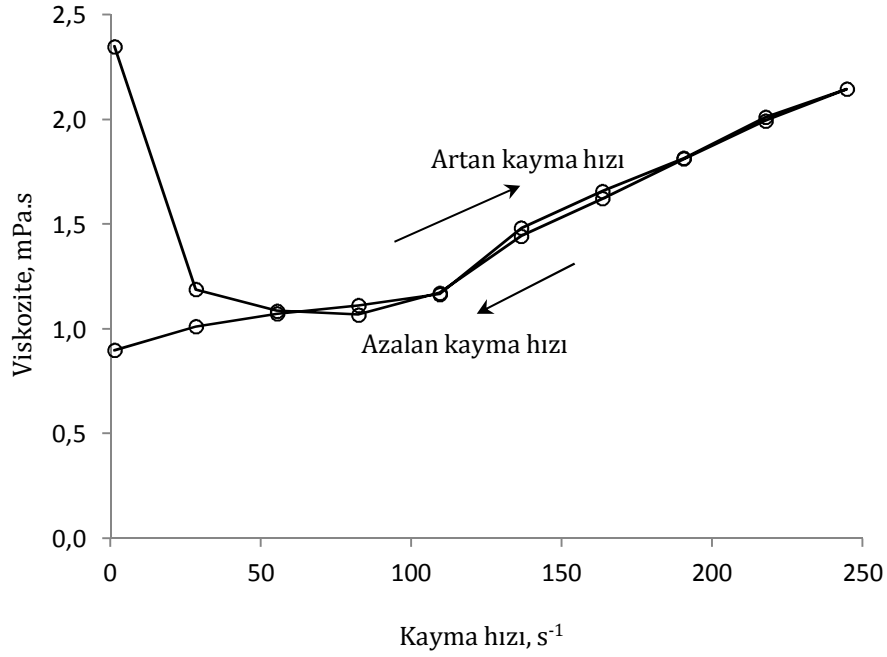
Tavuk kesimhanesi atıksuları ile işletilen SAnMBR reaktöründen 27. gün alınan NT2 (TAKM: 6300 mg/L) çamur numunesine doğrusal olarak artan ve azalan kayma hızlarının uygulanması sonucu elde edilen viskozite değerlerinin değişimi ise Şekil 4.6'da görülmektedir.



Şekil 4.6. NT2 çamur numunelerinin kayma hızı-viskozite değişimi

Şekil 4.6.'da da viskozite değerlerinin artan kayma hızı ile önce azaldığı ve sonra arttığı, kayma hızındaki düşüşle birlikte viskozitenin tekrar eski seviyesine ulaştığı görülmektedir. NT2 çamurunun dilatant akış gösterdiği görülmektedir.

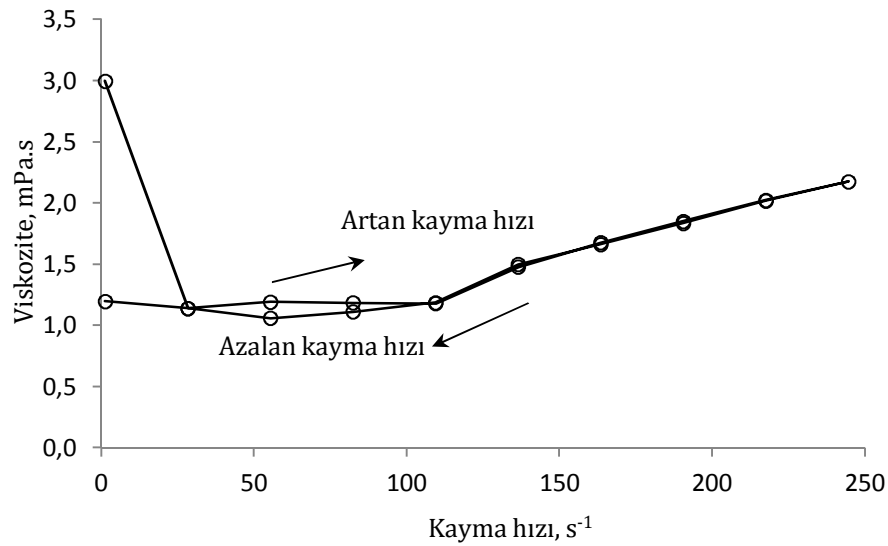
Tavuk kesimhanesi atıksuları ile işletilen SAnMBR reaktöründen 32. gün alınan NT3 (TAKM: 6580 mg/L) çamur numunesine doğrusal olarak artan ve azalan kayma hızlarının uygulanması sonucu elde edilen viskozite değerlerinin değişimi Şekil 4.7'de görülmektedir



Şekil 4.7. NT3 çamur numunelerinin kayma hızı-viskozite değişimi

Şekil 4.7.'de viskozite değerlerinin artan kayma hızı ile önce azaldığı ve sonra arttığı, kayma hızındaki düşüşle birlikte viskozitenin tekrar eski seviyesine ulaşmadığı görülmektedir. NT3 çamur numunesi dilatant bir akış sergilemiştir.

Şekil 4.8.'de ise Tavuk kesimhanesi atıksuları ile işletilen SANMBR reaktöründen 42. gün alınan NT4 (TAKM: 7240 mg/L) çamur numunesine doğrusal olarak artan ve azalan kayma hızlarının uygulanması sonucu elde edilen viskozite değerlerinin değişimi görülmektedir.

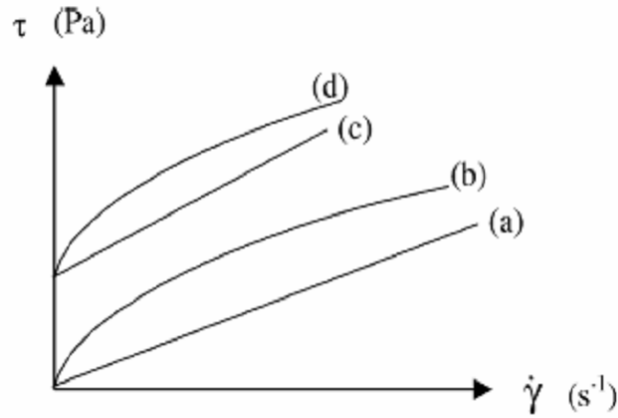


Şekil 4.8. NT4 çamur numunelerinin kayma hızı-viskozite değişimi

Bu durumda da viskozite değerlerinin artan kayma hızı ile önce azaldığı ve sonra arttığı, kayma hızındaki düşüşle birlikte viskozitenin tekrar eski seviyesine ulaşmadığı görülmektedir. NT4 çamur numunesinin de diğer numunelere benzer olarak dilatant akış sergilediği belirlenmiştir.

4.2. Reogramlar ve Model Uygunlukları

Akışkanların reolojik özelliklerinin belirlenmesi aşamasında reogramlar (akış eğrileri) kullanılır. Reogramlar, kayma gerilmesine karşılık gelen kayma hızı değerlerinin grafiğe aktarılması sonucunda oluşturulur. Bu eğriler akışkanın hangi reolojik karaktere sahip olduğunun tespitinde kullanılmaktadır (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Şematik Reogramlar (A) Newtonian; (B) Pseudoplastik; (C) İdeal Bingham Plastik; (D) Gerçek Plastik (Kalkan, 2010).

4.2.1. Reolojik Ölçümlerde Kullanılan Modeller

4.2.1.1. Ostwald De Vaele (Power Law) Modeli

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (4.1)$$

Burada;

τ = Kayma gerilmesi (dyne/cm²)

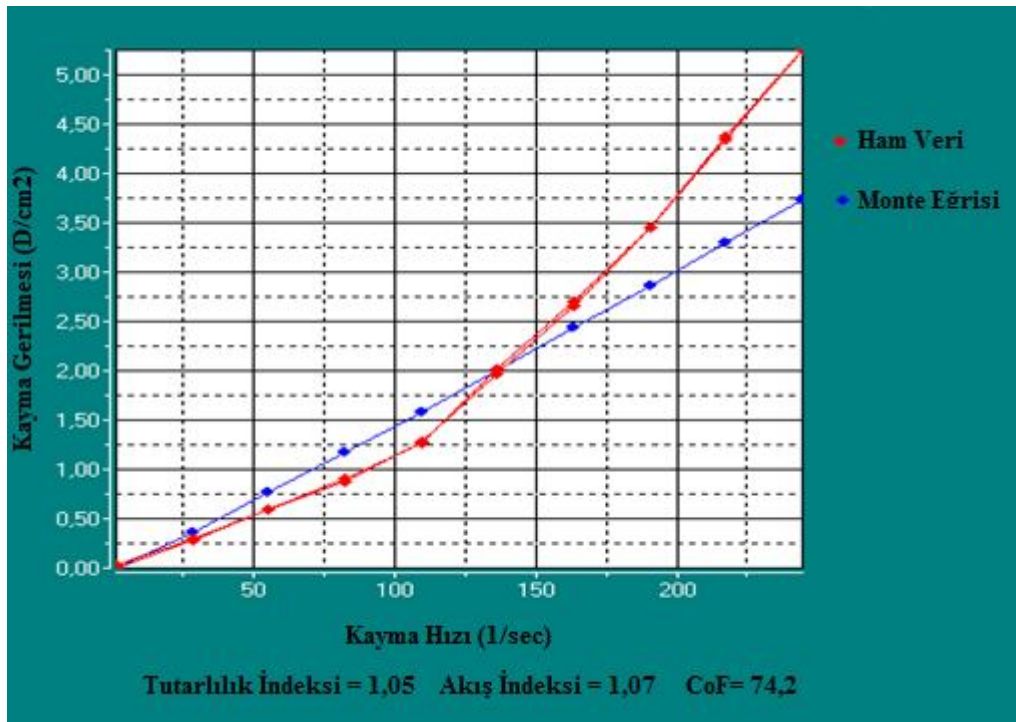
γ = Kayma hızı (s⁻¹)

k = Akışkanlık katsayısı

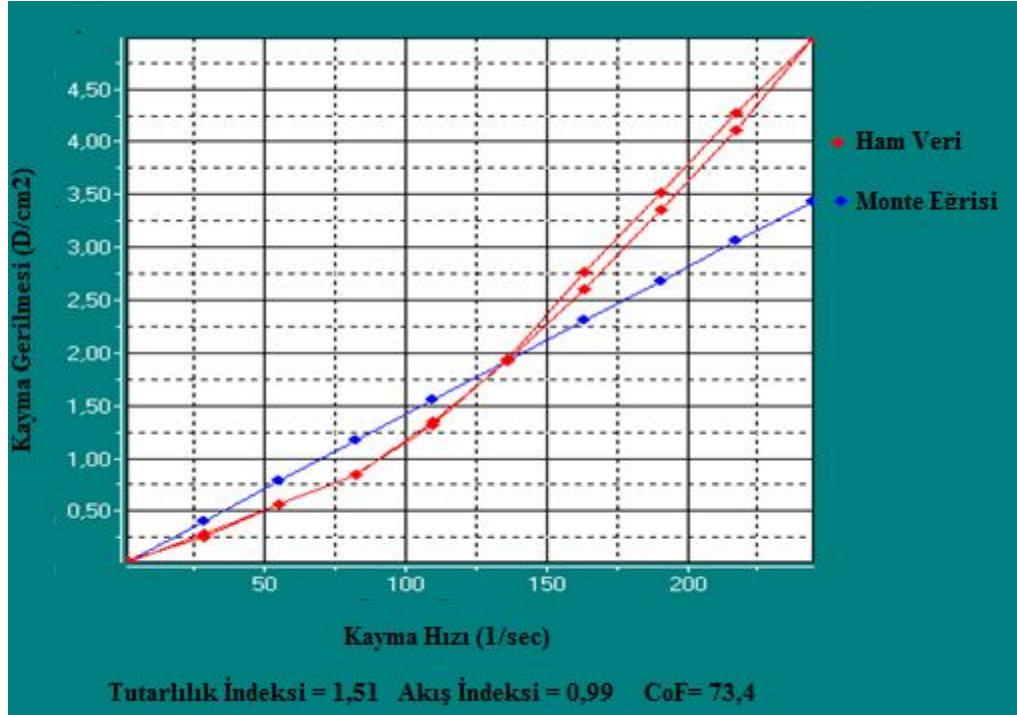
n = Akış davranış indeksi

Power Law reolojik modelinde akışkanlık katsayısı olan k viskoziteye tekabül etmektedir. Akış davranış indeksi $n=1$ ise; Newtonian, $n<1$ ise; pseudoplastik akış özelliği söz konusudur (Sanin, 2002). Ayrıca, artan katı madde içeriğiyle birlikte akışkanlık katsayısının arttığı, akış davranış indeksinin ise tersine azalma eğilimi gösterdiği belirtilmiştir (Mori ve diğ., 2006; Kalkan 2010).

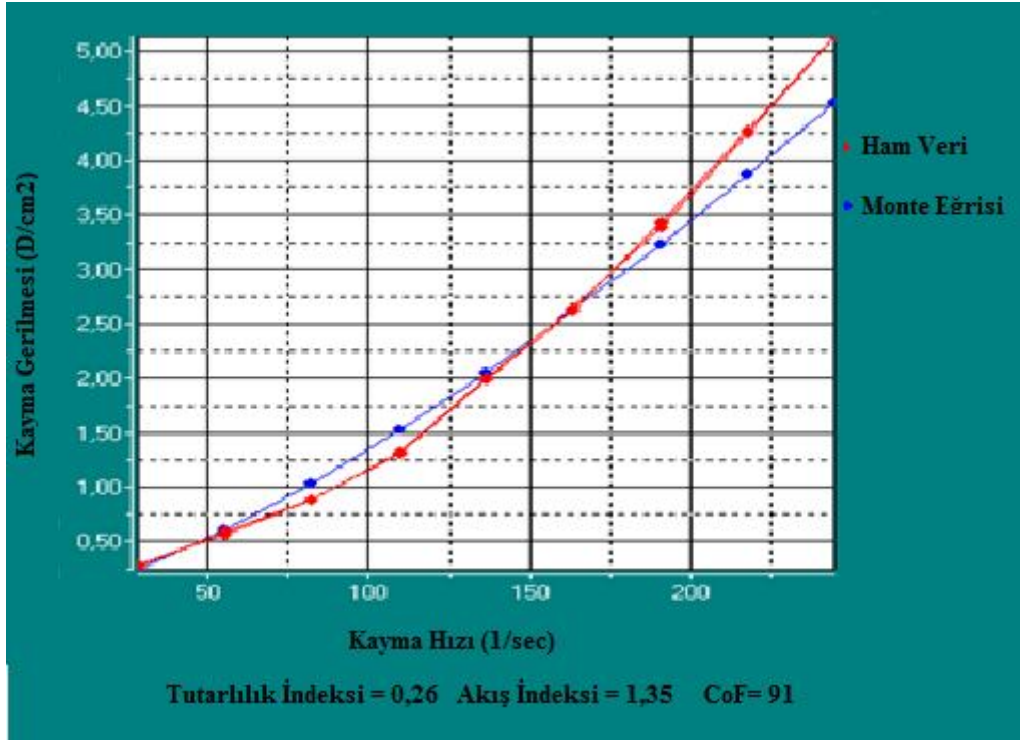
SAnMBR'den alınan sekiz farklı çamur numunelerinin Power Law matematiksel modeline uygunlukları Şekil 4.10-4.17'de gösterilmiştir.



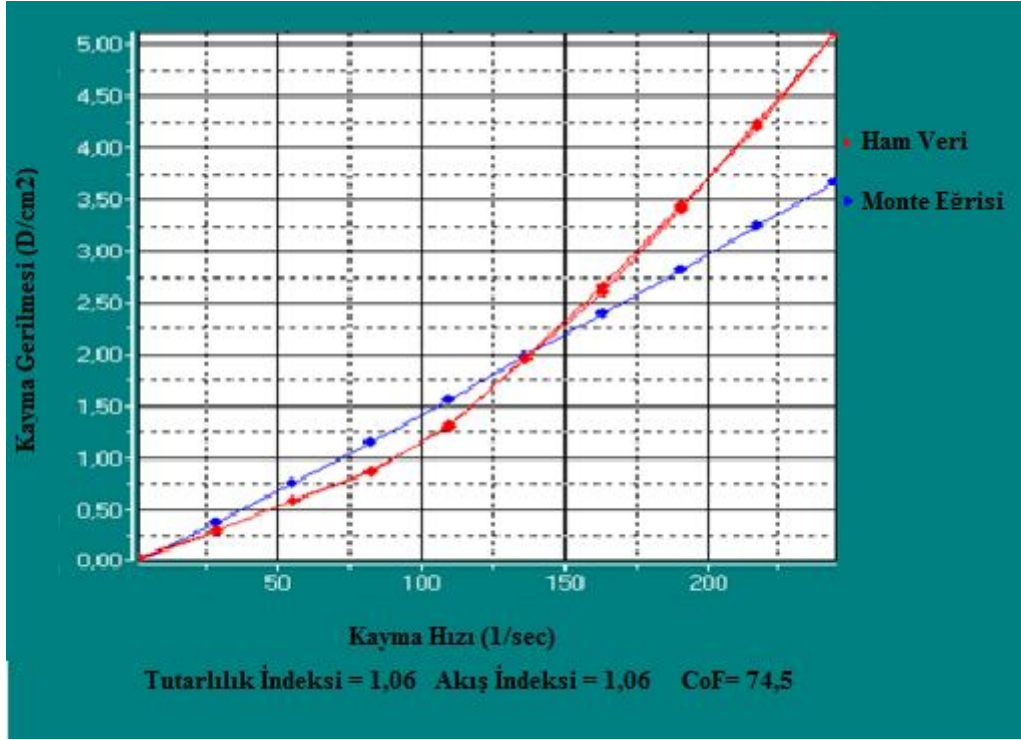
Şekil 4.10. N1 çamur numunesinin Ostwald De Vaele (Power Law) modeline göre reogramı



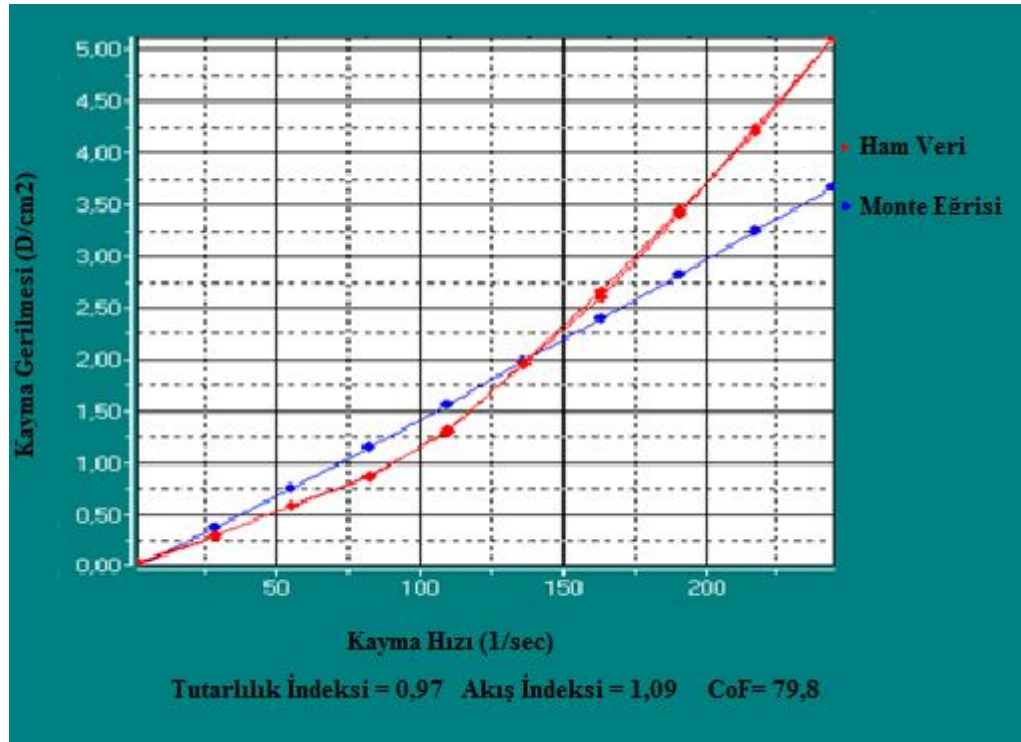
Şekil 4.11. N2 çamur numunesinin Ostwald De Vaele (Power Law) modeline göre reogramı



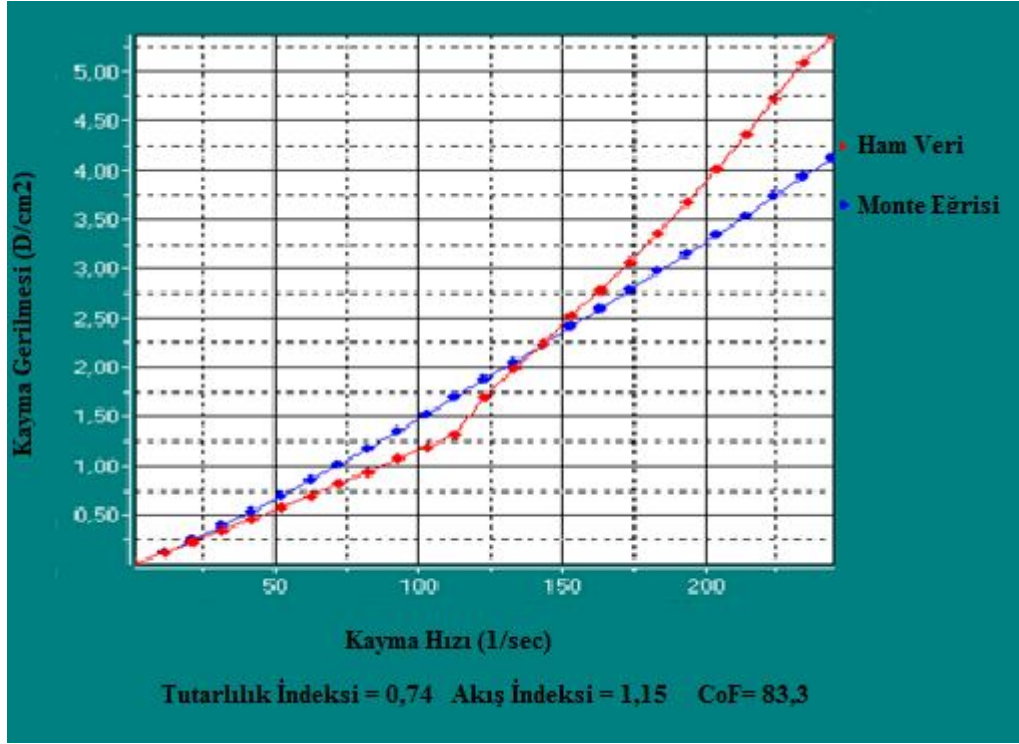
Şekil 4.12. N3 çamur numunesinin Ostwald De Vaele (Power Law) modeline göre reogramı



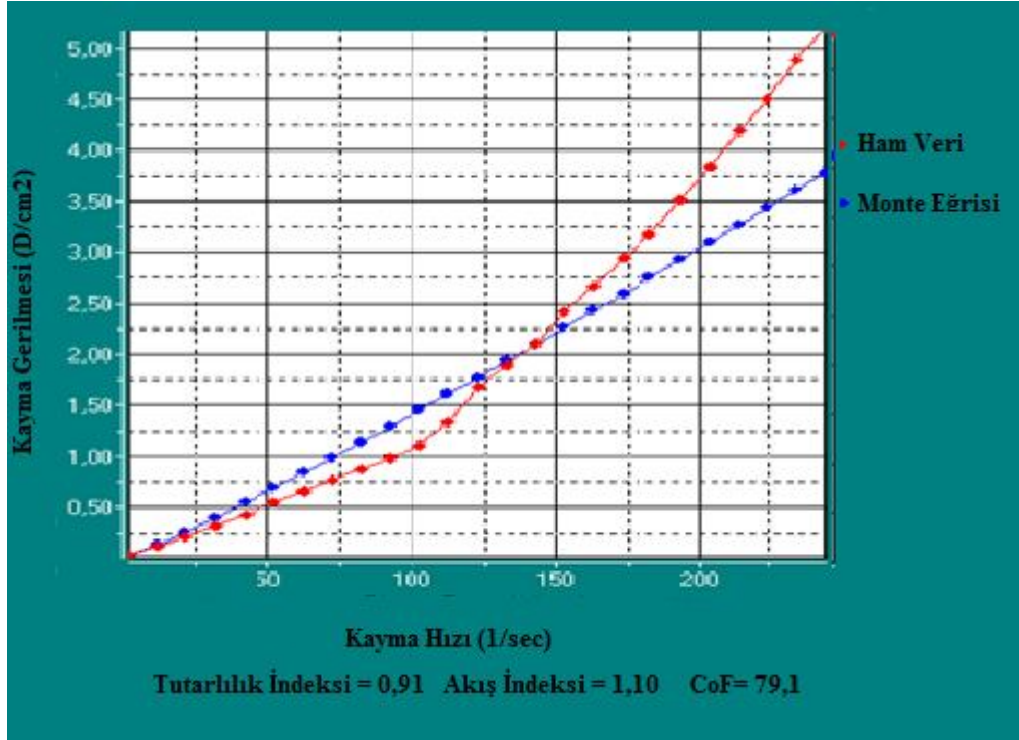
Şekil 4.13. N4 çamur numunesinin Ostwald De Vaele (Power Law) modeline göre reogramı



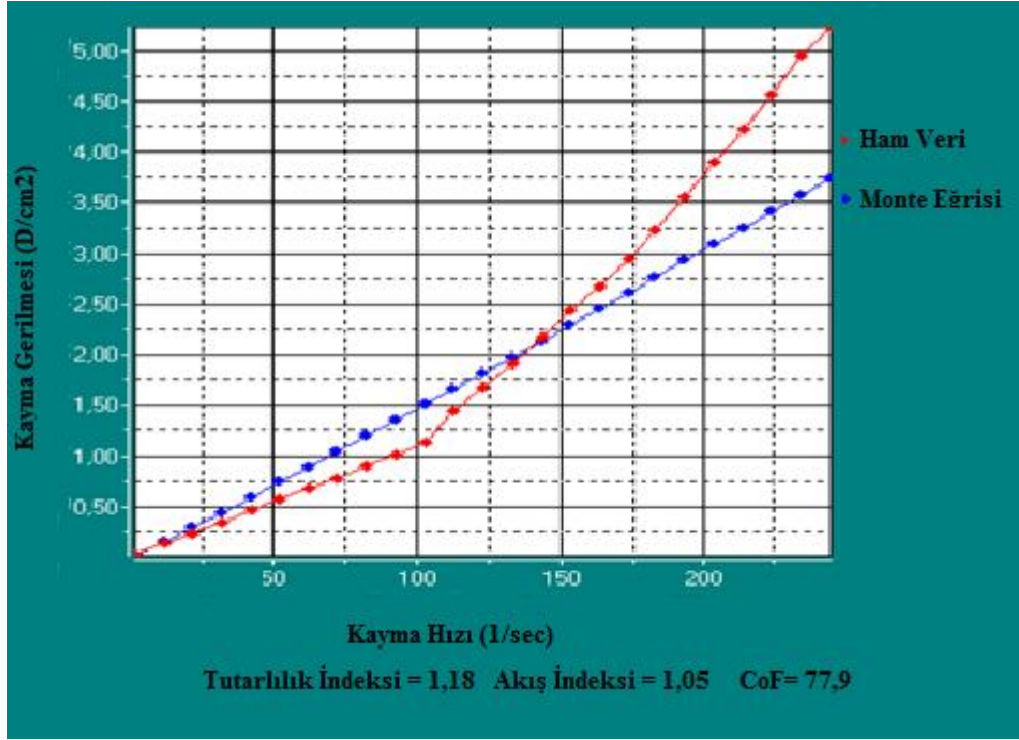
Şekil 4.14. NT1 çamur numunesinin Ostwald De Vaele (Power Law) modeline göre reogramı



Şekil 4.15. NT2 çamur numunesinin Ostwald De Vaele (Power Law) modeline göre reogramı



Şekil 4.16. NT3 çamur numunesinin Ostwald De Vaele (Power Law) modeline göre reogramı



Şekil 4.17. NT4 çamur numunesinin Ostwald De Vaele (Power Law) modeline göre reogramı

SAnMBR den alınan çamur numunelerinin Power Law Model parametreleri olan akışkanlık katsayısı (k) ve akış davranış indeksi (n) ile regresyon katsayıları (R^2) Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2. SAnMBR çamur numunelerinin Power Law Model parametreleri ve uygunlukları

Çamur Numunesi	k	n	R^2
N1	1,05	1,07	0,742
N2	1.51	0,99	0,734
N3	0,26	1,35	0,910
N4	1,06	1,06	0,745
NT1	0,97	1,09	0,798
NT2	0,74	1,15	0,833
NT3	0,91	1,10	0,791
NT4	1,18	1,05	0,779

Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda alınan numunelerin katı madde içeriklerinin sıralanması şu şekildedir; $TKM_{N1} < TKM_{N2} < TKM_{N3} < TKM_{N4}$. Benzer şekilde tavuk kesimhanesi atıksularıyla yapılan çalışmalarda reaktör çamurundan alınan numunelerin katı maddeleri de $TKM_{NT1} < TKM_{NT2} < TKM_{NT3} < TKM_{NT4}$ şeklindedir. Bu nedenle katı madde konsantrasyonundaki artışa paralel olarak akışkanlık katsayısı artmamıştır. Akış davranış indeksleri de farklılıklar göstermiştir. Bu nedenle çamurlar reolojik olarak pseudoplastik bir davranış sergilerler. Tüm numunelerde regresyon katsayıları (R^2), Power Law reolojik modelinin deneysel reograflara uygunluğunun oldukça düşük olduğunu göstermektedir.

SAnMBR'dan alınan tüm çamur numunelerinin deneysel verileri Power Law matematiksel modeline uygulandığı zaman, model parametrelerinden akış davranış indeksi değerlerinin 1'den farklı olduğu Tablo 4.2'de görülmektedir. Bu nedenle numunelerin reolojik davranışlarının pseudoplastik olduğu söylenebilir. Numunelerin katı madde içeriklerine bakıldığı zaman büyüklük sıralamasına göre akışkanlık katsayılarının; $KN1 < KN2 < KN3 < KN4$ ve $KN_{T1} < KN_{T2} < KN_{T3} < KN_{T4}$ olması gerekirken sıralama; $KN3 < KN1 < KN4 < KN2$ ve $KN_{T2} < KN_{T3} < KN_{T1} < KN_{T4}$ şeklinde gerçekleşmiştir. Power Law matematiksel modelinin deneysel verilerden elde edilen reograma uygunluğunun oldukça düşük olduğu görülmektedir. Farklı konsantrasyonlarda olan çamur numunelerine uygulanan kayma hızlarındaki artışla birlikte kayma gerilmelerinde de artış olmaktadır. Artışın doğrusal olarak gerçekleşmemesi ve akış davranış indeksi değerlerinin 1'den farklı olması çamur numunelerinin dilatant bir karaktere sahip olduğunu göstermektedir.

4.2.1.2. Casson Modeli

Bir diğer reolojik model olan Casson modeli aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir.

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{(\eta \cdot \gamma)} \quad (4.2)$$

Burada:

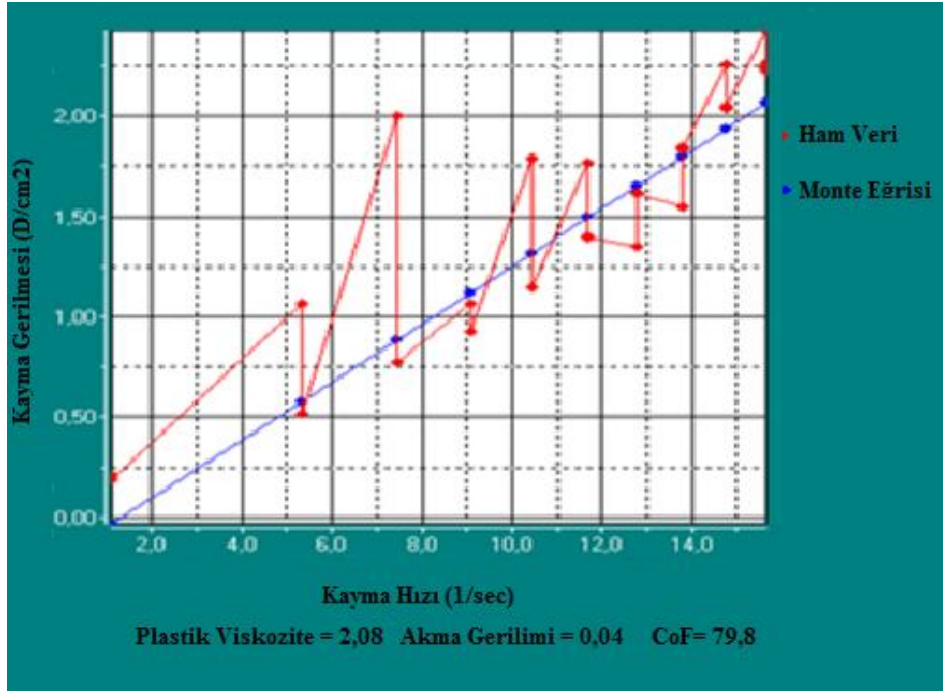
τ = Kayma gerilmesi (dyne/cm²)

τ_0 = Başlangıç akma gerilmesi (dyne/cm²)

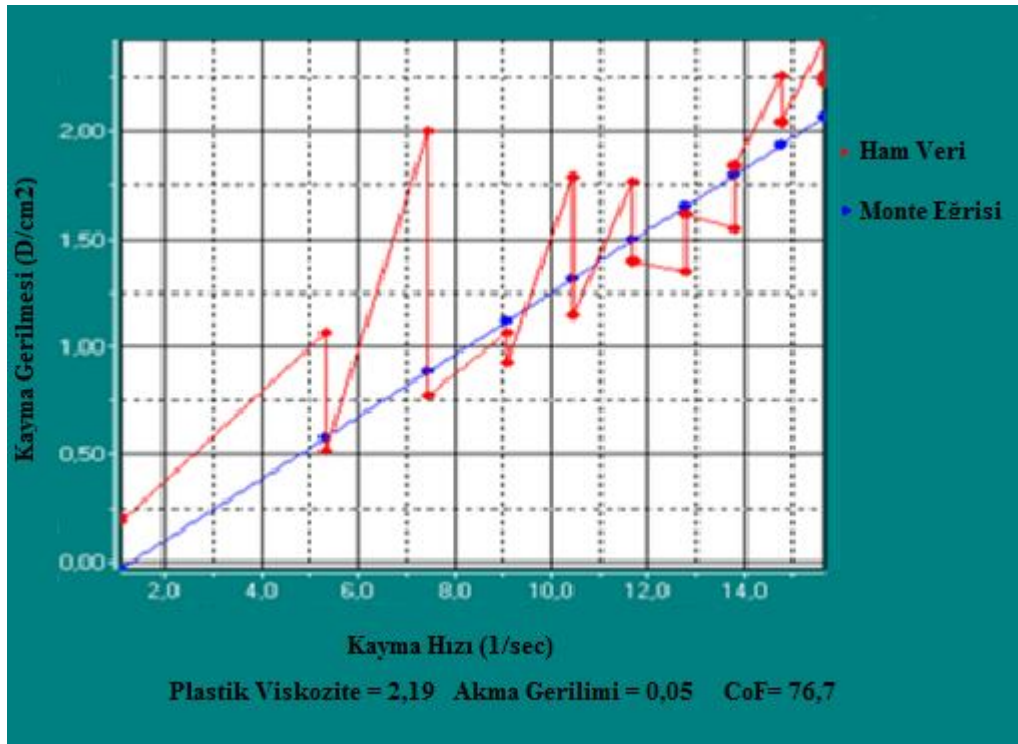
η = Viskozite (cP)

γ = Kayma hızı (s⁻¹)

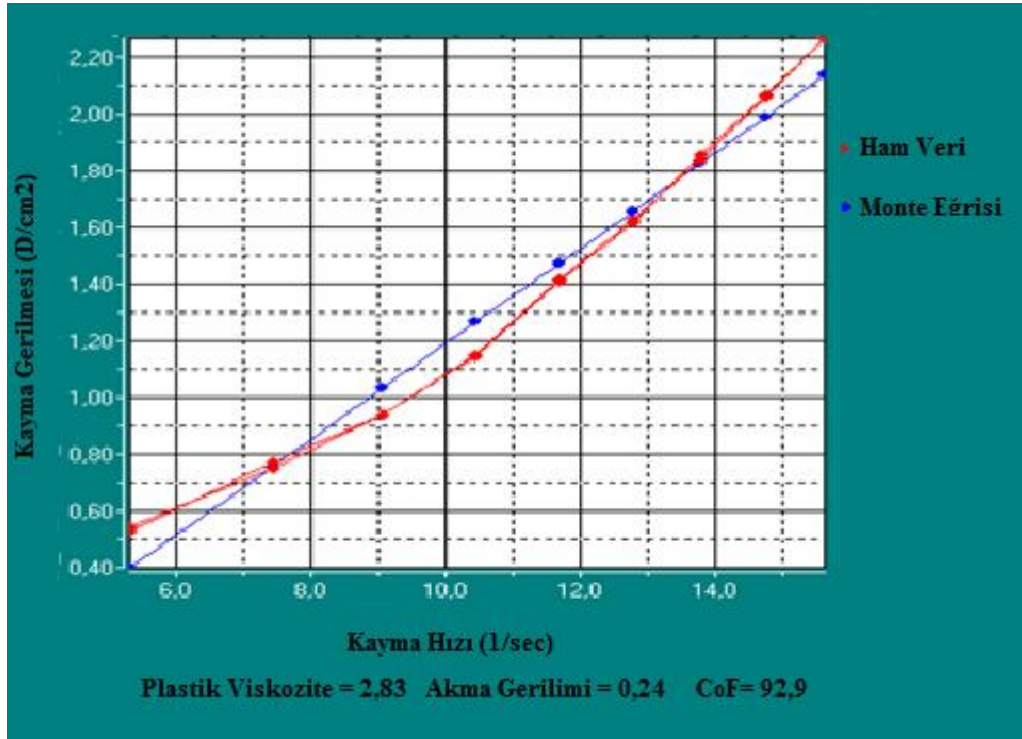
SAnMBR sisteminden alınan farklı çamur numunelerinin Casson matematiksel modeline uygunlukları Şekil 4.18-4.25'te gösterilmiştir.



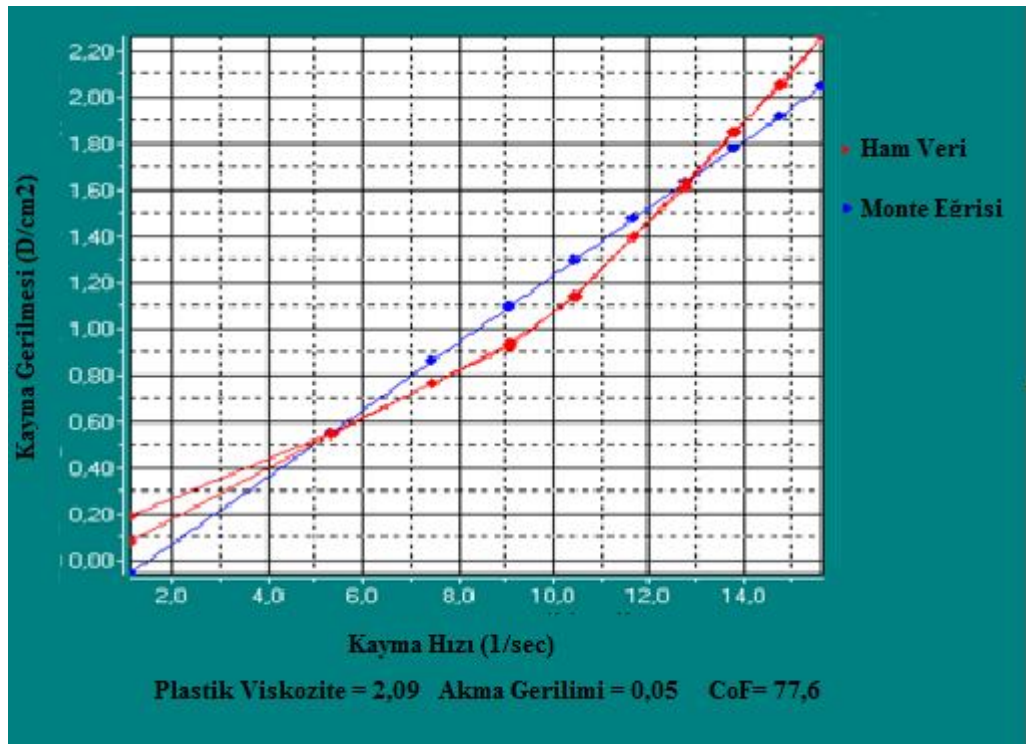
Şekil 4.18. N1 çamur numunesinin Casson Modeline göre reogramı



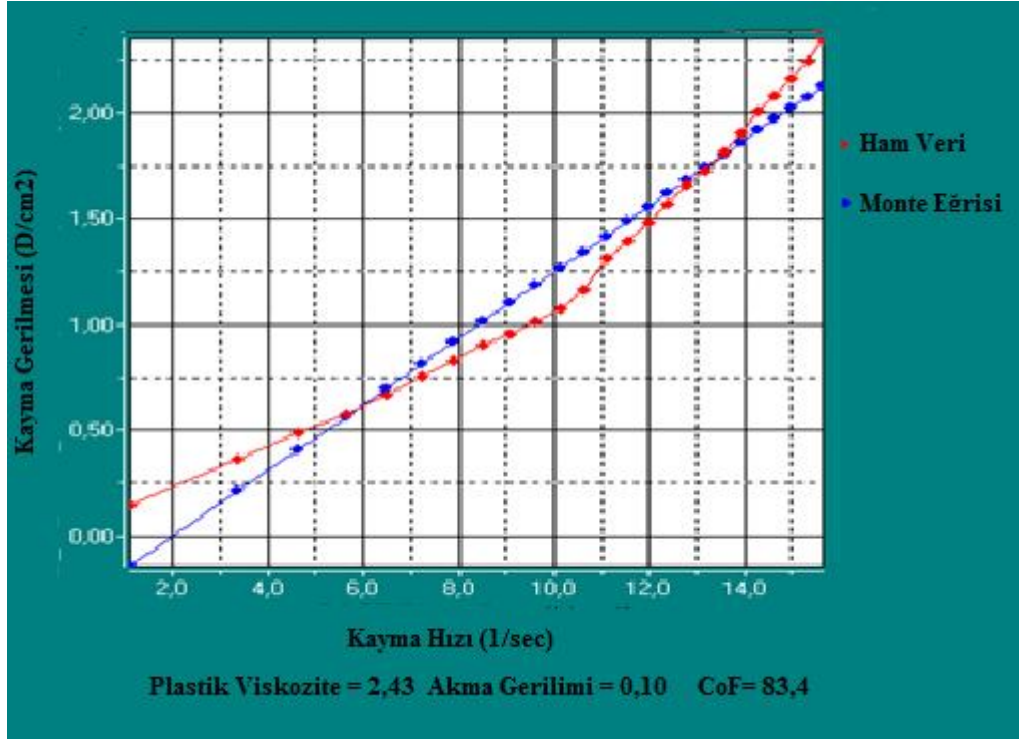
Şekil 4.19. N2 çamur numunesinin Casson Modeline göre reogramı



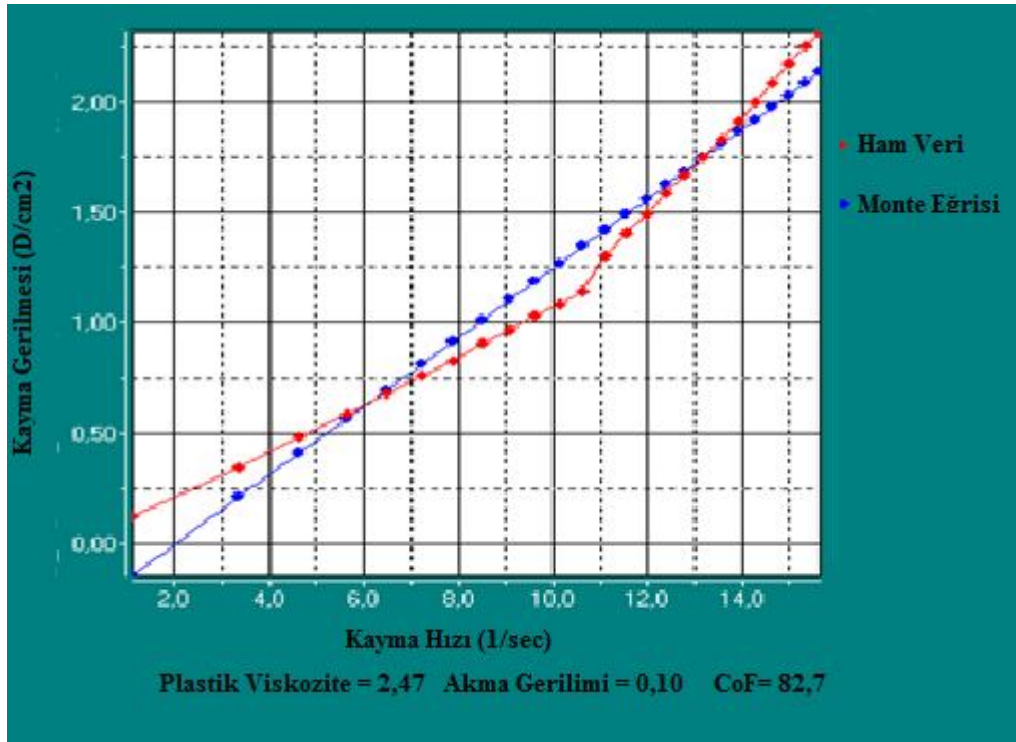
Şekil 4.20. N3 çamur numunesinin Casson Modeline göre reogramı



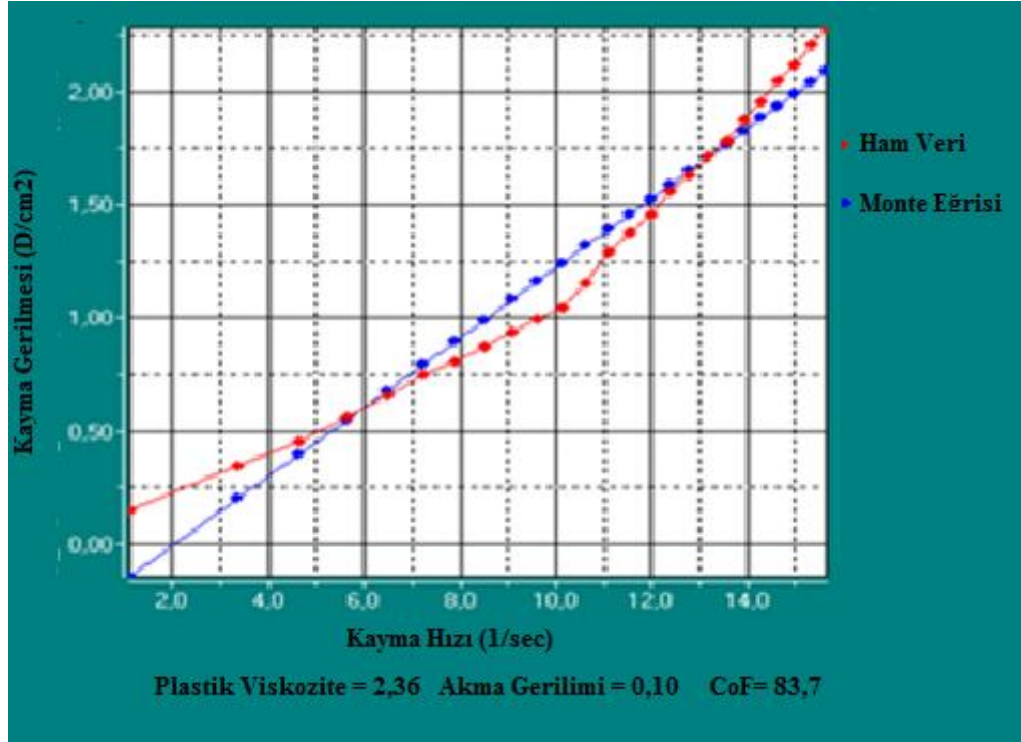
Şekil 4.21. N4 çamur numunesinin Casson Modeline göre reogramı



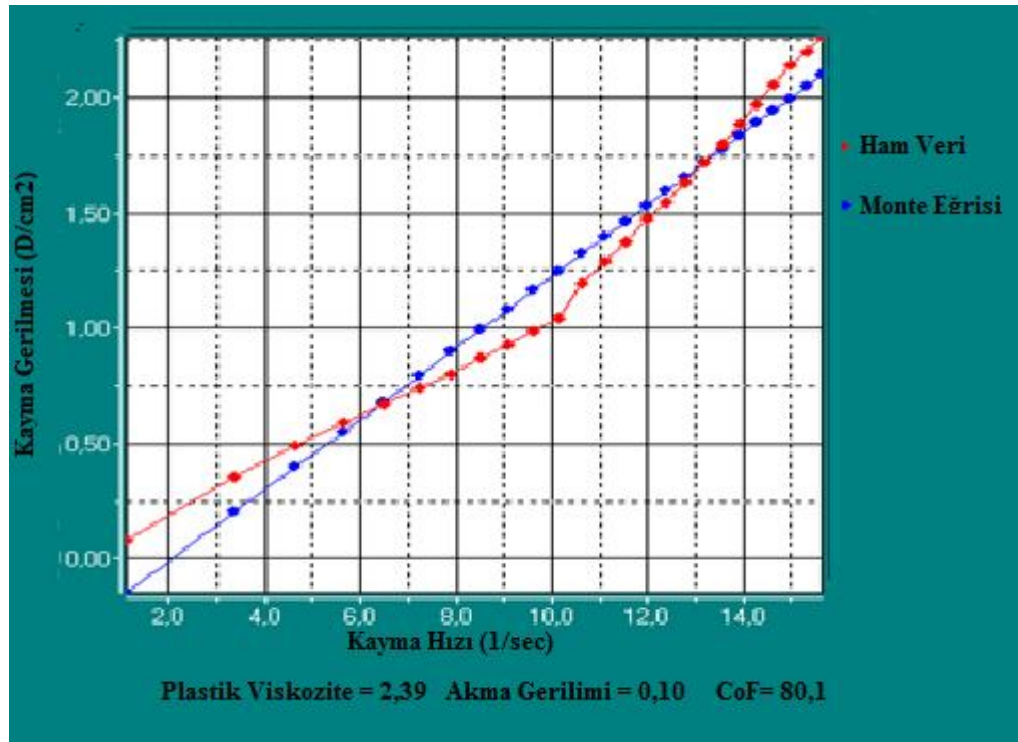
Şekil 4.22. NT1 çamur numunesinin Casson Modeline göre reogramı



Şekil 4.23. NT2 çamur numunesinin Casson Modeline göre reogramı



Şekil 4.24. NT3 çamur numunesinin Casson Modeline göre reogramı



Şekil 4.25. NT4 çamur numunesinin Casson Modeline göre reogramı

Şekil 4.18-4.25'de SAnMBR çamur numunelerinin kayma hızlarının karekök değerlerindeki artışla kayma gerilmelerinin karekök değerlerinde de artışın olduğu görülmektedir. Her bir çamur numunesinin akışa geçebilmesi için gerekli olan akma gerilimi değerleri nedeniyle eğriler 0 noktasından değil belirli bir kayma gerilmesi değerinden başlamıştır.

Tablo 4.3. SAnMBR alınan çamur numunelerinin Casson Model parametreleri ve uygunlukları

Çamur numunesi	PV	τ_0	R^2
N1	2,08	0.04	0,798
N2	2.19	0.05	0,767
N3	2.83	0.24	0,929
N4	2,03	0,05	0,776
NT1	2,43	0,10	0,834
NT2	2,47	0,10	0,827
NT3	2,36	0,10	0,837
NT4	2,30	0,10	0,801

*PV : plastik vizkozite, cP

Modelin regresyon katsayıları göz önünde bulundurulduğunda R^2 değerleri yeterince yüksek olmayıp, model hata sonuçları yüksektir (Tablo 4.3). Casson matematiksel modelinin, numuneler arasında N3 numaralı SAnMBR çamurunun karakteristiğinin belirlenmesinde daha belirgin olduğu anlaşılmaktadır.

Çamur numunelerinin içerdiği katı madde miktarlarındaki artışla birlikte akma gerilmeleri ve plastik viskozite değerlerinde de artışın olduğu gözlenmektedir. Modelin regresyon katsayısına baktığımızda N3 çamur numunesi hariç, diğer numunelerin değerlerinin düşük olduğu görülmekte, bu nedenle genel olarak Casson modelinin çamurun reolojik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılamayacağı anlaşılmaktadır.

4.2.1.3. Bingham Modeli

Bingham modelinin matematiksel ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \gamma \quad (4.3)$$

Burada:

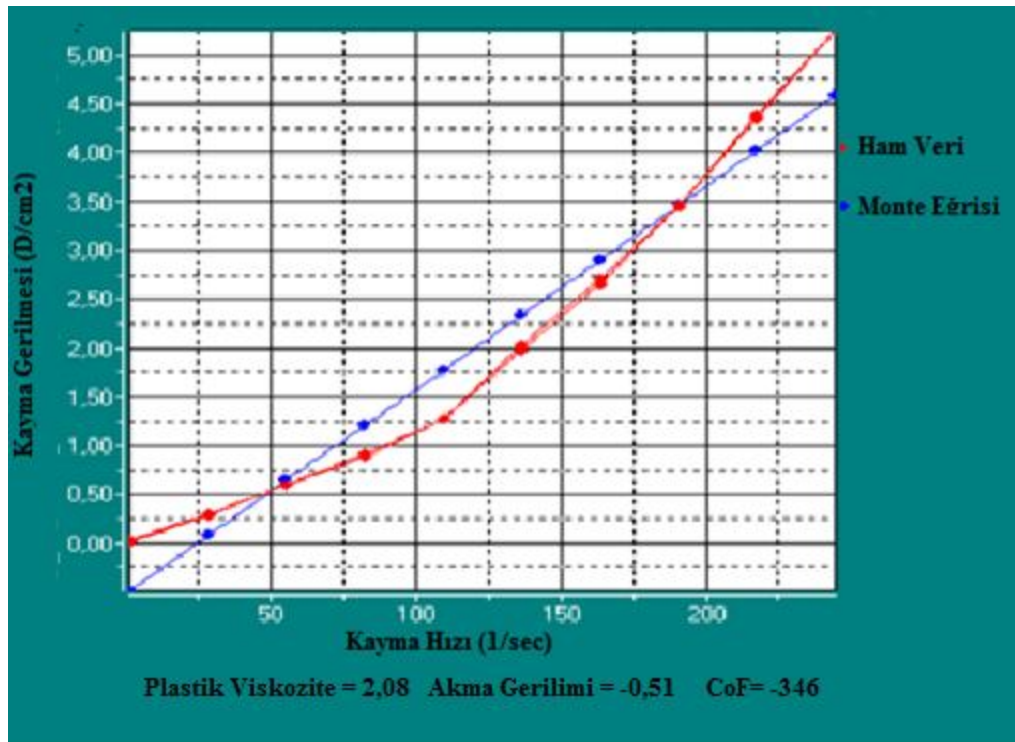
τ = Kayma gerilmesi (dyne/cm²)

τ_0 = Başlangıç akma gerilmesi (dyne/cm²)

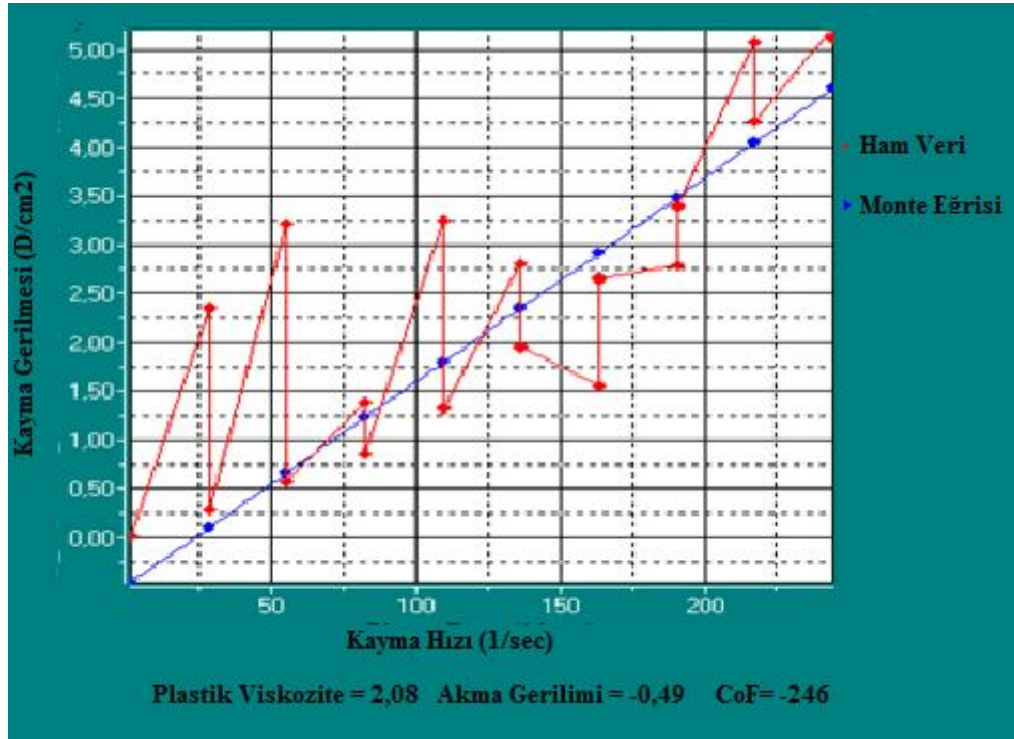
η_p = Plastik viskozite (cP)

γ = Kayma hızı (s⁻¹)

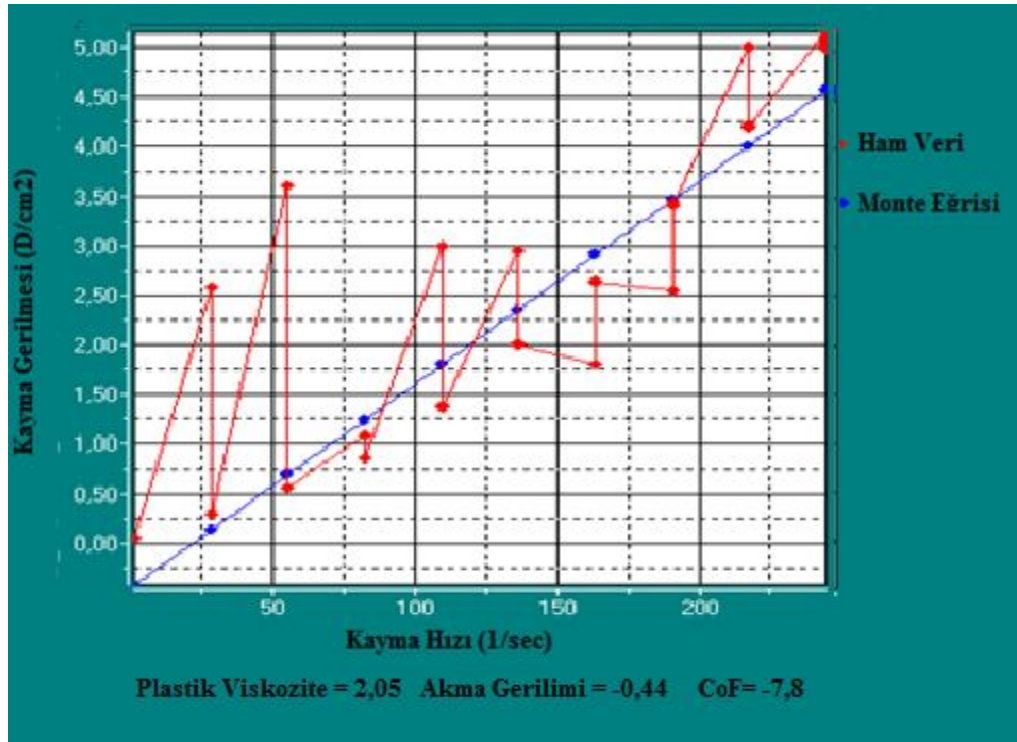
Şekil 4.26-4.33'de farklı katı konsantrasyonlarındaki çamur numunelerinin Bingham matematiksel modeline uygunlukları gösterilmiştir.



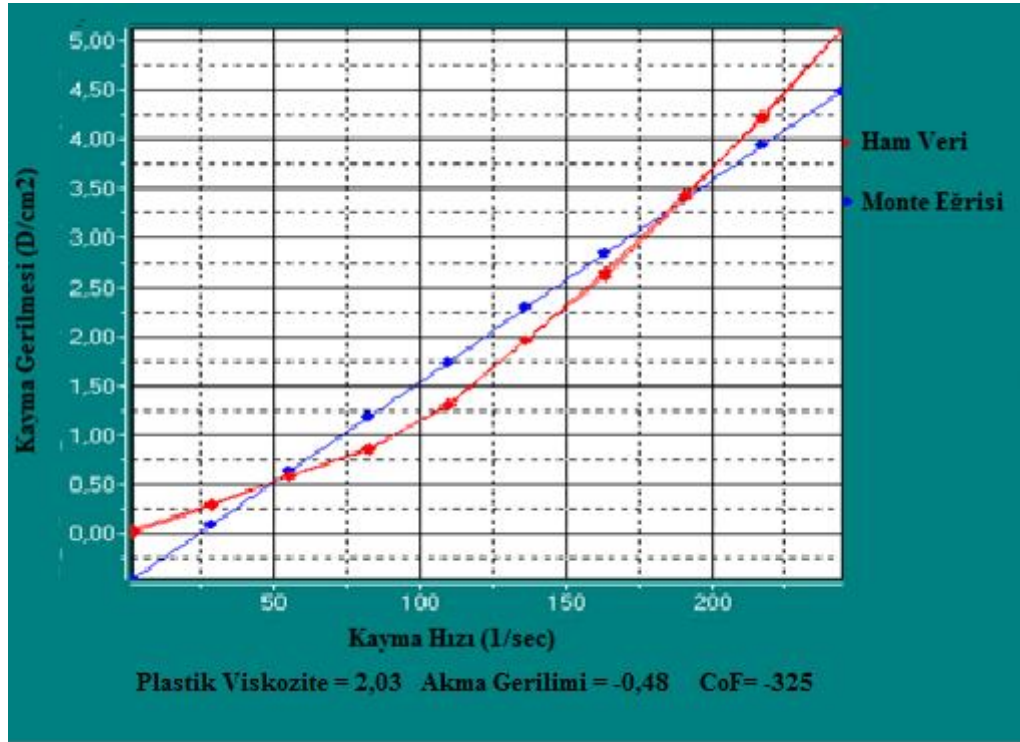
Şekil 4.26. N1 çamur numunesinin Bingham Modeline göre reogramı



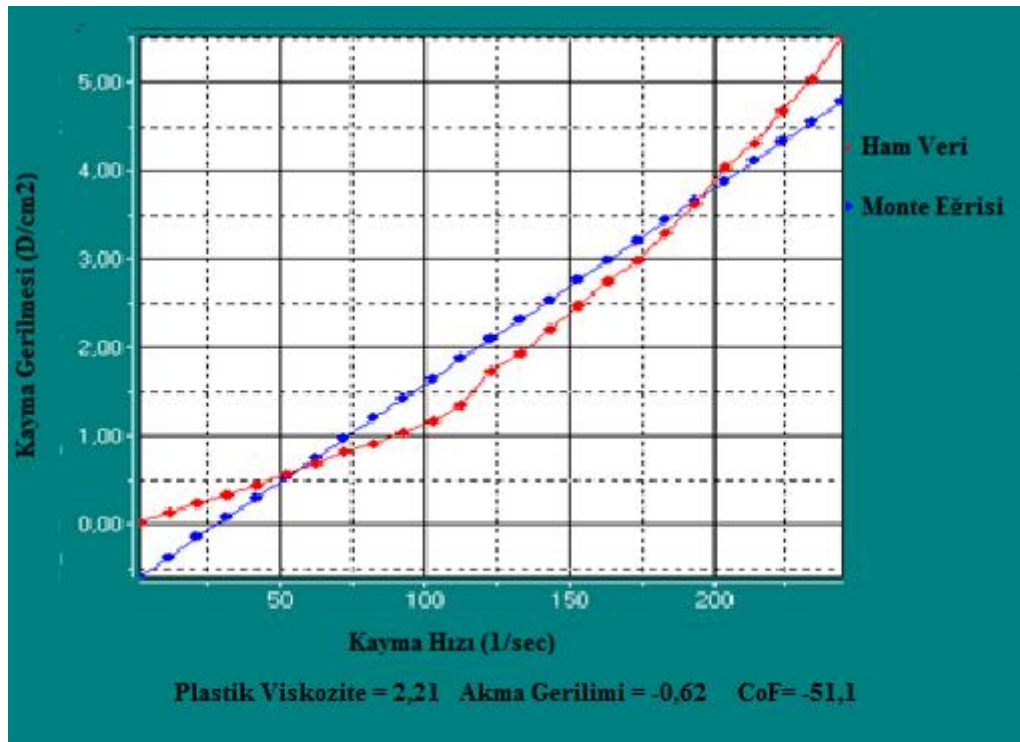
Şekil 4.27. N2 çamur numunesinin Bingham Modeline göre reogramı



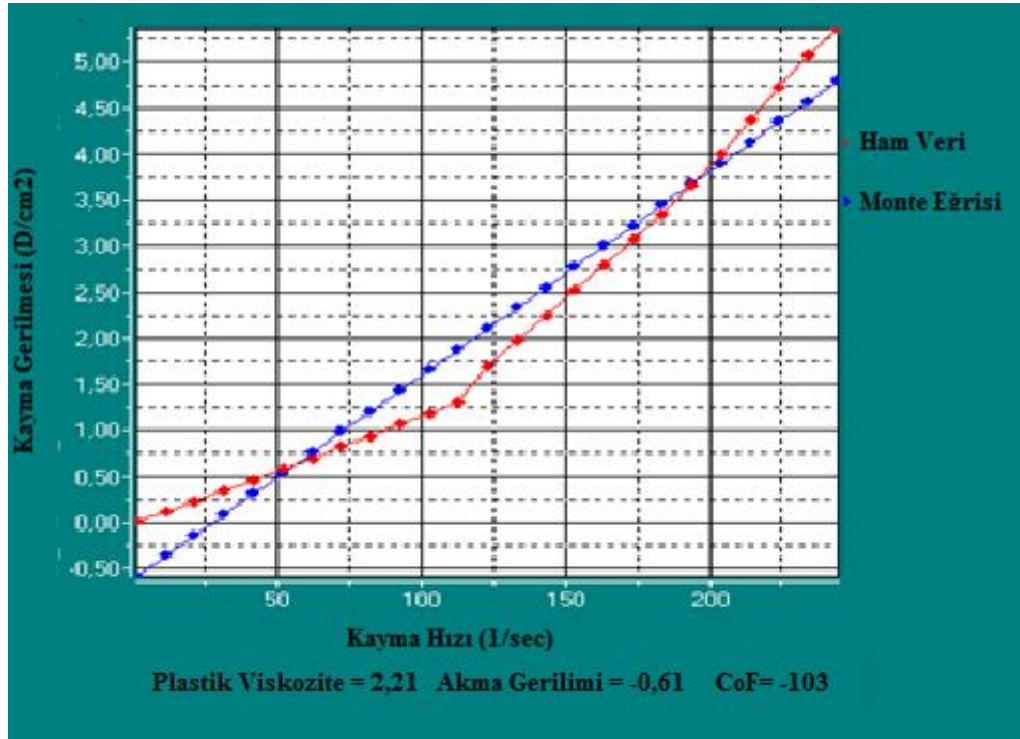
Şekil 4.28. N3 çamur numunesinin Bingham Modeline göre reogramı



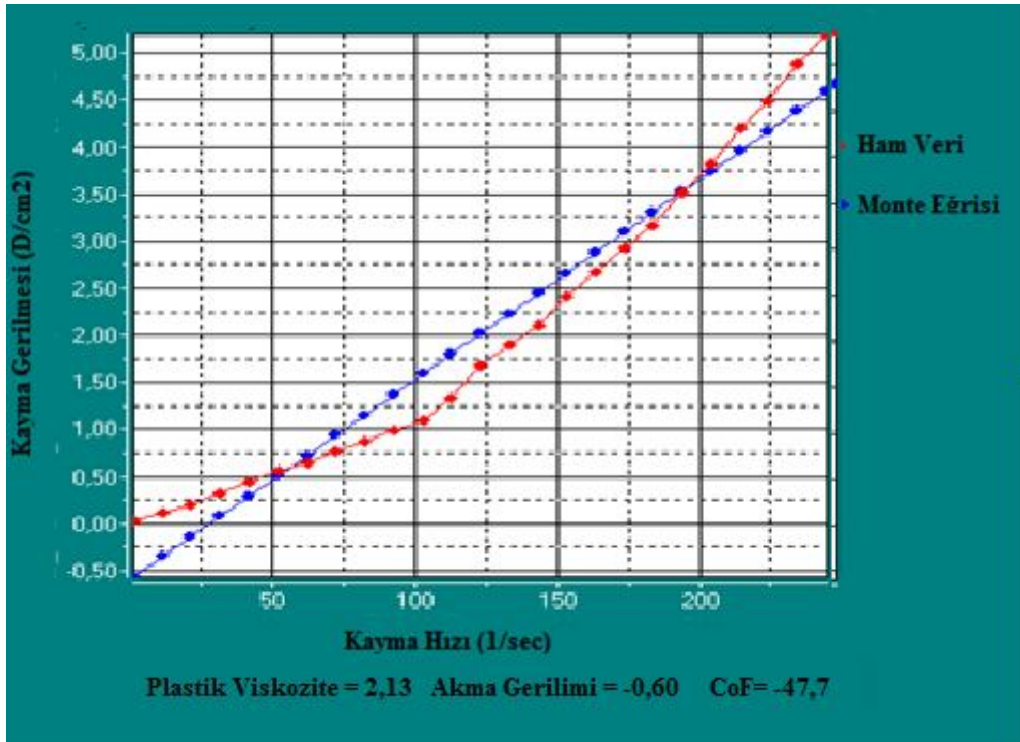
Şekil 4.29. N4 çamur numunesinin Bingham Modeline göre reogramı



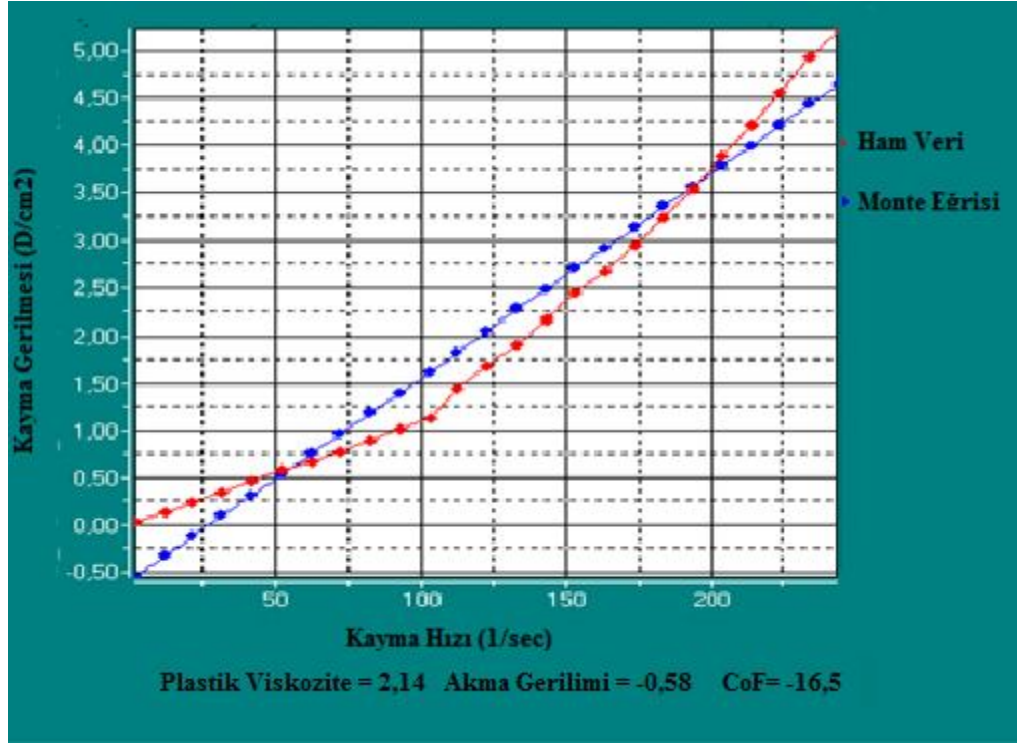
Şekil 4.30. NT1 çamur numunesinin Bingham Modeline göre reogramı



Şekil 4.31. NT2 çamur numunesinin Bingham Modeline göre reogramı



Şekil 4.32. NT3 çamur numunesinin Bingham Modeline göre reogramı



Şekil 4.33. NT4 çamur numunesinin Bingham Modeline göre reogramı

Şekil 4.26-4.33'de çamur numunelerine uygulanan artan kayma hızı değerleri sonucunda kayma gerilmelerinde artış gerçekleşmiş ve elde edilen bütün reogramların, ideal Bingham Plastik modeline uygun olmadığı anlaşılmıştır.

AnMBR'den alınan çamur numunelerinin Bingham reolojik modeli parametre değerleri ve model uygunlukları Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. SANMBR alınan çamur numunelerinin Bingham Model parametreleri ve uygunlukları

Çamur numunesi	PV*	τ_0	R^2
N1	2,08	0,51	0,346
N2	2,08	0,49	0,246
N3	2,05	0,44	0,078
N4	2,03	0,48	0,325
NT1	2,21	0,62	0,511
NT2	2,21	0,63	0,103
NT3	2,13	0,60	0,477
NT4	2.14	0,58	0,165

*PV : plastik vizkozite, cP

4.2.1.4. Herschel-Bulkley Modeli

Herschel-Bulkley modelinin matematiksel ifadesi aşağıda tanımlanmıştır. Görüleceği üzere denklem, Power Law ve Bingham model ifadelerinin kombinasyonundan oluşmaktadır.

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \gamma^n \quad (4.4)$$

Burada:

τ = Kayma gerilmesi (dyne/cm²)

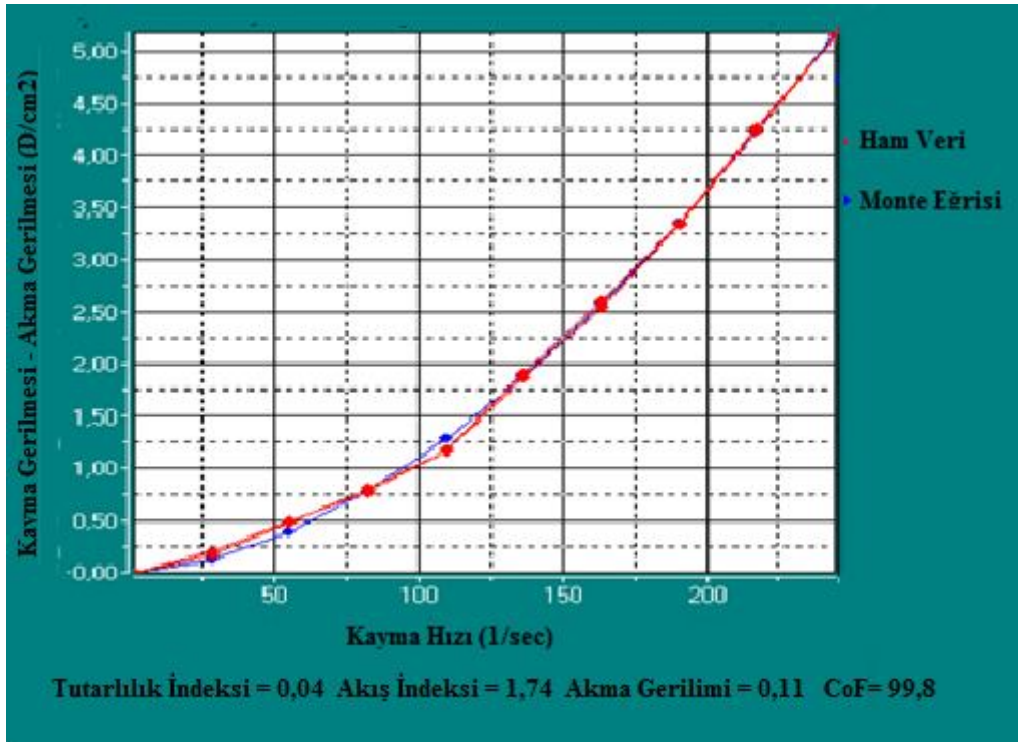
τ_0 = Başlangıç akma gerilmesi (dyne/cm²)

γ = Kayma hızı (s⁻¹)

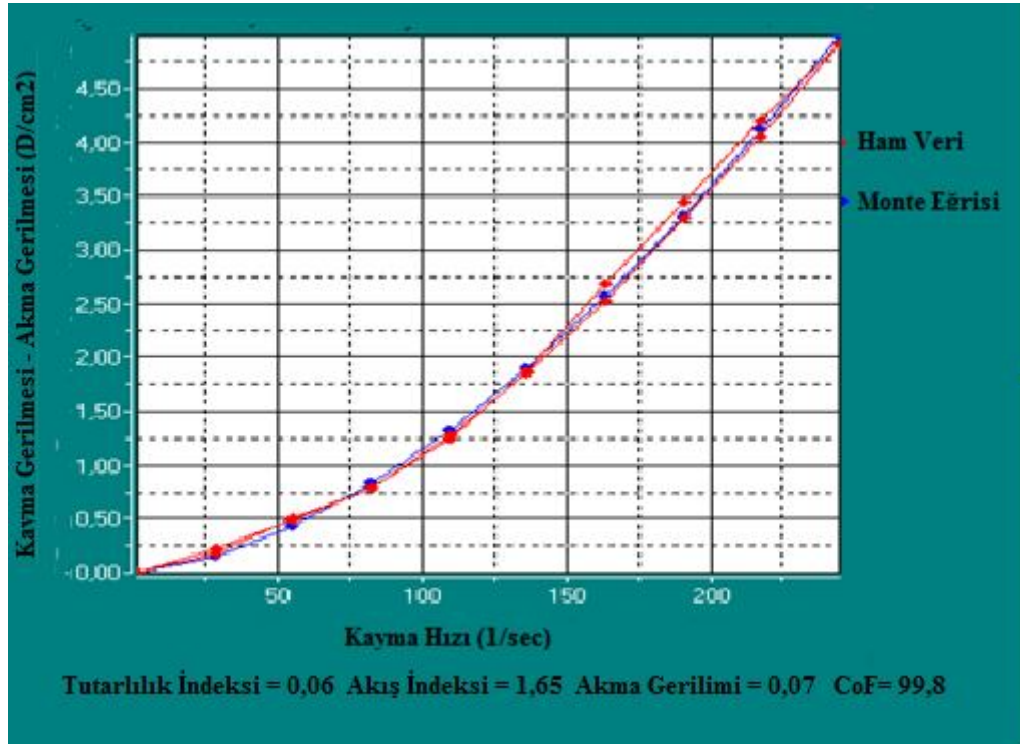
k = Akışkanlık katsayısı

n = Akış davranış indeksi

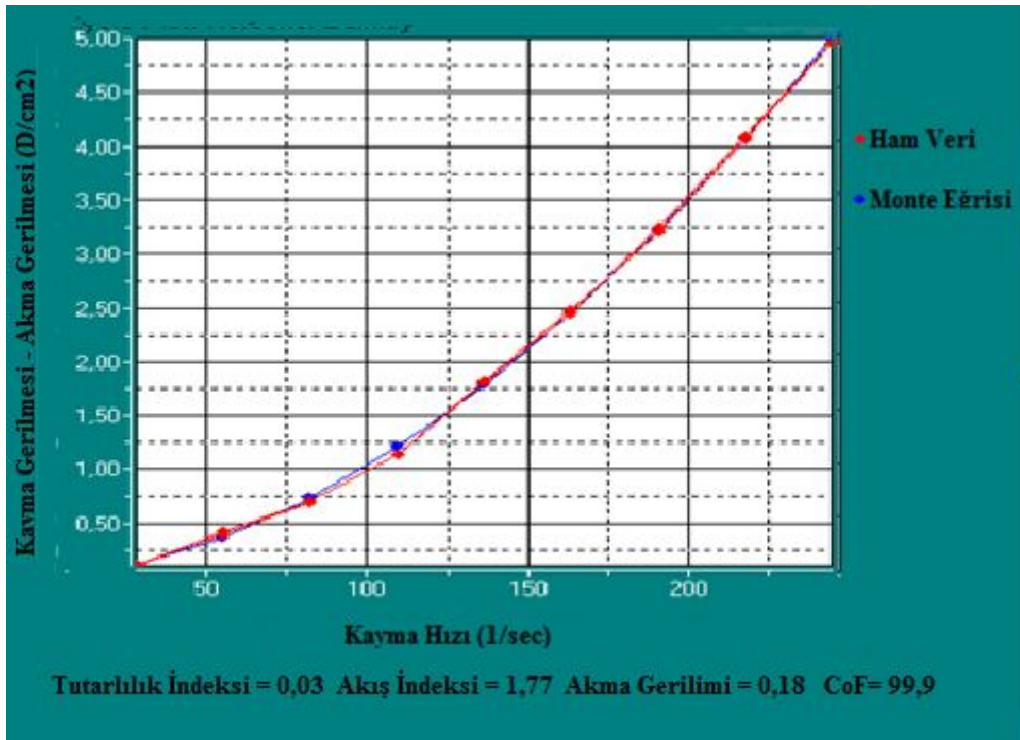
Şekil 4.34-4.41'de SAnMBR sisteminden alınan çamur numunelerinin Herschel-Bulkley modeline uygunlukları gösterilmiştir.



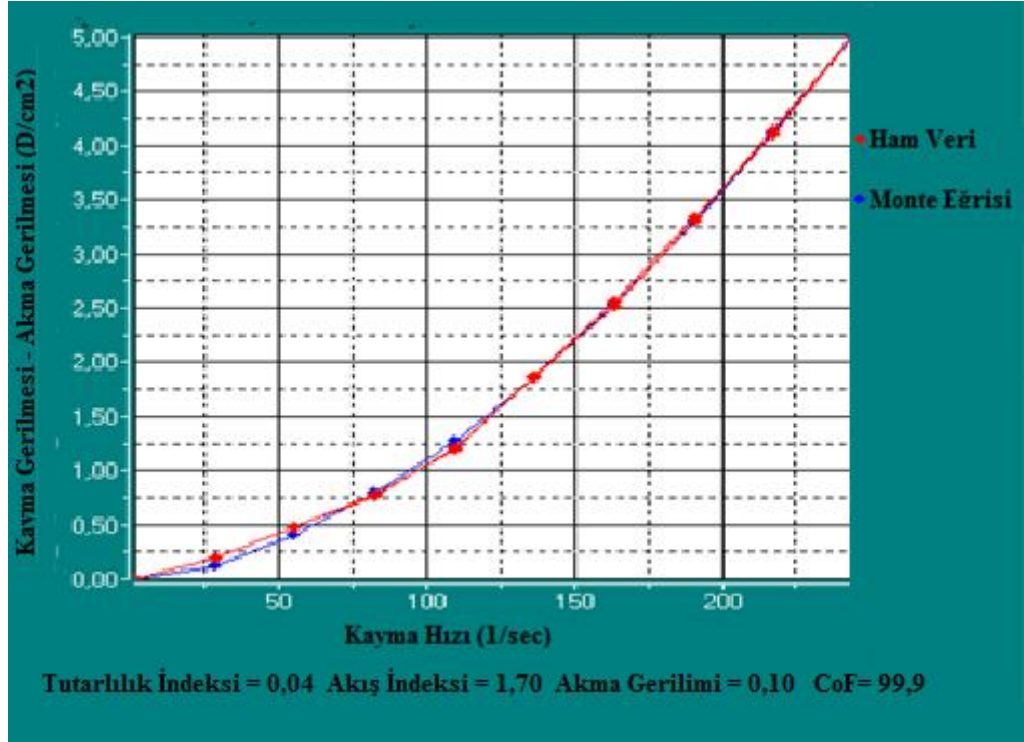
Şekil 4.34. N1 çamur numunesinin Herschel Bulkley Modeline göre reogramı



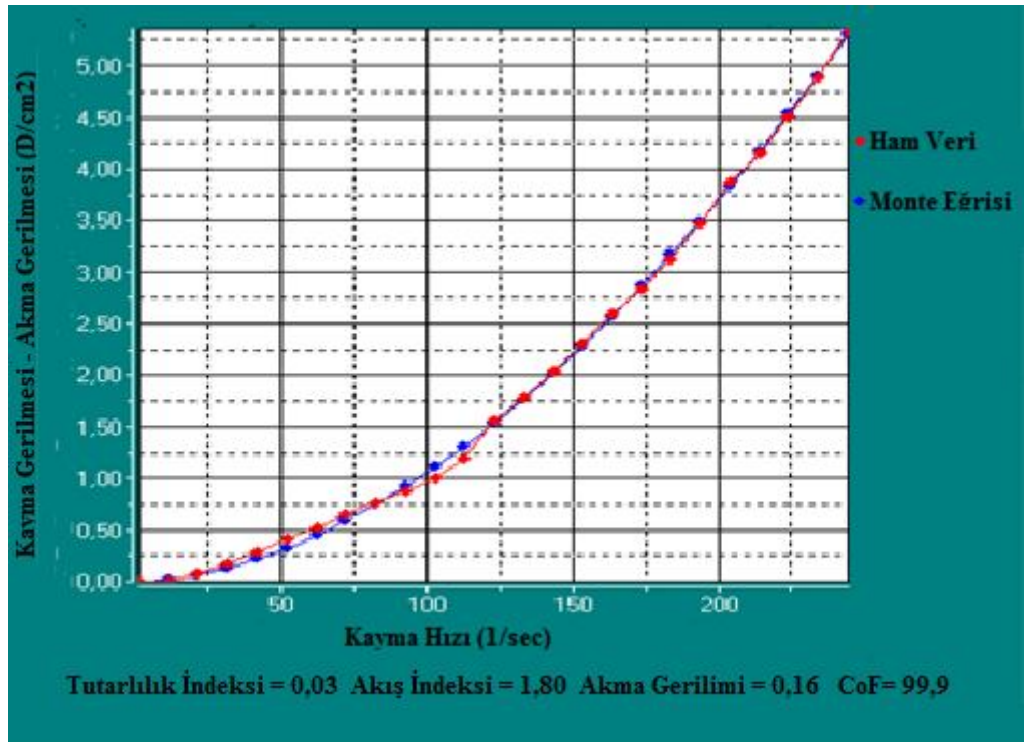
Şekil 4.35. N2 çamur numunesinin Herschel Bulkey Modeline göre reogramı



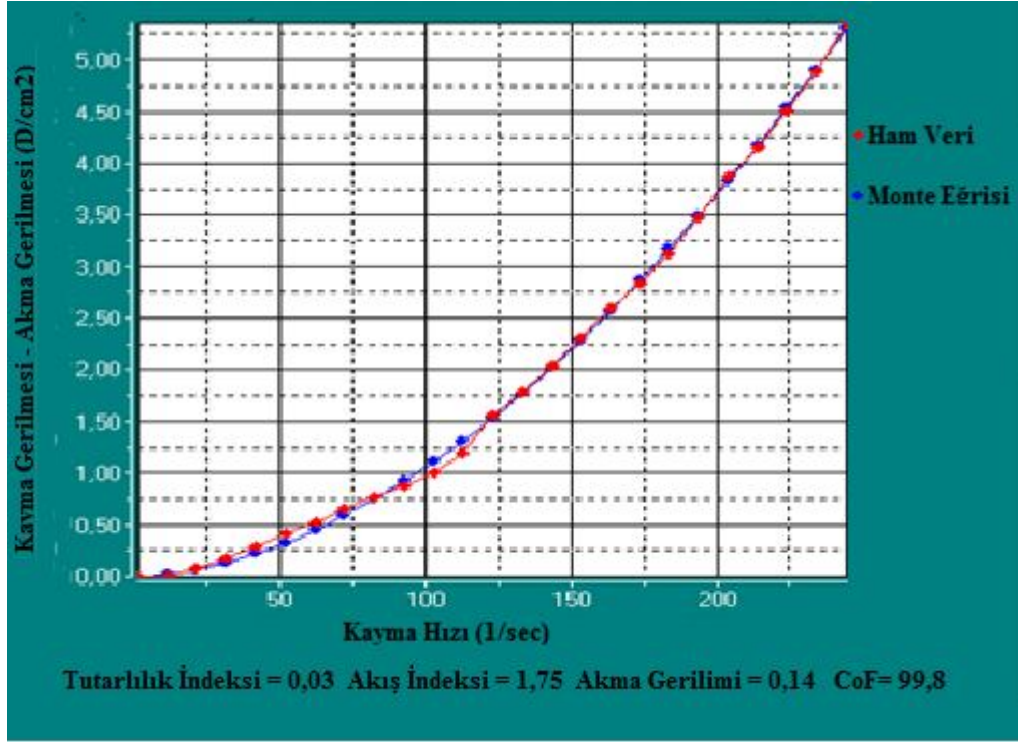
Şekil 4.36. N3 çamur numunesinin Herschel Bulkey Modeline göre reogramı



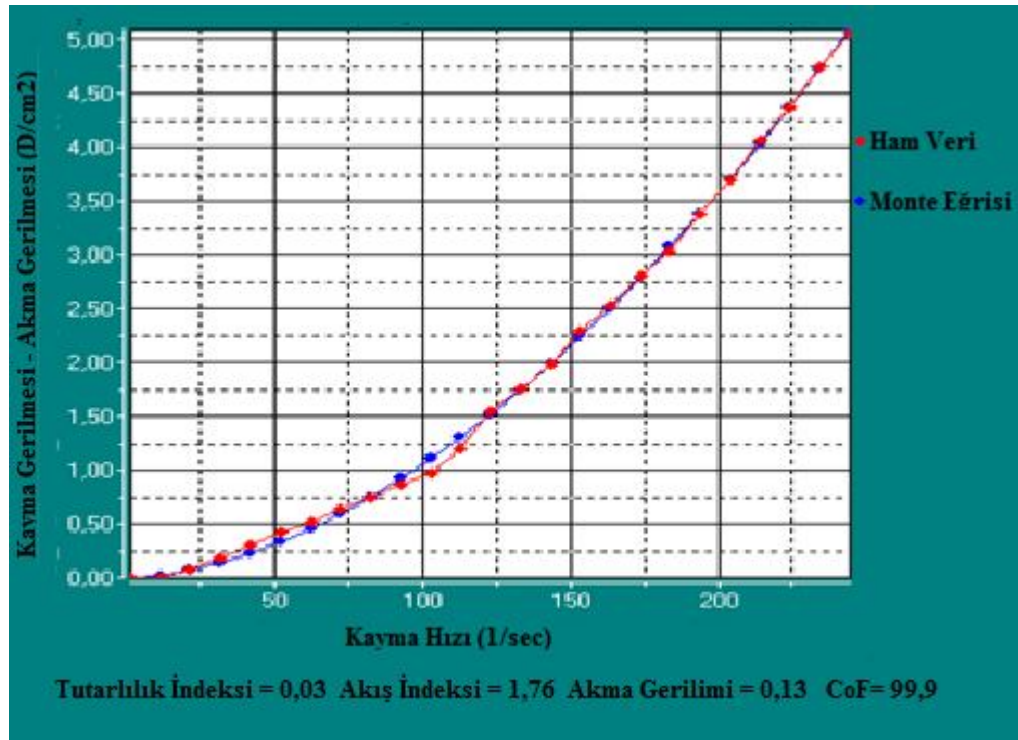
Şekil 4.37. N4 çamur numunesinin Herschel Bulkey Modeline göre reogramı



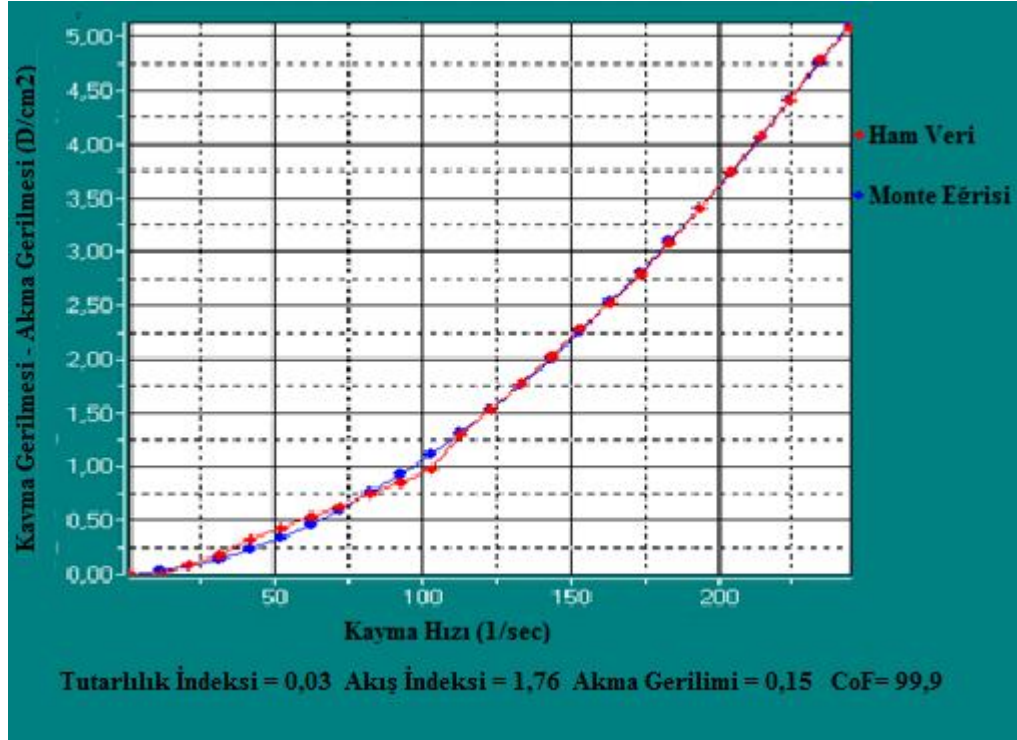
Şekil 4.38. NT1 çamur numunesinin Herschel Bulkey Modeline göre reogramı



Şekil 4.39. NT2 çamur numunesinin Herschel Bulkey Modeline göre reogramı



Şekil 4.40. NT3 çamur numunesinin Herschel Bulkey Modeline göre reogramı



Şekil 4.41. NT4 çamur numunesinin Herschel Bulkey Modeline göre reogramı

Tüm SAnMBR numunelerinin model eğrileri belirli bir akma gerilmesi noktasından başlamaktadır. Bu noktaların değerleri numunelerin katı madde içeriğiyle orantılıdır. Her bir numuneye uygulanan artan kayma hızları sonucunda kayma gerilmesi değerlerinde artış gözlemlenmektedir. Bu nedenle Herschel-Bulkley modeli tüm numunelerde tam anlamıyla sonuç vermiştir.

SAnMBR'den farklı zamanlarda alınan ve farklı katı madde konsantrasyonlarındaki çamur numunelerinin Herschel-Bulkley matematiksel modeli parametreleri ve uygunlukları Tablo 4.5'de verilmiştir.

Tablo 4.5. SAnMBR alınan çamur numunelerinin Herschel-Bulkley Model parametreleri ve uygunlukları

Çamur numunesi	k	n	τ_0	R^2
N1	0,04	1,74	0,11	0,998
N2	0,06	1,65	0,07	0,998
N3	0,03	1,77	0,18	0,999
N4	0,03	1,70	0,10	0,999
NT1	0,03	1,80	0,16	0,999
NT2	0,03	1,75	0,14	0,998
NT3	0,03	1,76	0,15	0,999
NT4	0,03	1,76	0,15	0,999

Tablo 4.5. incelendiğinde, katı madde konsantrasyonları yüksek olan çamur numunelerinin akma gerilmeleri, akışkanlık katsayıları ve dolayısıyla da viskozite değerlerinin de yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca numunelerin akış davranış indeksleri 1'den büyük olduğu için çamurların Newtonian olmayan akış karakterine sahip olduğu söylenebilir. Numunelere uygulanan artan kayma hızı değerleri sonucunda kayma gerilmelerinde artış görülmektedir. Bu durum çamur numunelerinin gerçek plastik akış davranışına sahip olduğunun bir göstergesidir.

4.2.1.5. NCA/CMA Casson Modeli

$$(1 + a)\sqrt{\tau} = 2\sqrt{\tau_0} + (1 + a)\sqrt{(\eta \cdot \gamma)} \quad (4.5)$$

Burada:

τ = Kayma gerilmesi (dyne/cm²)

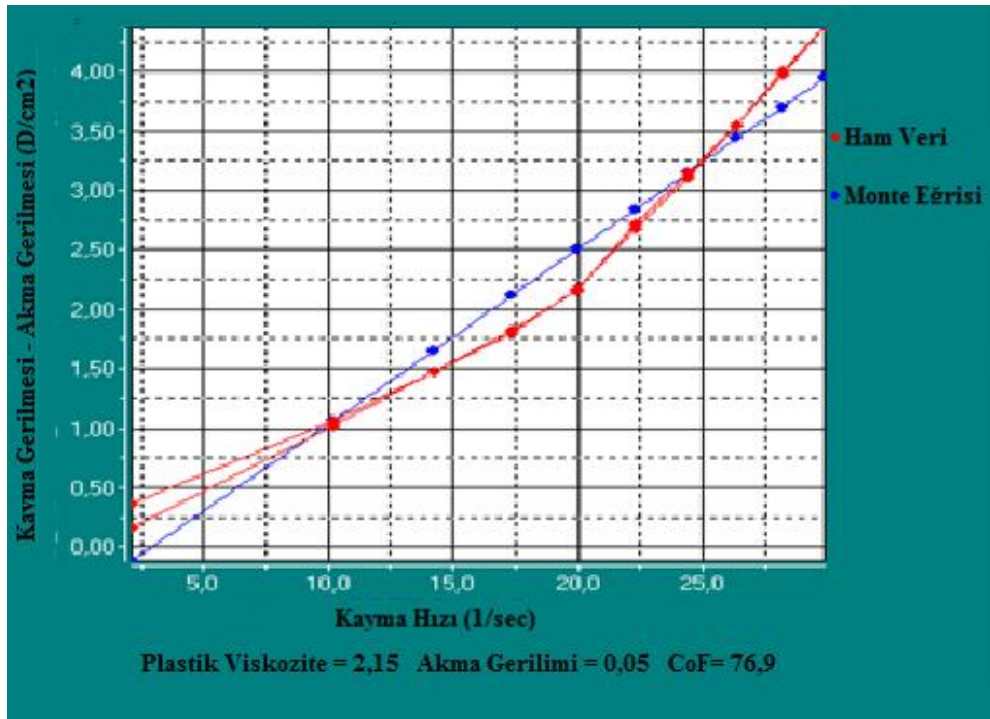
τ_0 = Başlangıç akma gerilmesi (dyne/cm²)

η = Viskozite (cP)

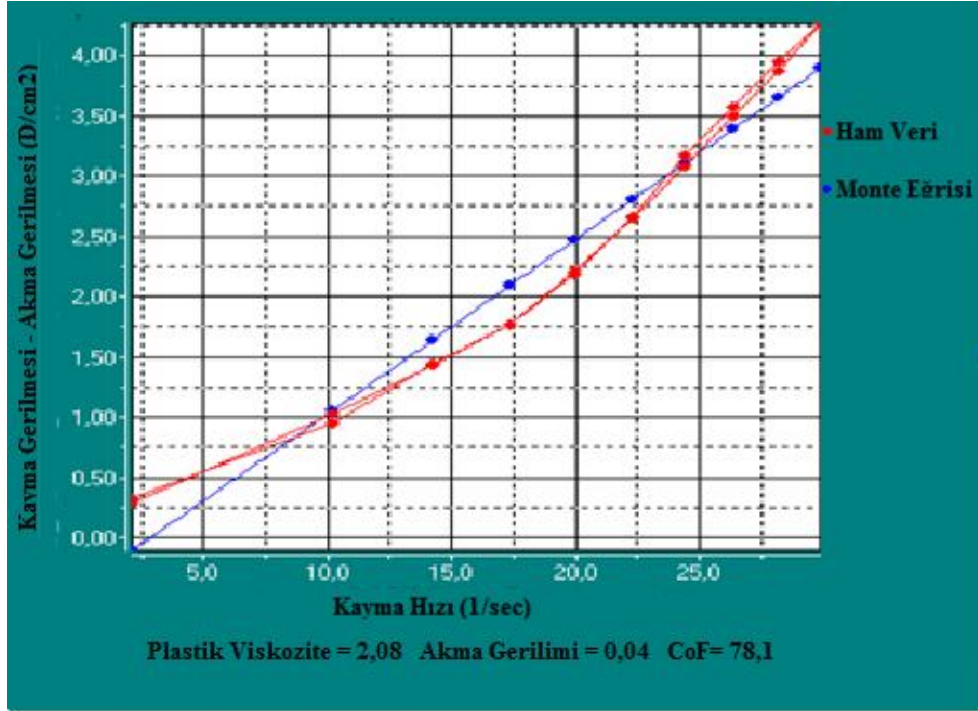
γ = Kayma hızı (s⁻¹)

a = Kabul oranı

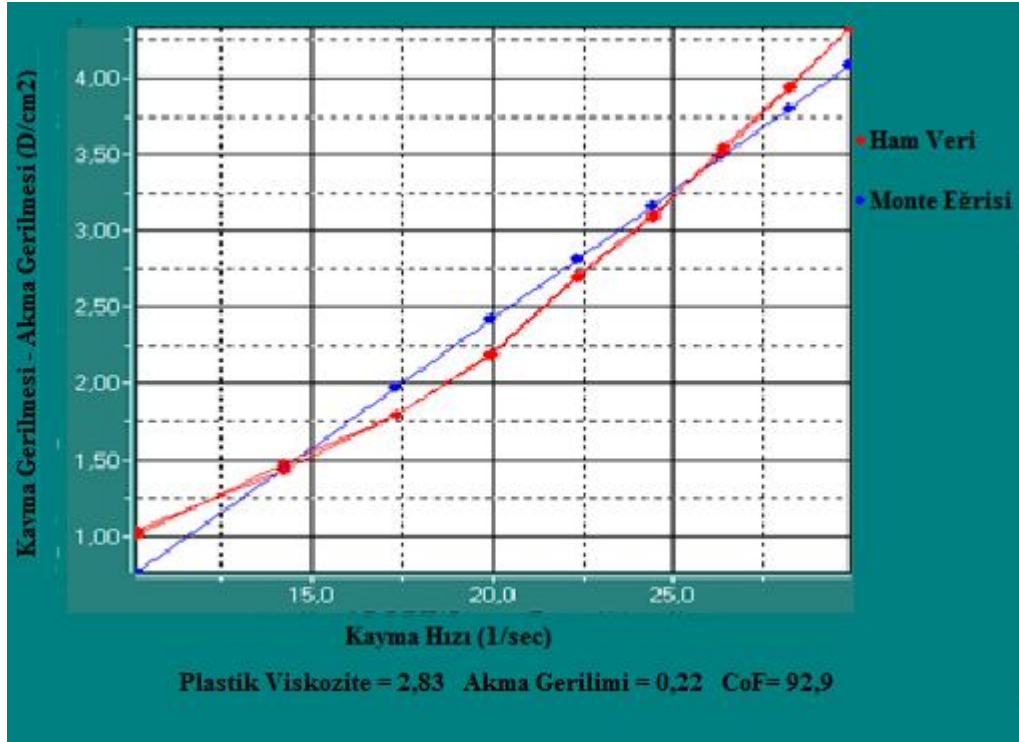
SAnMBR sisteminden alınan farklı çamur numunelerinin NCA/CMA Casson matematiksel modeline uygunlukları Şekil 4.42-4.49'da gösterilmiştir.



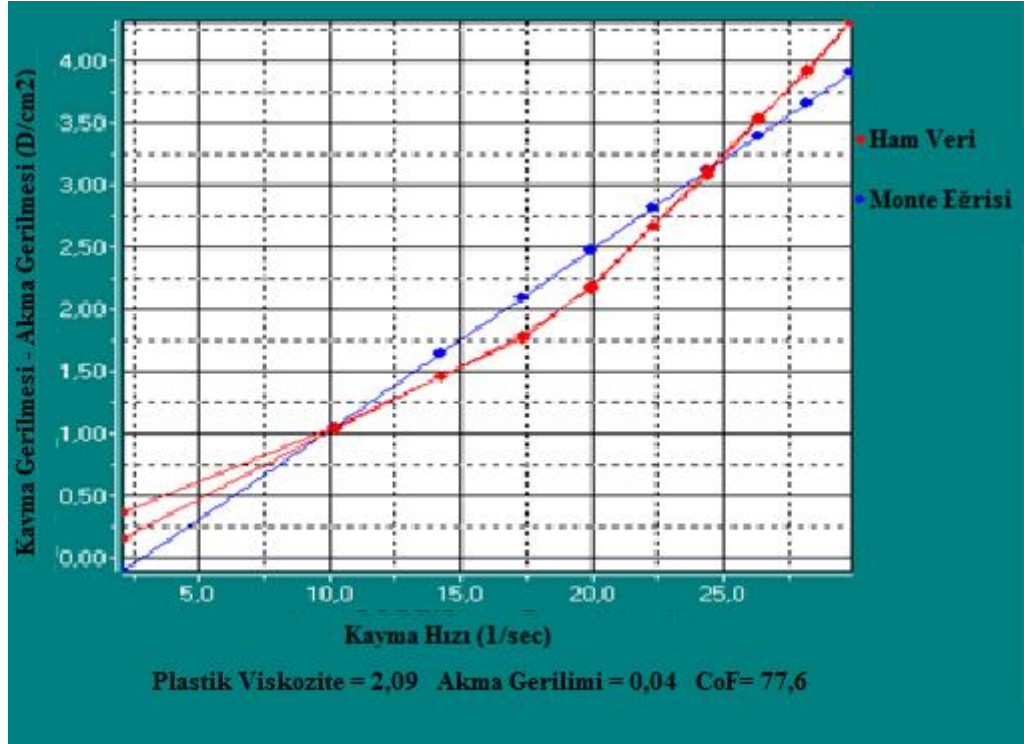
Şekil 4.42. N1 çamur numunesinin NCA/CMA Casson Modeline göre reogramı



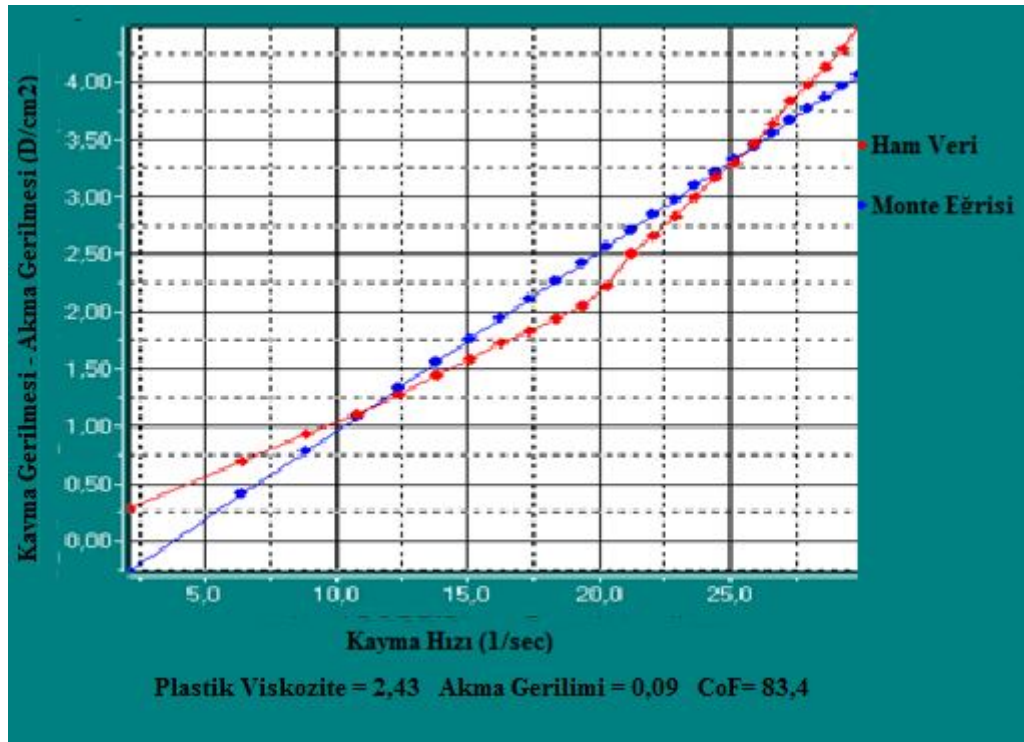
Şekil 4.43. N2 çamur numunesinin NCA/CMA Casson Modeline göre reogramı



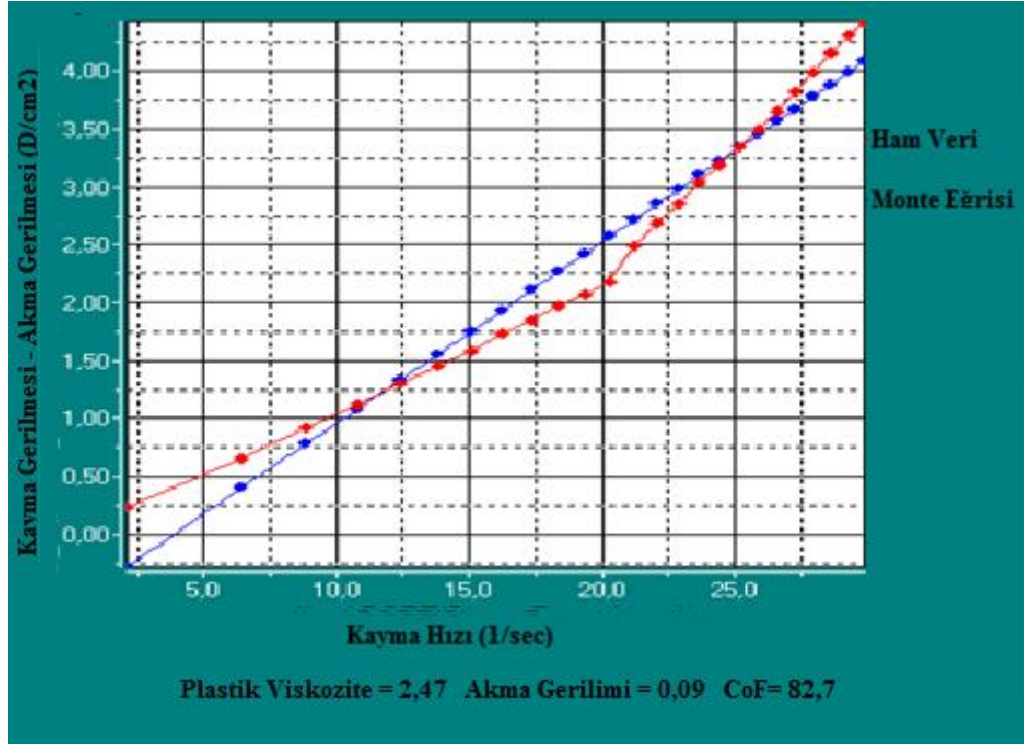
Şekil 4.44. N3 çamur numunesinin NCA/CMA Casson Modeline göre reogramı



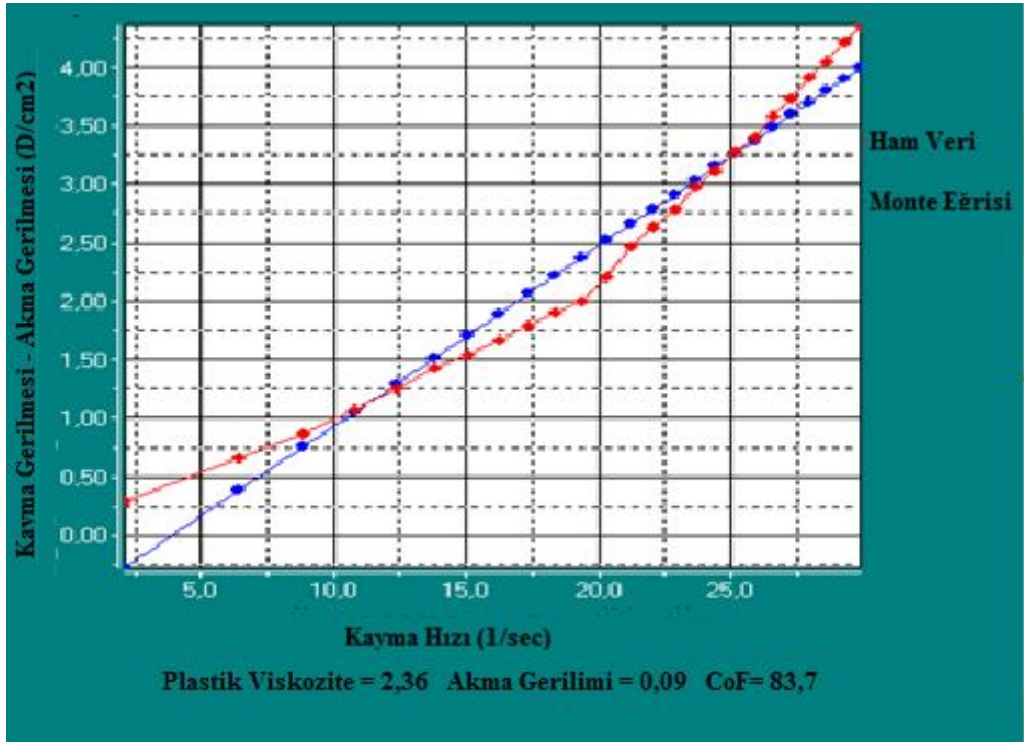
Şekil 4.45. N4 çamur numunesinin NCA/CMA Casson Modeline göre reogramı



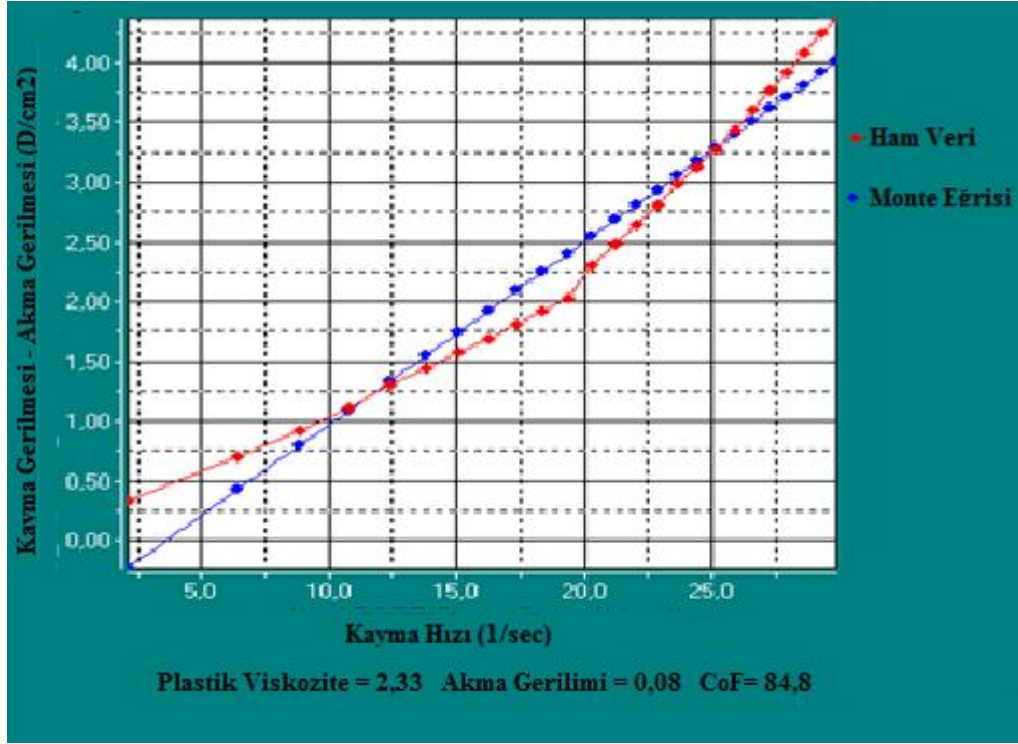
Şekil 4.46. NT1 çamur numunesinin NCA/CMA Casson Modeline göre reogramı



Şekil 4.47. NT2 çamur numunesinin NCA/CMA Casson Modeline göre reogramı



Şekil 4.48. NT3 çamur numunesinin NCA/CMA Casson Modeline göre reogramı



Şekil 4.49. NT4 çamur numunesinin NCA/CMA Casson Modeline göre reogramı

Çamur numunelerinin içerdiği katı madde miktarlarındaki artışla birlikte akma gerilmeleri ve plastik viskozite değerlerinde de artışın olduğu gözlenmektedir. Modelin regresyon katsayısına bakıldığında ise bu değerin düşük olduğu görülmekte, bu nedenle NCA/CMA Casson modelinin çamurun reolojik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılamayacağı Tablo 4.6'dan anlaşılmaktadır.

Modelin regresyon katsayıları göz önünde bulundurulduğunda N3 çamur numunesi hariç, R^2 değerleri yeterince yüksek olmayıp, model hata sonuçları yüksektir. Bu nedenle Casson matematiksel modelinin, numuneler arasında N3 numaralı SAnMBR çamurunun karakteristiğinin belirlenmesinde daha belirgin olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 4.6. SAnMBR alınan çamur numunelerinin NCA/CMA Casson Model parametreleri ve uygunlukları

Çamur numunesi	PV*	τ_0	R^2
N1	2.15	0.04	0,769
N2	2,08	0.05	0,781
N3	2.83	0.22	0,929
N4	2,09	0,04	0,776
NT1	2,43	0,08	0,834
NT2	2,47	0,09	0,827
NT3	2,36	0,09	0,837
NT4	2,33	0,08	0,848

*PV : plastik vizkozite, cP

5. SONUÇLAR

Tez kapsamında yapılan çalışmaların sonuçları aşağıda belirtilmiştir:

- Zamana bağlı olarak yapılan reolojik ölçümlerde, sabit kayma hızlarında çamur numunelerinin zamana karşı nasıl bir reolojik davranış sergiledikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda araştırmalar sonucunda hem sentetik atıksularla hem de tavuk kesimhanesi atıksularıyla yapılan çalışmalarda alınan tüm numunelerin zamana karşı belirgin bir reolojik özellik taşıdığı anlaşılmıştır.
- Çamur numunelerinin kayma hızına bağlı olarak gösterecekleri reolojik davranışın belirlenmesi için numunelere tek yönlü olarak artan ve azalan kayma hızları uygulanmıştır. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda alınan çamur numunelerindeki ölçümler sonucunda viskozite değerlerinin düşük kayma hızı değerlerinde öncelikle azaldığı, sonra yüksek kayma hızlarında arttığı, kayma hızındaki düşüşle birlikte viskozitenin tekrar eski seviyesine ulaştığı ve bu nedenle numunelerin Newtonian olmayan bir akış özelliğine sahip oldukları anlaşılmıştır. Benzer durum tavuk kesimhanesi atıksularıyla yapılan çalışmalardaki çamur numuneleriyle de ortaya çıkmasına karşın, bu numunelerde azalan kayma hızlarında viskozite değeri düşmüştür. Ancak numunelerin akış davranış indekslerinin (n) 1'e eşit olmaması, tüm akışkanların Newtonian olmadıklarının kanıtıdır. Ayrıca sabit kayma hızlarındaki viskozite küçükte olsa değişmektedir. Bu durum, aynı zamanda viskozitenin zamana göre değiştiğini ve akış profillerinin reolojik davranış olarak tanımlanabileceğini göstermektedir.
- Elde edilen reolojik bulgular mevcut beş matematiksel modele (Power Law, Casson, Bingham, Herschel-Bulkley ve NCA/CMA Casson) uygulanmış ve hangi modelin farklı karakterizasyonlardaki çamur numunelerinden reolojik özelliğinin belirlenmesinde daha etkin olduğu saptanmıştır. Buna göre tüm numunelerde, Herschel-Bulkley Modeli'nin en uygun sonucu verdiği anlaşılmıştır.
- Matematiksel modellerde tanımlanan ve numunelerin reolojik özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol oynayan viskozite (η), akma gerilimi (τ_0), akışkanlık katsayısı (k) ve akış davranış indeksi (n) ile çamurun katı madde içeriği arasındaki ilişki araştırılmıştır. Bunun sonucunda numunenin katı madde konsantrasyonundaki artışla akma gerilimi, akışkanlık katsayısı ve viskozite değerlerinde de artış olduğu, akış davranış indeksinde ise azalma olduğu belirlenmiştir.

- Bu çalışmanın sonucunda elde edilen bilgilere dayanılarak çamurun reolojik özelliklerinden, çamurun nasıl bir reolojik davranış göstereceğini belirleyerek, mevcut arıtma tesislerinin geliştirilmesinde ve özellikle arıtma tesisinin çamur susuzlaştırma ve yoğunlaştırma ünitelerinin iyileştirilmesinde faydalanılabilmektedir.

KAYNAKLAR

- Akdemir, Z.B.**, 2006. Kil-Su Kolloidal Süspansiyonlarının Organik ve İnorganik Dispersantlar Varlığında Reolojik Özelliklerinin İncelenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 110s., Afyon.
- Alvarez, M.J.**, 2003. Biomethanization of The Organic Fraction Of Municipal Solid Wastes, pp. 1-43, Iwa Publishing, London.
- Alemdar A.**, 2001. Bentonit ve Montmorillonit Dispersiyonlarının Reolojik Viskoelastik, Kolloidal Özellikleri Üzerine Organik ve İnorganik Tuzların Etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, 111 s., İstanbul.
- Barnes, H.A.**, Hutten, J.F., Walters, K., 1989. "An Introduction to Rheology", Rheology Series-3. Elsevier Science, Amsterdam.
- Bartos, P.**, 1992. Fresh Concrete Properties and Tests. Elsevier Science Publisher, 291s., Amsterdam.
- Civelekoglu, G., Kalkan, F.C.**, 2010. Rheological characterization of biological treatment sludges in a municipal wastewater treatment plant. Water Environment Research, 82(9), 782-789.
- Dentel, S.K., Abu-Orf, M.M., Walker, C.A.**, 2000. Optimization of slurry flocculation and dewatering based on electrokinetic and rheological phenomena. Chemical Engineering Journal. 80, 65-72.
- Dick, R.I.**, 1986. Rheology of Biological Wastewater Suspensions. Report prepared for National Science Foundation, NSF/ENG-86044, Washington, DC, USA. 126 pp.

Dinger, D.R., 2002. "Rheology for Ceramist". Dinger Ceramic Consulting Services .

Eastman, J.A., Ferguson, J.G., 1981. Solubilization of particulate organic carbon during the acid phase of anaerobic digestion. Journual of. Water Pollution. Control Federation. 53, 352.

Hasar, H., Kınacı, C., Ünlü, A., Toğrul, H., İpek, U., 2004. Rheological properties of activated sludge in a SMBR. Biochemical Engineering Journal, 20, (1), 1-6.

Hulshoff Pol, L.W., De Castro lopes S.I., lettinga G., and Lens P.N., 2004, Anaerobic Sludge Granulation. Water Res. 38, 1376-1389.

Judd, S.J., 2002. The Development of the Membrane Bioreactor Technology for Sewage Treatment in the UK. School of Water Sciences, Cranfield University, UK.

Kaleli, B., 2006. Atıksuların İleri Arıtımında Membran Proseslerinin Kullanımının Araştırılması. İstanbul Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 92 s, İstanbul.

Kalkan, F. C., 2010. Arıtma Çamurlarında Reolojik Karakterizasyonun Belirlenmesi, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, 93 s., Isparta

Kaya, Y., Barlas, H., 2003. Kimya endüstrisinde atık yönetimi amaçlı membran uygulamaları. XVII. Ulusal Kimya Kongresi 386, 8-11 Eylül, İstanbul.

Krylow M., Fryzlewicz-Kozak, B., 2007. Rheological Properties Of Wastewater Sludge, Integration and optimisation of urban sanitation systems. E. Plaza, E. Levlin, (Editors) TRITA LWR.REPORT 3018, ISSN 1650 8610, ISRN KTH/LWR/REPORT 3018-SE, ISBN 978-91-7178-826-9.

- Laera, G., Giordano, C., Pollice, A., Saturno, D., Minini, G., 2007.** Membrane bioreactor sludge rheology at different solid retention times. *Water Research*, 41 (18), 4197-4203.
- Lolito, V., Spinoso, L., Mininni, G., Antonacci, R., 1997.** The rheology of sewage sludge at different steps of treatment. *Water Science and Technology*. 36 (11), 79-85.
- Mart, U., 2002.** İnorganik Elektrolitler Varlığında Sepiyolitin Reolojik Özellikleri. İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 140s, İstanbul.
- Moeller, G., L.G. Torres., 1997.** Rheological characterization of primary and secondary sludges treated by both aerobic and anaerobic digestion. *Bioresource Technology*. 61 207-211.
- Mu, Y. ve Yu,H.-Q., 2006.** Rheological and fractal characteristics of granularsludge in an upflow anaerobic reactor *Water Research* 40,3596–3602.
- Mulder, M., 1996.** Basic principles of membrane technology. Kluwe Academic Publisher, 0-7923-4248-8. Netherlands.
- Özkul, H., Sağlam, A.R., 2002.** Süper Akışkanlaştırıcı ve Mineral Katkıların Betonun Reolojik Özelliklerine Etkisi. TÜBİTAK Proje No: İNTAG-655, 169 s., Ankara.
- Sanin, F. D., 2002.** Effect of solution physical chemistry on the rheological properties of activated sludge. ISSN 0378-4738 *Water SA* Vol. 28 No. 2.
- Van Olphen, H., 1977.** Clay Colloid Chemistry: 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 318 pp.

- Yasui, H., Shibata, M.,** 1994. An innovative approach to reduce excess sludge production in the activated sludge process. *Water Science and Technology*, 30, 9, 11-20.
- Yen, P.S., Chen, L.C., Chien, C.Y., Wu, R.M., Lee, D.J.,** 2002. Network strength and dewaterability of flocculated activated sludge. *Water Research*,. 36 (3),539-550.
- Yılmaz, R.,** 2007. Viskoz Malzemelerin Akısı ve Modellenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 154s, İstanbul
- Zhichao Wu.,** 2006. Relationship between sludge characteristics and membrane flux determination in submerged membrane bioreactors. 87-94, China.

ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında ELAZIĞ' da doğmuştur. 2003 yılında Balakgazi Lisesi'nden mezun olmuştur. 2004 yılında Fırat Üniversitesi Çevre Mühendisliği, bölümünü kazanmış ve 2009 yılında bu bölümden mezun olmuştur. 2009 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Bilimleri Programı'nda tezli yüksek lisansına başlamıştır.