



T.C.
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**JEOTERMAL SULARLA HAZIRLANMIŞ ÇAMURLARIN SONDAJ
PERFORMANSINA ETKİSİ**

EMİNE AVCI

PETROL VE DOĞALGAZ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HATAY
OCAK-2018

T.C.
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**JEOTERMAL SULARLA HAZIRLANMIŞ ÇAMURLARIN SONDAJ
PERFORMANSINA ETKİSİ**

EMİNE AVCI

PETROL VE DOĞALGAZ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HATAY
OCAK-2018


T.C.
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
PETROL VE DOĞALGAZ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tezin Adı: Jeotermal Sularla Hazırlanmış Çamurların Sondaj Performansına Etkisi
Öğrencinin, Adı Soyadı: Emine AVCI
Tez Savunma Tarihi: 16.01.2018
Kod No: 82

Fen Bilimleri Enstitüsü Onay:


Doç. Dr. Mustafa DEMİRCİ
Enstitü Müdürü

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.


Prof. Dr. Ergül YAŞAR
Enstitü ABD Başkanı

Bu tez tarafımca (tarafımızca) okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.


Yrd. Doç. Dr. Bayram Ali MERT
Tez Danışmanı

Bu tez tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri (Ünvanı, ADI ve SOYADI):

Prof. Dr. Ergül YAŞAR

Doç. Dr. Tayfun Yusuf YÜNSEL

Yrd. Doç. Dr. Bayram Ali MERT

İmzası


.....

.....

.....

Not : Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

16.01.2018

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını ve tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu beyan ederim.

İmza



ÖZET

JEOTERMAL SULARLA HAZIRLANMIŞ ÇAMURLARIN SONDAJ PERFORMANSINA ETKİSİ

Jeotermal sondajlar genellikle bol kırık ve çatlaklı volkanik sahalardaki yüksek sıcaklık koşullarında yapılmaktadır. Çamur kaçaklarını ve bozulmalarını beraberinde getiren bu durum ise sürekli çamur yapımı gerektirdiğinden önemli miktarda da su ihtiyacı söz konusu olmaktadır. Çamur yapımında kullanılacak olan tatlı su fayda/maliyet açısından sondaj mahaline en yakın yerden temin edilmek istenir. Bu durumun her zaman mümkün olmadığı durumlarda ise sondaj mühendisleri jeotermal havzalarda yer alan diğer kuyu ve/veya yüzey kaynaklarından mineralli sıcak suları çamur yapımında kullanmaktadırlar. Literatürde tatlı sularla hazırlanmış sondaj çamurlarının reolojik özellikleri üzerine birçok çalışma mevcut olmasına rağmen, farklı mineral içerikli sıcak jeotermal kaynak suları ile hazırlanmış sondaj çamurlarının reolojik özellikleri ve sondaj performansı üzerine etkileri henüz incelenmemiştir. Bu çerçevede, bu çalışma ile literatürdeki boşluğu doldurmak hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle 1 adet saf su, 8 adet jeotermal kaynak suyu kullanılarak API standartlarına göre çamur numuneleri hazırlanmıştır. Daha sonra bu numunelerin hem ortam koşulları hem de sıcaklık artışına bağlı olarak viskozite, filtrasyon, jel mukavemeti, kek kalınlığı, pH ve çamur yoğunluğu ölçülmüştür. Bu çalışmada ayrıca, formüle edilen çamurların reolojik davranışlarının tahmininde kullanılacak reolojik model ortam koşullarında ve sıcaklık artışına bağlı olarak istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve kesinti taşıma indeksleri ile etkin kuyu temizliği için gerekli minimum anülüs hızları yine ortam koşullarında ve sıcaklık artışına bağlı olarak hesaplanarak sondaj performansları değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmelerde mineralli jeotermal kaynak suları ile hazırlanmış çamurların saf su içerikli çamurlara göre viskozitesinin ve akma noktasının daha düşük olduğu, su kaybının ise daha yüksek olduğu görülmüştür. Diğer yandan numunelerin 6 farklı sıcaklık koşulunda (77, 122, 167, 212, 257 ve 302 (°F) kayma gerilmesiyle kayma hızı arasındaki ilişkiler (reogram) grafiklendiğinde, akışkanın nispeten düşük sıcaklıklarda (77-212 (°F) aralığı) kopma gerilmesinin aşılmasından sonra kayma gerilmesi ile kayma hızı arasındaki ilişki Bingham plastik ve power law modellerinin bir kombinasyonu olan Herschel-Bulkley modeli ile ifade edilebilecek akış davranışını gösterdiği, daha yüksek sıcaklıklarda ise bazı su numuneleri için akışkanın kopma gerilmesiz non-Newtoniyen akışkan gibi davrandığı görülmüştür. Kesinti taşıma indeksleri açısından yapılan değerlendirmeye göre ise, jeotermal kaynak suları ile hazırlanmış saf su içerikli çamurlardan daha düşük taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Etkin kuyu temizliği açısından ise daha yüksek anülüs hızına ihtiyaç duyacağı bulunmuştur. Sonuç olarak jeotermal kaynak suları ile hazırlanan çamurların tatlı su kaynaklarına oranla daha düşük sondaj performansı sergileyeceği kanatine varılmıştır.

2018, 102 sayfa.

Anahtar Kelimeler: Sondaj çamuru, jeotermal su, reoloji, viskozite, filtrasyon, reolojik model, kesinti taşıma indeksi

ABSTRACT

EFFECTS OF THE GEOTHERMAL WATER BASED MUDS ON THE DRILLING PERFORMANCE

Geothermal drilling is usually carried out on the fractured and cracked volcanic areas having high temperature conditions. Because of this situation leading to lost of circulation and decomposition of mud requires a vast amount of water to prepare mud. Fresh water using to prepare mud is desired to be provide from the nearest location of drilling site in terms of benefit/cost. Otherwise, drilling engineers use geothermal spring water to prepare mud from the surface or well near the drilling location. Although there have been many studies about the drilling muds prepared with fresh waters, the geothermal spring waters and their effects on the drilling performance have not been investigated. To this end, first of all, 1 sample of distilled water and 8 sample of geothermal spring water were used to prepare mud samples according to API standards. Then, the viscosity, filtration, gel strength, cake thickness, pH and density of these samples were measured depending on ambient conditions and elevated temperature. In addition, the rheological model to be used in predicting the rheological behavior of the formulated muds was analyzed statistically and the cutting carrying indexes and the minimum annulus velocity required for effective well cleaning of samples were evaluated in terms of drilling performances at ambient conditions and elevated temperature. As a result, it was observed that the muds prepared with geothermal spring waters have lower viscosity and lower yield point and higher water loss than fresh water based muds. On the other hand, when the relationships between the shear rate and the shear rate of the samples are plotted for 6 different temperature conditions (77, 122, 167, 212, 257 and 302 (°F)), the relationship between shear stress and shear of the fluid is shown by the Herschel-Bulkley model which a combination of Bingham plastic and power law models at relatively low temperatures (77-212 (°F) range). However, some mud samples behaved as non-Newtonian fluid that is without yield point at higher temperatures. Also, it is seen that muds prepared with geothermal spring waters have lower carrying capacity than the muds containing fresh water in terms of cutting carrying indexes. Moreover, muds prepared with geothermal spring waters require higher velocity of annulus for effective well cleaning. Consequently, based on this study, it was concluded that the muds prepared with geothermal spring waters have a lower drilling performance compared to muds prepared fresh water sources.

2018, 102 pages.

Key Words: Drilling mud, geothermal water, rheology, viscosity, filtration, rheological model, cutting carrying index

TEŞEKKÜR

Öncelikle, bu tez çalışmasının hazırlanmasında bana yol gösteren, bilimsel birikim ve deneyimleri ile çalışmamın her aşamasında desteğini esirgemeyen danışman hocam **Yrd. Doç. Dr. Bayram Ali Mert**'e sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca, deneysel çalışmalarda İstanbul Teknik Üniversitesi, Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü Sondaj Akışkanları Laboratuvarının kapılarını açan ve bana yol gösteren **Doç. Dr. Gürşat Altun**'a, deneysel çalışmada yardımcı olan **Uzman Eda Ay**, yüksek lisans öğrencisi **Hakmyrat Atayev**'e ve İskenderun Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği Bölümü **Öğretim Elemanlarına** çok teşekkür ederim.

Bazı su numunelerinin temin edildiği İzmir Jeotermal Enerji San. ve Tic. Üretim A.Ş.'ne ve Jeoloji Mühendisi **Tolga Sayık**'a ve jeotermal su numunelerinin araziden alınmasında bana eşlik eden arkadaşım **Arş. Gör. Fatma Bakal**'a teşekkür ederim.

Tez savunmama katılarak, yorum, öneri ve geri bildirimler ile tezime katkı sağlayan **Prof. Dr. Ergül Yaşar**'a ve **Doç. Dr. Tayfun Yusuf Yünsel**'e teşekkür ederim.

Yüksek lisans çalışmam boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, bana her zaman güvenen ve yanımda olan çok sevdiğim **aileme** sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZ	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR.....	III
İÇİNDEKİLER	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
ÇİZELGELER DİZİNİ	VII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	VIII
1. GİRİŞ	1
1.1. Sondaj Çamurunun Reolojik Özellikleri Hakkında Genel Bilgiler	2
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	10
2.1. Tuzluluğun Etkisi Üzerine Yapılan Önceki Çalışmalar	10
2.2. Yüksek Sıcaklık-Yüksek Basıncın Etkisi Üzerine Yapılan Önceki Çalışmalar... ..	12
2.3. Yağ Temelli Çamurların Etkisi Üzerine Yapılan Önceki Çalışmalar	13
2.4. Katkı Maddelerinin Etkisi Üzerine Yapılan Önceki Çalışmalar	14
3. MATERYAL ve METOD.....	17
3.1. Materyal.....	17
3.1.1. Çalışmada Kullanılan Sarf Malzeme ve Kimyasallar	17
3.1.2. Çalışmada Kullanılan Alet ve Ekipmanlar	17
3.1.3. Çalışmada kullanılan Bilgisayar Yazılımları.....	25
3.2. Metod.....	25
3.2.1. Literatür Çalışmaları	27
3.2.2. Saha Çalışmaları	27
3.2.3. Laboratuvar Çalışmaları	27
3.2.3.1. Numune Hazırlama	27
3.2.3.2. Viskozite Ölçümü	30
3.2.3.3. Filtrasyon Ölçümü	31
3.2.3.4. Ağırlık (Yoğunluk) Tayini.....	33
3.2.3.5. pH Tayini	33
3.2.4. Büro Çalışmaları.....	34
3.2.4.1. Reolojik Model Tespiti ve Model Tahminlerinin Karşılaştırılması	34
3.2.4.2. Sondaj Çamurunun Kesinti Taşıma Kapasitesi	40
3.2.4.3. Delme Parametreleri ve İlerleme Hızı Üzerine Etkileri	41
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	47
4.1. Viskozite Testi.....	47
4.2. Filtrasyon Testi	61
4.2.1. Standart API Sıvı Kaybı Testi	61
4.2.2. API Yüksek Sıcaklık-Yüksek Basınc (YSYB) Sıvı Kaybı Testi.....	64
4.3. Çamur Yoğunluğu Testi	68
4.4. pH Testi	68
4.5. Reolojik Model Analizi	69
4.6. Kesinti Taşıma Kapasitesi	73
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	77
KAYNAKLAR	80
ÖZGEÇMİŞ	88

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Blok tabakalar arasında kayma hızının gösterimi	3
Şekil 1.2. Kayma hızının şematik gösterimi	3
Şekil 1.3. Akışkanların reolojik davranış sınıflandırılması.....	5
Şekil 1.4. Newtoniyen ve non-newtoniyen akışkanların reogramları	5
Şekil 1.5. Newtoniyen ve Non-Newtoniyen akışlarda viskozite-kayma hızı grafiği.....	7
Şekil 1.6. Sabit kayma hızı altında kayma gerilmesinin zamanla değişimi	8
Şekil 3.1. Elektronik hassas terazi.....	18
Şekil 3.2. Çoklu karıştırıcı	18
Şekil 3.3. Fann Model 50 SL reometre	20
Şekil 3.4. YSYB reometre programı	21
Şekil 3.5. Fann Model 35 viskozimetre	21
Şekil 3.6. Standart API Sıvı kaybı cihazı ve parçaları	22
Şekil 3.7. API Yüksek Sıcaklık Yüksek Basınç Filtre Presi ölçümden önce parçaları ile birlikte ve ölçüm esnasındaki görünümü	23
Şekil 3.8. Çamur terazisi	24
Şekil 3.9. Çalışmanın şematik gösterimi.....	26
Şekil 3.10. Çamur numunelerinin yaşlandırılması.....	28
Şekil 3.11. Çamur kek kalınlığı ölçümü.....	33
Şekil 3.12. Bingham Plastik akış davranışı grafiği	36
Şekil 3.13. Power Law akış davranışı grafiği	37
Şekil 3.14. Herschel-Bulkley akış davranışı grafiği.....	38
Şekil 4.1. J1, J2, J3, J4, S1 numunelerinin artan sıcaklığa karşı reogramları.....	50
Şekil 4.2. J1, J2, J3, J4, S1 numunelerinin sabit sıcaklıklar altındaki reogramları.....	53
Şekil 4.3. J1-S1 reogramlarının karşılaştırılması	54
Şekil 4.4. J2-S1 reogramlarının karşılaştırılması	55
Şekil 4.5. J3-S1 reogramlarının karşılaştırılması	56
Şekil 4.6. J4-S1 reogramlarının karşılaştırılması	56
Şekil 4.7. J1, J2, J3, J4, S1 numunelerinin sabit kayma hızlarında sıcaklığa bağlı davranışı.....	58
Şekil 4.8. Numunelerin 10 s ve 10 dk jel mukavetleri.....	60
Şekil 4.9. Numunelerin zamana bağlı standart API sıvı kayıplarının birlikte gösterimi	63
Şekil 4.10. Tüm çamur numunelerinin 30 dakikadaki standart API sıvı kaybı değerlerinin karşılaştırılması.....	64
Şekil 4.11. J1, J2, J3, J4, S1 numunelerinin zamana bağlı API Yüksek Sıcaklık, Yüksek Basınç sıvı kaybı değerlerinin birlikte gösterimi.....	66
Şekil 4.12. J1, J2, J3, J4, S1 numunelerinin 30 dakikadaki API Yüksek Sıcaklık, Yüksek Basınç sıvı kaybı değerlerinin karşılaştırılması.....	66

Şekil 4.13. J1, J2, J3, J4, S1 numunelerinin API-YSYB ve standart API sıvı kayıplarının birlikte gösterimi	67
Şekil 4.14. Numunelerin standart API filtre presi ile sıvı kaybı ölçümü sonrası kek kalınlıkları	68
Şekil 4.15. Numunelerin standart API filtre presi ile sıvı kaybı sonrası ölçülen pH değerleri	69



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Sondaj akışkanı numunelerinin kompozisyonu	29
Çizelge 4.1. Jeotermal su örneklerinin kimyasal analizleri.....	49
Çizelge 4.2. Çamur numunelerinin ortam koşullarındaki kadran okuma değerleri	59
Çizelge 4.3. Çamur numunelerinin ortam koşullarında ve artan sıcaklığa bağlı olarak değişen YP/PV oranları	61
Çizelge 4.4. Çamur numunelerinin ortam koşullarında ve artan sıcaklığa bağlı Bingham Plastik, Power Law ve Herschel Bulkley model parametreleri ve istatistik sonuçları	70
Çizelge 4.5. Çamur numunelerinin ortam koşullarında ve artan sıcaklığa bağlı kesinti taşıma indeksi, $V_{apm}K$ çarpım değerleri ve minimum anülüs hızları.....	75



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

γ	:Kayma hızı
θ	: Viskometre kadran okuması
\bar{x}_i	:Tahmin edilen değerlerin ortalaması
\bar{x}	:Gerçek değerlerin ortalaması
x_i	:Tahmin edilen değerler
μ	: Viskozite
μ_p	: Plastik viskozite
$^{\circ}\text{C}$: Derece celsius
$^{\circ}\text{F}$: Fahrenheit derece
SiO_2	: Silisyum oksit
HCO_3^-	: Bikarbonat
CO_3^-	: Karbonat
Cl^-	: Klorür
F^-	: Florür
NO_2^-	: Nitrit
NO_3^-	: Nitrat
SO_4^{-2}	: Sülfat
Li^+	: Lityum
Na^+	: Sodyum
NH_4^+	: Amonyum
K^+	: Potasyum
Mg^{+2}	: Magnezyum
Ca^+	: Kalsiyum
K	: K1vam faktörü
H_3BO_3	: Borik asit
Al	: Alüminyum
Mn	: Mangan
Zn	: Çinko
Cr	: Krom
Se	: Selenyum
Ba	: Baryum
m	: Herschel bulkley akış davranış indeksi
mg/l	: Litrede miligram
mg	: Miligram
n	: Power law akış davranış indeksi
V_a	: Minimum anülüs hızı
ρ_m	: Çamur ağırlığı
x	: Gerçek değerler
τ	: Kayma gerilimi
τ_y	: Akma noktası

KISALTMALAR

API	: Amerikan Petrol Enstitüsü
CCI	: Cutting Carrying Index
CHDP	: Chip Hold Down Pressure
HB	: Herschel-Bulkley
HTDFS	: High Temperature Drilling Fluid System
MTA	: Maden Tetkik Arama
OBM	: Oil Based Mud
PR	: İlerleme Hızı
PV	: Plastik Viskozite
RCO	: Remote Control Option
RMSE	: Ortalama Karesel Hata Kökü
ROP	: İlerleme Hızı
SSE	: Hata Kareleri Toplamı
SSR	: Sum of Squares of the Regression
SST	: Total Sum of Square
TDS	: Toplam Çözünmüş Katı Madde Miktarı
WBM	: Water Based Mud
YP	: Akma Noktası
YSYB	: Yüksek Sıcaklık-Yüksek Basınç

1. GİRİŞ

03.06.2007 tarihli ve 5686 sayılı Jeotermal Kaynaklar ve Doğal Mineralli Sular Kanunu'nun yürürlüğe girmesiyle birlikte, ülkemiz jeotermal kaynak araştırmaları ve özellikle de derin sondaj faaliyetleri hızlanmıştır. Söz konusu jeotermal kaynaklar enerji sektöründen, tarım, hayvancılık ve sağlık sektörüne kadar birçok alanda kullanılmaktadır (Mert ve Avcı, 2017). Jeotermal kaynakların dünya genelinde 1995 yılında 8664 MWt doğrudan kullanımı söz konusu iken, 2015 yılı sonunda bu değer 8 kat artarak 70.885 MWt değerini aşmıştır (Lund ve Boyd, 2016). Türkiye'de ise, 1960'lı yıllardan bu yana sıcaklıkları 20-287 °C arasında 230 adet jeotermal saha keşfedilmiştir (Mertoğlu ve ark, 2015). Bu keşifler ile Türkiye jeotermal ısı potansiyeli bakımından Dünyanın 7. Avrupa'da ise 1.sırada yer almaktadır. Artan jeotermal kaynak aramalarında yapılan sondaj faaliyetlerinde, kesintilerin taşınması, sondaj dizisinin yağlanması, kuyu içine formasyon sıvısının geçişini engellemek, hidrostatik basıncını dengelemek, kuyunun stabilitesini sağlamak ve en önemlisi sondaj kesintilerinden, karotlardan ve elektrik loglarından elde edilen bilgileri yorumlanmasına olanak sağlaması için çamur kullanılmaktadır (Wu ve ark., 2001; Caenn ve Chillingar, 1996). Sondaj çamuru, sondaj operasyonunun verimini arttırmak için en önemli karakteristikleri olan kuyu temizleme ve kuyu erozyonu problemlerini çözmek, kesintilerin süspansiyonu, sondaj sıvısının bakımı ve hidrolik hesaplamalarda kullanılan (Viloria Ochoa, 2006) reolojik (plastik viskozite, akma noktası, jel dayanımı, filtre keki) ve filtrasyon özellikleri belirli karakteristiklerle dizayn edilmelidir (Amani, 2012).

Diğer yandan, jeotermal sondajlarda kullanılan çamur, kuyu maliyetini etkileyen faktörlerden bir tanesini oluşturmakta ve jeotermal kuyu maliyetleri petrol kuyu maliyetlerinden 2-4 kat daha fazladır (Serpen, 2005). Sondaj çamurunun bir döner sondajda toplam kuyu maliyetinin yaklaşık olarak % 20' sine varabilmektedir (Finger ve Blankenship, 2010). Jeotermal havzalarının doğası gereği jeolojik olarak volkanik sahalarda bulunması ve bu sahaların oldukça fazla kırık ve çatlaklı yapıda olmasından dolayı sondaj esnasında sıklıkla çamur kaçakları yaşanmakta dolayısıyla sürekli çamur yapımını gerektirip beraberinde su ihtiyacı söz konusu olmaktadır. Kuyu maliyetini düşürmek için birçok operatör çamur yapımında sondaj mahaline uzak mesafeden tankerlerle tatlı su taşımak yerine sondaj mahalinin en yakınında bulunan, jeotermal

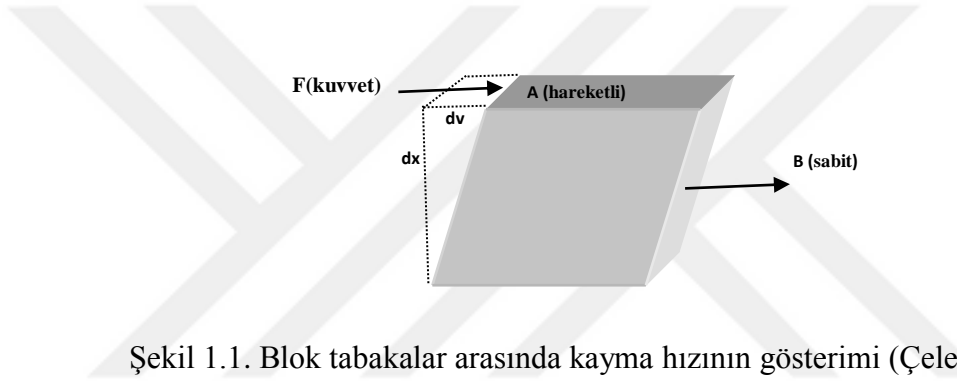
havza boyunca kırık ve çatlaklardan yüzeye sızan çok sayıda doğal çıkışlı yüzey sıcak su kaynağından çekilen suyu kullanmaktadır. Ancak bu kaynak suların çamur özelliklerine nasıl etki ettiğine dair herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Ülkemizde jeotermal sondaj sayılarının artması, bulunan sıcak su kaynaklarının sayısı, sondaj çamurunun kuyu maliyetindeki önemli miktardaki payından ötürü ve jeotermal sondajlarda çalışılmak zorunda kalınan yüksek sıcaklık göz önüne alındığında, bu durumunun su bazlı sondaj çamurunun performansına etkisinin incelenmesini gerekli kılmaktadır. Bu amaçla bu çalışmada, Kırşehir-Bulamaçlı, Batman-Kozluk-Taşlıdere, Hatay-Hamamat, Hatay-Başlamış ve Osmaniye-Haruniye, jeotermal sahasından yüzeyleyen sulardan İzmir-Balçova, jeotermal sahasından ise jeotermal kuyu suyu numuneleri alınarak sondaj çamuru hazırlanmak suretiyle reolojik özellikleri ortam koşullarında ve yükselen sıcaklıklar altında belirlenerek, tatlı sularla hazırlanmış çamurlarının özellikleri ile karşılaştırılmış, reolojik davranışlarının tahmininde kullanılacak reolojik modeller istatistiksel açıdan incelenerek değerlendirilmiş ve hazırlanan çamurların kesinti taşıma indeksleri hesaplanarak sondaj performansları değerlendirilmiştir.

1.1. Sondaj Çamurunun Reolojik Özellikleri Hakkında Genel Bilgiler

Maddelerin mekanik kuvvetlerin etkisi altında oluşan deformasyonu ve akışkanların akış özellikleriyle ilgili bilim dalının genel adına reoloji denilmektedir. Sondaj sıvısının reolojik özellikleri, akış profili, viskozitesi, kuyu temizleme yeteneği, basınç kaybı, eşdeğer sirkülasyon yoğunluğu, genel olarak kuyu hidroliğinin analiz edilebilmesini sağladığından sondaj operasyonlarının başarısında önemli rol oynamaktadır (Amoco, 1994). Sondaj çamurunun akış özelliklerinin yetersiz olduğu durumlarda kuyu genişlemeleri, düşük sondaj hızları, sirkülasyon kayıpları ve takım sıkışması gibi durumlarla karşılaşmaya neden olabilmektedir (Erkeköl, 2005). Reolojik özelliklerin başlıca konuları elastisite, plastisite ve viskozitedir (Barnes ve ark, 1989).

Viskozite, bir sıvının akmaya karşı gösterdiği dirençtir. Viskozite arttıkça direnç de artmaktadır. Viskozite kısaca, paralel molekül tabakalarından oluşmuş, yüzeyi 1 cm^2 ve yüksekliği 1 cm olan blok (bir deste kart gibi) bir sıvı düşünülüp tabakaların en alt

yüzeyinin sabit olduğu kabul edildiği durumda en üstteki sıvı tabakası sabit bir hızla (1 cm/sn) hareket ettirildiğinde, diğer bütün tabakalar, en alttaki sabit tabakaya uzaklıkları ile orantılı bir hızla hareket edecektir (Şekil 1.1). Her tabakanın farklı ivmesi olacaktır. Sıvının iç sürtünmesine bağlı olarak da, kuvvetin uygulandığı tabakaya yakın olan tabakalar hızlı, uzak olanlar yavaş hareket edeceklerdir. Sıvı bloğunun sabit olan alt tabakasının yerinde durabilmesi için uygulanan F kuvvetine ters yönde ve eşit değerde bir kuvvete ihtiyaç duyulacaktır. F kuvveti bir gerilim meydana getirecektir. Kuvvetin uygulandığı sıvı yüzeyinin alanı A ve hareketi başlatmak için gereken kuvvet de F ise, birim alana düşen kuvvet F/A olacaktır. Buna kayma gerilimi (shear stress) denilmektedir ve Denklem (1.1)'de gösterilmiştir (Çelebi, 2009).

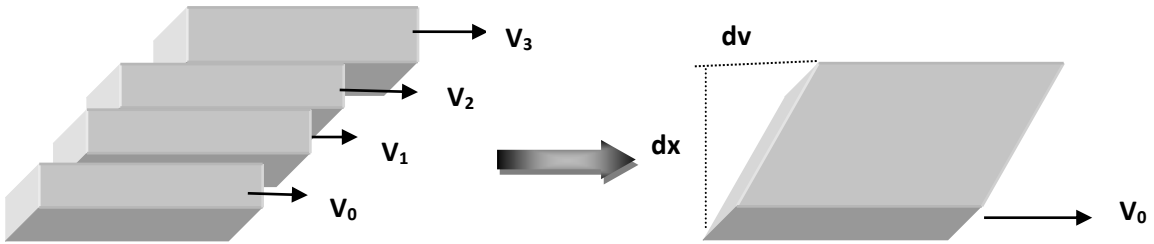


Şekil 1.1. Blok tabakalar arasında kayma hızının gösterimi (Çelebi, 2009).

$$\tau = F/A \quad (1.1)$$

Bu yer değiştirmede, düzlemler arasındaki akışa dik yöndeki uzaklığa x , düzlemlerin kayma hızına da, v denilecek olursa; dv/dx (*shear rate*) kayma hızı oranı veya kayma deformasyonunun değişme hızı olup Denklem (1.2)'de gösterilmiştir. Şekil 1.2' de kayma hızının şematik gösterimi verilmiştir.

$$\gamma = dv/dx \quad (1.2)$$



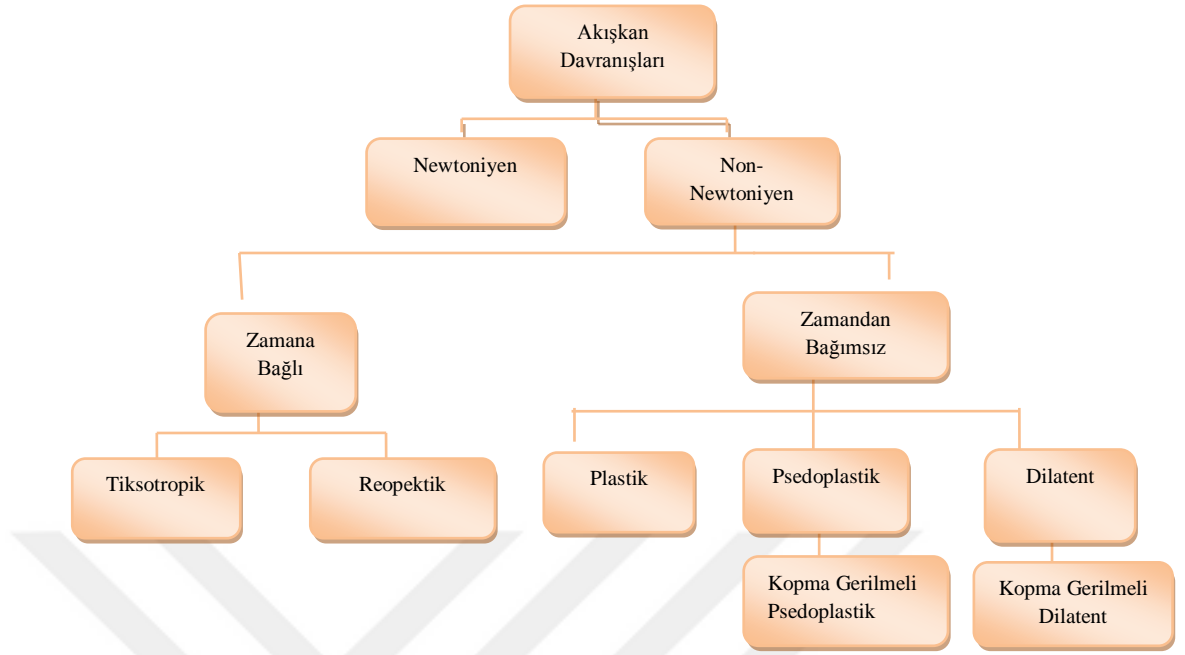
Şekil 1.2. Kayma hızının şematik gösterimi (Çelebi, 2009).

Bir akışkanın akmaya karşı göstereceği direnç (viskozite) ne kadar fazla ise, hareket eden noktalar arasındaki hız farkı da o kadar fazla olacaktır. Hızın değişim değerleri uygulanan kuvvetle doğru orantılıdır. Hız ve kuvvet arasındaki orantıyı eşitlik haline getirmek için kullanılan değer viskozitedir ve Denklem (1.3) ile hesaplanır (Inteq, 1995).

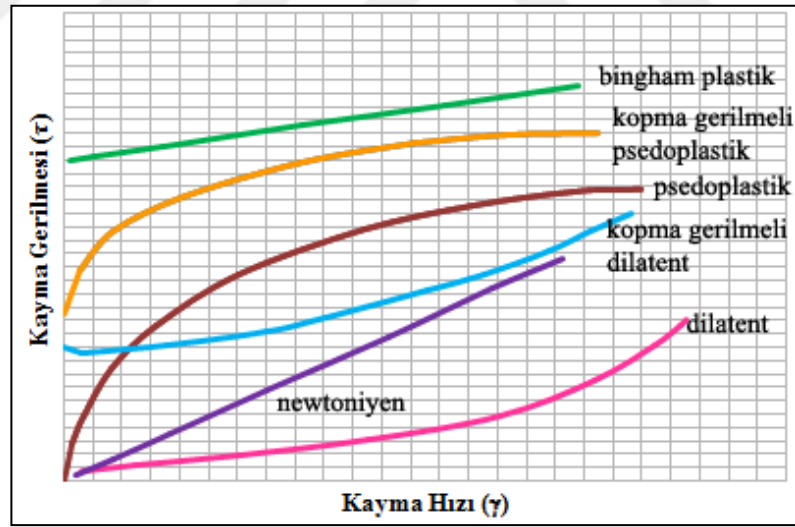
$$\mu = \frac{\tau}{\gamma} \quad (1.3)$$

- Görünür Viskozite: Akışkanın belli bir kuvvet altında veya belirli bir hızla akışı sırasındaki viskozitesidir (Özüdoğru ve Babür, 2001; APC, 1994).
- Plastik Viskozite: Akmaya karşı direncin mekanik sürtünmeden dolayı oluşan bileşenidir. Bu sürtünme, çamur içindeki katı maddeler arasında, katı maddelerle çevrelerini saran sıvı arasında, sıvının kendi içindeki kayma nedenleriyle oluşmaktadır (Özüdoğru ve Babür, 2001; APC, 1994).
- Akma Noktası (Yield Point): Akmaya karşı direncin parçacıklar arası çekme kuvvetinden dolayı oluşan bileşenidir. Bu çekme kuvveti akışkan içindeki askıdaki katıların yüzeylerindeki elektrik yüklerinden dolayı oluşur. Bu gücün yüksekliği, katıların tipi ve bununla bağlı olarak yüzey yüklerine, katı miktarına, çamurun sıvı fazının içerdiği tuzun iyon konsantrasyonuna bağlı olmaktadır (Özüdoğru ve Babür, 2001; APC, 1994).
- Jel Kuvveti: Çamur hareketliken çekici güçlerin oluşturduğu kuvvet akma noktası iken, jel kuvveti de çamur hareketsizken aynı güçlerin oluşturduğu kuvvet şeklinde açıklanmıştır (Özüdoğru ve Babür, 2001; APC, 1994).

Kayma hızı-kayma gerilmesi grafiği, test edilen akışkanın doğasına bağlı olarak Tutarlılık Eğrisi ya da Akış Modeli olarak bilinir. Akışkanlar kendi aralarında kayma hızı (shear rate) ile kayma gerilmesi (shear stress) arasındaki ilişkiye göre Newtoniyen ve non-Newtoniyen akışkanlar olmak üzere ikiye ayrılırlar. Şekil 1.3'de akışkanların reolojik davranış sınıflandırılması verilmiştir. Kayma gerilmesi ile kayma hızı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik akış eğrisi (reogram) olarak adlandırılır ve viskoz akışkanların reolojik sınıflandırmasında bu ilişki esas alınır (Barnes ve ark, 1989) (Şekil 1.4).



Şekil 1.3. Akışkanların reolojik davranış sınıflandırılması (Barnes ve ark, 1989'dan modifiye edilmiştir).



Şekil 1.4. Newtoniyen ve non-newtoniyen akışkanların reogramları (Gücüyener, 1983'ten modifiye edilmiştir).

Newtoniyen Akışkanlar ve Özellikleri : Şekil 1.4'de görüldüğü gibi, kayma hızının kayma gerilmesiyle doğru orantılı olup viskozitesinin sabit olduğu akışkanlara Newton tipi akışkanlar denilmektedir (Emsap ve ark., 2002; Martin, 1993).

Non-Newtoniyen Akışkanlar: Newtoniyen olmayan sıvıların akış davranışları geniş bir aralıkta olabilir. Temel karakteristikleri, viskozitenin kayma hızı (shear rate) ile doğrudan orantılı olmamasıdır. Diğer bir deyişle, viskozite kayma hızı ile değişir (Çelebi, 2009). Newtonian akış göstermeyen bazı sıvılar, zamana bağlı olarak da değişiklik gösterirler. Newtoniyen akışkanın özelliklerinden farklı iki durum göze çarpmaktadır. Birinci olarak, iki değişken arasındaki ilişki doğru yerine eğridir. İkinci olarak, akışkan akışa geçmeden yenilmesi gereken bir başlangıç gerilim eşliğine sahiptir yani eğri orijinden başlamamaktadır (Bourgoyne, 1991; Özudoğru ve Babür, 2001). Bu akışkanların akış davranışlarını belirlemek için akış direncinin en az iki kayma hızı kullanılarak ölçülmesi gerekir.

Non-Newtoniyen akışkanlar, sıcaklık ve basıncın yanı sıra kayma hızıyla da değişim gösteren ve görünür viskozite olarak bilinen bir viskozite ile tanımlanır.

Newton olmayan sıvılar esas itibari ile plastik, psödoplastik ve dilatant olarak adlandırılır. Sondaj sıvıları bu kategorilerin herhangi birine düşebilir.

Psedoplastik Akışkanlar (Pseudoplastic Fluids): Psedoplastik akış regramı doğrusal olmayıp ve noktasal eğimi kayma hızı ile azalarak orijinden geçip, plastik akışın aksine eşik değeri yoktur (Schott, 2000; Martin, 1993) (Şekil 1.4). Bu tip akışkanlarda kayma gerilmesi artarken görünür viskozite azalır. Bu davranış “kayma hızıyla inceltme” (shear thinning) olarak bilinir (Şekil 1.5) .

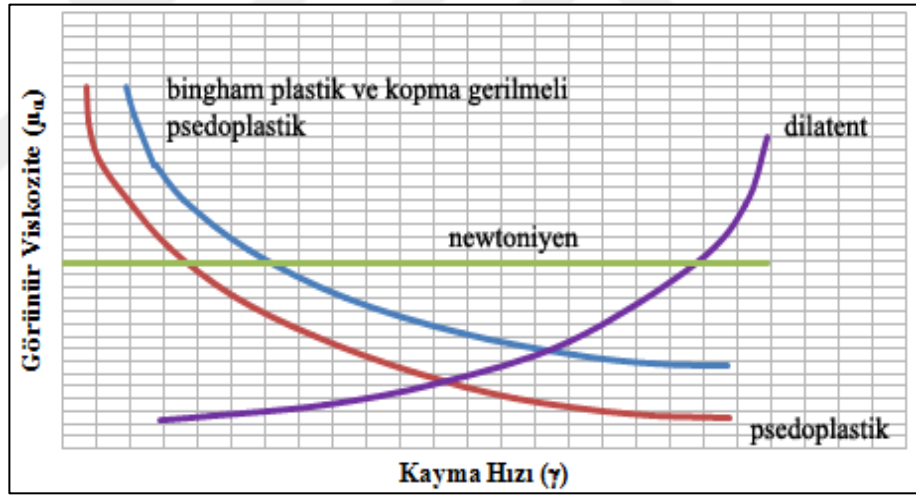
Dilatant Akışkanlar (Dilatant fluids): Psedoplastik akışın tersi davranış gösterir. Artan hız gradyanı ile akışa karşı direnç de artar (Emsap ve ark., 2002) (Şekil 1.4). Görünür viskozitenin kayma hızıyla doğru orantılı olduğunu gösteren bu davranış “kayma hızıyla kalınlaşma” (shear thickening) olarak bilinir (Şekil 1.5). Konsantre partiküllerin dispersiyonları, süspansiyonlar, emülsiyonlar ve yağlı boyalar örnek olarak gösterilebilirler. Özellikle % 50 konsantrasyonda veya daha fazla defloküle katı partikülleri içeren süspansiyonlarda görülür (Martin, 1993).

Plastik Akışkanlar (Bingham Plastic Fluids): Bu akış tipi modern reolojinin araştırmacılarından olan *Bingham*'ın adına izafeten *Bingham akış* olarak da adlandırılmaktadır (Schott, 2000; Martin, 1993). Bingham plastik akışkanlar orijinden geçmeyen doğrusal bir akış eğrisi ile ayırt edilir (Şekil 1.4). Bu akışkanlarda akış eğrisinin kayma gerilmesi eksenini kestiği nokta Bingham kopma gerilmesi, eğimi ise plastik viskozite olarak tanımlanır. Bu tip akışkanlarda deformasyon ancak kopma

gerilmesi yenildikten sonra başlar (Martin, 1993). Bingham plastiklerde kayma hızıyla incelen akışkanlar olup, görünür viskozite kayma hızı sıfıra yaklaşırken hızla artarak sonsuza gider (Şekil 1.5).

Kopma Gerilmeli Pseudoplastik Akışkanlar (Yield-Pseudoplastic Fluids): Kopma gerilmeli pseudoplastik akışkanların doğrusal olmayan akış eğrisi pseudoplastiklerde olduğu gibi eğimi kayma hızıyla artarken, Bingham plastiklere benzer bir şekilde orijinden geçmeyip kayma gerilmesi eksenini keserek bir kopma gerilmesiyle ayırt edilirler (Şekil 1.4) Bu akışkanlarda da deformasyon kopma gerilmesi aşıldıktan sonra başlar. Kopma gerilmeli pseudoplastikler kayma hızı ile incelen akışkanlar olup, görünür viskoziteleri artan kayma hızıyla azalır (Nguyen ve Boger, 1992) (Şekil 1.5).

Kopma Gerilmeli Dilatent Akışkanlar (Yield-Dilatant Fluids): Bu tip akışkanlarda akış eğrisi kopma gerilmesinin yenilmesinden sonra dilatent davranış gösterir (Nguyen ve Boger, 1992) (Şekil 1.4).

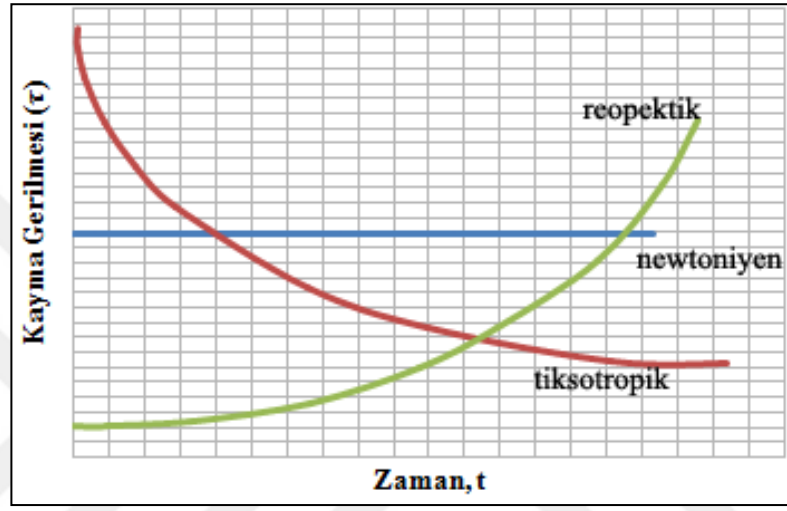


Şekil 1.5. Newtoniyen ve Non-Newtoniyen akışlarda viskozite-kayma hızı grafiği (TPAO, 2007).

Tiksotropik Akışkanlar: Tiksotropik akışkanlar sabit kayma gerilmesi hızı altında görünür viskozitelerinde zamanla azalma gösteren non-Newtoniyen akışkanlardır (Caenn ve ark., 2011). Şekil 1.6'da görüldüğü gibi sabit bir kayma hızı altında ölçülen kayma gerilmeleri başlangıçta hızla azalmakta, daha sonra zamanla bu azalma yavaşlamakta ve belli bir süre sonra kayma gerilmesi sabit kalmaktadır. Burada elde

edilen eğri aslında görünür viskozite eğrisi olup, tiksotropik akışkanların görünür viskoziteleri zamanla azalarak denge konumunda sabit bir değere ulaşır.

Reopektik Akışkanlar: Tiksotropik akışkanların sergilediği davranışa zıt bir davranış gösteren reopektik akışkanlarda görünür viskozite sabit bir kayma hızı altında zamanla artarak, belli bir süre sonra denge konumuna ulaşır ve bu aşamadan sonra akışkan kararlı bir davranış sergiler (Caenn ve ark., 2011) (Şekil 1.6).



Şekil 1.6. Sabit kayma hızı altında kayma gerilmesinin zamanla değişimi (TPAO, 2007).

Sondaj çamurlarını diğer akışkanlardan ayıran en önemli özelliği jelleşebilmesidir. Jel kuvveti, statik koşullar altında çamur içinde elektrokimyasal kuvvetlerin bir ölçümüdür. Saha birimi, akma mukavemeti (akma noktası) ile aynıdır.

Sıvı kaybı (Filtrasyon suyu): Sondaj çamurunun filtrasyon ve duvar yapım özellikleri sondaj ve kuyu tamamlama operasyonları için çok önemlidir. Çamurda kil tarafında tutulan serbest su sondaj sırasında sondaj deliğinin yüzeyindeki gözenekli formasyonlardan süzülerek içlerine girer. Formasyon su ile şişen kil, şeyl, marn v.b. içeriyorsa filtrasyon suyunun az olması istenir. Filtrasyon sırasında suyun süzülmesi ile oluşan pastanın kalınlığının 1-2 mm, yüzeyinin pürüzsüz olması gerekir. Pastanın kalınlığı (filter cake) filtrasyon suyu miktarı ile orantılıdır. Bozulmuş çamurlarda pasta kalınlığı fazla, yüzeyi kırıklı ve pürüzlüdür (Çetinel, 2008; Özyol, 2015).

Yoğunluk: Sondaj çamurunun başlıca özelliklerinden biri de sondaj çamurunun yoğunluğudur. Çamur bileşimi genellikle su ve bentonitten oluştuğundan ve içerisindeki

su oranı kilden çok daha yüksek olduğundan dolayı yoğunluğu suyun yoğunluğuna yakındır. Sondaj çamurlarında, çamurun yoğunluğu özgül ağırlık olarak tanımlanmakta ve çamur ağırlığı deyimi kullanılmaktadır (Bourgoyne, 1991).

pH Değeri: Birçok sondaj sıvısının sistem özelliklerinin kontrolü pH'a bağlıdır. Viskozitenin minimum olduğu pH değerleri 8–9 civarındır. Bunun dışındaki değerlerde viskozite artar. Çamurun pH değeri; kilin daha iyi şişmesi, metal malzemelerin kimyasal korozyonu, incelticilerin etkili kullanımı, kalsiyum stabilitesi ve bazı kimyasal çamur katkı maddelerinin reaksiyona girmesiyle direk olarak ilgilidir (Caenn ve Chillingar, 1996; Jha vd., 2015; Özüdoğru Babür, 2001). Bu nedenle çamurun pH'ı sık sık kontrol edilmelidir. pH metre ya da pH kağıtları ile ölçülmektedir.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Jeotermal suların önemli bir kısmı köken olarak yüksek sıcaklıklı, klorürlü sulardır. Aynı zamanda Na, K ve Mg gibi katyonların da varlığıyla birlikte tuz içeriği yüksek olan suları oluşturmaktadırlar. Literatürde sondaj çamurunun reolojik özelliklerinin yüksek sıcaklık ve basınç, bir takım katkı maddeleri, kullanılan killerin kimyası ya da tuz, çimento ve delinen kesintilerden kaynaklanan kirlenmelere bağlı olarak değişkenlik gösterdiğine dair birçok çalışma yapılmıştır. Fakat çamur yapımında kullanılan suyun özellikle jeotermal sondajlarda sıklıkla kullanılan jeotermal sularının hazırlanan sondaj çamurunun reolojisine doğrudan etkisi incelenmemiştir. Sondaj çamurunun reolojik özelliklerine etki eden parametreler ile ilgili olarak yapılan bazı çalışmaların kısa özetleri kategorik olarak aşağıda verilmiştir.

2.1. Tuzluluğun Etkisi Üzerine Yapılan Önceki Çalışmalar

Tuz yatakları delinmesi sırasında bentonit çamuru tuz ile kontamine olabilir ve özellikle derin kuyu sondajlarında bu tip katmanlarla karşılaşma ihtimali yüksektir. Ayrıca, doymuş su bazlı bir çamura sahip olmak için sondaj sıvısı sistemine eklenenebilindiği gibi deniz suyu kullanılarak sondaj sıvılarının hazırlandığı offshore operasyonlarının tasarımıda mevcut olabilmektedir (Rossi ve ark., 1999).

Sami (2016), Ortam ve yükselen sıcaklık koşullarında sondaj çamurunun reolojik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için farklı konsantrasyonlarda $MgCl_2$ tuzu ile iki çamur örneği formüle etmiştir. Sonuçta magnezyum tuzunun konsantrasyonu arttıkça viskozite, akma noktası, jel mukavemeti gibi reolojik özelliklerin azaldığını aynı zamanda su kaybının da arttığını tespit etmiştir.

Raheem ve Vipulanandan (2014), tuz kirliliğine maruz kalmış farklı bentonit sondaj çamurunun elektriksel dirençteki değişim ve kayma gerilimlerini deneysel olarak incelemiştir. Sonuçta tuz kontaminasyonu arttıkça kayma gerilmesi değerleri ve elektrik direncindeki değişiklikler azalmıştır.

Ali ve ark., (2013), konsantrasyonu % 0 ile % 3 aralığında değişen tuz (NaCl) kirliliğinin bentonit sondaj çamuru (% 6 w/w) reolojik özelliklerine etkisi Fann viskometre kullanılarak araştırılmıştır. Araştırma sonucunda, hem plastik viskozite hem de elektriksel direncin tuz içeriğinin artmasıyla azalma gösterdiğini tespit etmiştir.

Adekomaya (2013), sondaj çamrunun yüksek sıcaklık altında iken magnezyum tuzunun varlığında ve yokluğunda deneysel bir analiz yapmıştır. Analiz sonucunda sıcaklık arttıkça magnezyum tuzlarının varlığında sondaj çamrunun akma noktası, jel mukavemeti düşmüş ve su kaybını arttırdığını gözlemlemiştir.

Basirat ve Richardson (2013), sondaj çamrununda tuz (NaCl) kirlenmesinin filtrasyon kaybına etkisini araştırmıştır. Tuz kirlenmesinin su kaybını % 30 oranında arttırdığını tespit etmiştir.

Hassiba ve Amani (2012), araştırma çalışmasında ortam koşullarından çok yüksek basınçlara (35.000 psi'ye kadar) ve sıcaklığa (450 °F'a kadar) kadar farklı elektrolitlerin (NaCl ve KCl) su bazlı çamrunun viskozitesine etkisi sunulmuştur. Araştırma sonucunda KCl içeren çamurların kayma gerilmesi&kayma hızı eğrileri NaCl içeren çamurlara göre daha düşük olup, kayma gerilmesi değerleri 25.000 psi basınç altında, 342 °F sıcaklığa kadar azalmış, bu sıcaklıktan itibaren artış gösterdiğini gözlemlemiştir.

Ghassem Alaskari ve Nickdel Teymoori (2007), sıcaklık ve tuzluluğun sondaj çamrunun reolojik, filtrasyon ve pH özelliklerinin etkileri üzerine deneysel bir inceleme yapmıştır. Sonuçlar, CMC polimer ve XC polimer içeren su bazlı çamur testleri ile verilmiştir. Sondaj sıvısı, 8.165 kg/bbl bentonit içeren üç farklı sıcaklıkta (21.1 °C, 48.9 °C, 80 °C) incelenmiştir. Sondaj çamrunun pH'sinin 8-10 aralığında tutulması gerektiği bulunmuştur. Sondaj çamrunun tuzluluk derecesi ve sıcaklığı arttıkça sondaj çamrunundaki polimerlerin etkinliğinin azaldığı görülerek, sondaj çamrunun filtrasyon özellikleri üzerinde olumsuz etkiye neden olmuşlardır. İyi dağılmış ve düşük jel mukavemeti olan sodyum montmorillonit süspansiyonlarında, sıcaklık arttıkça hem plastik viskozite hem de akma noktası azalmıştır.

Rossi ve ark., (1999), yüksek basınç ve yüksek sıcaklık koşullarında farklı elektrolitlerin (NaCl, KCl, LiCl) varlığında ve yokluğunda Na⁺-montmorillonit süspansiyonlarının reolojik davranışını incelemiştir. Sonuçlar, elektrolit ilavesi ve sıcaklık artışıyla akma noktalarının artmasına yol açtığını göstermiştir. Na⁺-montmorillonit süspansiyonlarına KCl eklenmesinin, yüksek sıcaklıklarda şişmenin azaldığı, basınç değişimlerine karşı daha az hassas olan güçlü bir şekilde topaklaşmış bir yapıya sahip olduğu gözlenmiştir.

Miller ve Barthel (1975), deniz suyu ya da tuzlu su formülasyonları ile kullanılabilen bileşenlerden oluşan, kilsiz, asgari derecede aşındırıcı, sulu sondaj sıvısı

temin edilmeye yönelik patent çalışmalarında, deniz suyu kullanılarak yapılan sulu sondaj çamurları kolaylıkla formüle edilmediğini ve zaman zaman tatmin edici bir performans göstermediğini ve böylece, çamurun formüle edilmesi için tatlı suyun offshore lokasyonuna taşınması masrafını gerektirdiği sonucuna varmıştır.

2.2. Yüksek Sıcaklık-Yüksek Basıncın Etkisi Üzerine Yapılan Önceki Çalışmalar

Adekomaya ve ark., (2011) sondaj kırıntılarının laboratuvar ortamında hazırlanan petrol bazlı çamur üzerinde etkisini araştırmıştır. 120 °F sıcaklıkta 6 hızlı döner viskozimetre ile plastik viskozite, akma noktası, görünür viskozite, jel kuvveti gibi reolojik özellikleri ile çamur ağırlığı, sıvı kaybı ve elektriksel (emülsiyon) kararlılığı ölçmüştür. Sonuçta çamur içindeki kırıntıların artması, çamurun viskozitesini, sıvı kaybını ve yoğunluğunu arttırdığını gözlemlemiştir.

Santoyo ve ark., (2001), Meksika jeotermal sondaj endüstrisinde en sık kullanılan yüksek sıcaklık sondaj sıvı sistemleri (HTDFS) seçmiş ve değerlendirmiştir. Reolojik değerlendirmeyi gerçekleştirmek için on adet su bazlı sondaj sıvısı formüle edilmiş ve kimyasal olarak karakterize etmiştir. Viskozimetre (Fann 50) kullanılarak dinamik deneysel testler gerçekleştirilmiştir. 25-180 °C programlı sıcaklık aralığında (sabit bir rezervuar basıncında ve sırasıyla 3448.2 kPa ve 170 s⁻¹ kayma hızı) sondaj sıvısı viskoziteleri ölçülmüştür. Daha sonra bu dinamik viskozite ölçümleri, sondaj sıvısı viskozitesinin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak belirlenmesi için bağıntılı denklemlerin elde edilmesi için yerleştirilmiştir.

Shahjahah ve ark., (1999), Yüksek sıcaklık (490 °F), yüksek basınç (10000 psig) altında ve uzun yaşlandırma süresinin (30 gün) Fann Model 70 HTHP (High Pressure High Temperature) Viskozimetre ve Baroid Döner Fırını kullanılarak su bazlı sondaj sıvısı özelliklerine etkisi incelemiştir. Sonuçlar, sıcaklık artışı ile viskozitede, akma noktasında ve jel kuvvetinde bir düşüş olduğunu göstermiştir. Belirli bir sıcaklık için kayma gerilmesi, kayma hızındaki artışla birlikte artmış, ancak belirli bir kayma hızındaki kayma gerilmesi değeri sıcaklıktaki artışıyla birlikte azalmıştır. Viskozite, akma noktası ve jel kuvveti belirli bir sıcaklıkta yaşlandırma süresi ile artmış ve yaşlandırma etkisi yaşlandırma süresinin uzamasına bağlı olarak azalmıştır. Belirli bir kayma hızındaki kayma gerilmesi değeri yaşlandırmaya bağlı olarak artmış ve

yaşlandırma süresinin uzamasıyla yaşlandırma etkileri azalmıştır. Basınç, sondaj sıvısının reolojik özelliklerinin değerlerini arttırmıştır.

Rommetveit ve ark., (1997), YSYB (Yüksek Sıcaklık-Yüksek Basınç) kuyuları için basınç ve sıcaklığın etkilerini çalışılmıştır. Hem su bazlı hem de petrol bazlı 16 farklı çamurun 200 °C sıcaklık ve 120 000 kpa basınca kadar Fann 70 viskometre kullanarak reolojik özelliklerini incelemiştir. Sıcaklık 50 °C'den yaklaşık 150 °C'ye yükseldiğinde belirli bir kayma hızı için kayma gerilmesi önemli ölçüde azalmıştır. Bu sıcaklığın üzerinde kayma gerilimi değerleri, hem OBM hem de WBM çamurlarının çoğunda artan sıcaklıkla artmıştır. Basıncın artmasıyla belli bir kayma hızı için kayma gerilmesi artmıştır. Jel kuvveti, 3 dev/dak'da kayma gerilmesine benzer davranış göstermiştir.

Alderman ve ark., (1988), 130 °C'ye varan sıcaklıklarda ve 1000 bara kadar basınçlar altında çeşitli su bazlı sondaj çamurlarının reolojisini ölçmüştür. Sonuçta, 1000 bar basınca kadar sıvıların oldukça tiksotropik olduğu, çamur yoğunluğunun artmasıyla basınç bağımlılığının arttığı, sıvının kayma geriliminin esasen basınca bağlı olmadığı görülmüştür.

2.3. Yağ temelli çamurların Etkisi Üzerine Yapılan Önceki Çalışmalar

Jha ve ark., (2015), araştırmalarında, karboksimetil selülozun ve tragakant sakızın, yağ esaslı sondaj sıvılarının ara yüzey gerilimi, temas açısı ve zeta potansiyeli gibi reolojik, filtrasyon ve ara yüz özellikleri üzerindeki etkileri incelenmişlerdir. Sondaj sıvısı sisteminin emülsifikasyonu, sürfaktan özelliklerini gösterdiği gibi tragakant sakızı tarafından oldukça iyileştirilmiştir. Bu polimerlerin eklenmesinin, emülsiyon sistemlerinin reolojik parametrelerini ve filtrat kaybı özelliklerini kontrol ettiği gözlenmiştir. Emülsiyon sistemlerinin kararlılığı, emülsiyon esaslı sondaj sıvılarının zeta potansiyeli, ara yüzey gerilimi ve temas açısı ölçülerek analiz edilmiştir. Karboksimetil selüloz ve tragakant sakızı, emülsiyon sistemlerinin stabilitesi üzerinde önemli etkiler göstermiştir ve özellikleri bu katkıların farklı konsantrasyonlarına göre değişmiştir. Sondaj sıvılarının akış davranışı, bu yağ ve katkı maddelerinin değişen konsantrasyonları ile ölçülmüştür. Sıvıların yağ ve katkı maddeleri ilavesiyle kayma gerilmesiyle incelmeye (psödoplastik) olduğu bulunmuştur. Sondaj sıvılarının reolojik ve filtrasyon özelliklerinin 70 °C'de dengeli olduğu da bulunmuştur. Petrol ve gaz sondajı

sırasında emülsiyon sistemindeki bu katkıların konsantrasyonlarını optimize ederek, uygun sondaj sıvısı seçimi için gerekli olan sıvı reolojisi, filtrat kaybı ve pH gibi temel parametreler arttırılabileceği sonucuna varılmıştır.

Lee ve ark., (2012), Ekstrem YSYB koşullarında dört tip YSYB viskometreden üretilen yağ temelli sondaj sıvısının reolojik özellikleri karşılaştırılmış ve bu sondaj sıvısının davranışını öngörmek için kullanılabilecek basit bir reolojik model sunulmuştur. Sıcaklık ve basınç, test akışkanının reolojik özelliklerini etkilemekle kalmayıp aynı zamanda reoloji ölçümü için kullanılan mekanik parçaların performansını da etkileyebildiği gözlenmiştir.

2.4. Katkı maddelerinin Etkisi Üzerine Yapılan Önceki Çalışmalar

Li ve ark., (2015), su bazlı bentonit çamurlarında soy protein isolate (SPI) sıvı kaybı katkı maddesi olarak kullanılmış partikül boyutu ve konsantrasyonunun sıvı kaybını ne ölçüde etkilediğini çalışmıştır. Sonuçta düşük SPI miktarında filtre keki gevşek, yüksek poroziteli ve permeabiliteli olup yüksek filtrasyon gözlenmiştir. Yüksek SPI konsantrasyonlarında ise ince, düşük poroziteli ve permeabiliteli kek gözlenmiştir. Aynı katı içeriklerinde SPI kullanılan bentonit çamuru kullanılmayan saf bentonit çamurundan daha iyi reoloji gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Mahto ve Jain (2013), uçucu külün su bazlı sondaj sıvılarının reolojik ve filtrasyon özelliklerine etkisini incelemek amacıyla deneysel bir araştırma yapmışlardır. Sondaj çamuruna uçucu kül eklenmesinin reolojik özellikleri etkilemediği ancak filtrasyon özelliklerinde daha iyi kontrol sağlandığı görülmüştür.

Meng ve ark., (2012), karbon külü ve ticari reolojik modifiye edici maddenin (rheological modifier) (RM) bentonitin reolojik özellikleri üzerine etkilerini görünür viskozite (AV), plastik viskozite (PV), akma noktası (YP) ve aynı zamanda akma noktası ve plastik viskozite oranı (RYP) ölçerek çalışmışlardır. Sonuçlar, bentonit dispersiyonunun karbon külü ile reolojik özelliklerinin YP'de belirgin bir şekilde iyileşmiştir. Sıvı kaybı ve filtre kek kalınlığının belirgin bir şekilde arttığı, buna karşın karbon külü ilavesinin artmasıyla bentonit dağılımının yoğunluğunun hafifçe azaldığı gözlenmiştir.

Nur ve ark., (2005), Chemtrol-X, CMC LV, Polyplus ve Ligco katkı maddeleriyle su bazlı çamurlarda 3000 psig' ye kadar yüksek basınçta ve 200 °C'ye kadar yüksek

sıcaklıkta reolojik özellikleri Fann Model 70 ile iyileştirmeyi amaçlamıştır. Sonuçta standart çamur (Wyoming bentonit-katkı maddesiz), 150 °C' ye kadar dayanıma sahip olup sonrasında dayanıklı katkı eklendiğinde bu katkıların çamurun yüksek sıcaklık için daha dayanıklı olabileceğini göstermiştir. Standart çamur içine 3 ppb CMC-LV, 2 ppb Polyplus, 3 ppb CMC-LV + 2 ppb Chemtroll X, 2 ppb Polyplus + 2 ppb Chemtroll X, ek katkı maddeleri eklendiğinde 200 °C sıcaklığa kadar sondaj çamurunun reolojik özelliklerini daha dirençli hale getirmiştir. Standart çamura 3 ppb CMC-LV + 2 ppb Ligco, 2 ppb Polyplus + 2 ppb Ligco ek katkı maddesi katılması sondaj çamurunu 175 °C sıcaklığa kadar dayanabildiği sonucuna varmışlardır.

Mahto ve Sharma (2004), Tamarind gum ve polianyonik selülozun bentonit su süspansiyonları üzerindeki reolojik davranışının incelenmesiyle ekolojik açıdan su bazlı bir sondaj sıvısı geliştirilmiştir. Sondaj sıvısı filtratının formasyon hasarı üzerindeki etkisi de analiz edilmiştir. Geliştirilen sondaj sıvısı, daha iyi reolojik özelliklere ve sıvı kaybı kontrolüne sahiptir ve bu da petrol kuyusu sondajının optimum performansı için gereklidir. Buna ek olarak, sondaj sıvı kaybı kumtaşı karotları üzerinde minimum formasyon hasarı sergilemiştir.

Wu ve ark., (2001) N-vinilpirolidon (NVP), itakonik asit (IA), akrilamid (AM) ve 2-akrilamido-2-metil-1-propan sülfonik asidin (AMPS) polimerleri, serbest radikal polimerizasyonu yoluyla sentezlenmiş ve Fourier dönüşümü IR spektroskopisi ile karakterize edilmiştir. NVP-IA-AM-AMPS çeşitli konsantrasyonlarda ve parçacık boyutlarında kullanarak reolojiye etkisini yaşlandırma işleminden önce ve sonra olmak üzere tatlı su ve tuzlu su çamurlarında karşılaştırmalı olarak incelemiştir. NVP-IA-AM-AMPS katkı maddesinin çamurun özellikleri üzerinde güçlü etkileri olduğu bulunmuştur. Filtrat hacmi yaşlandırma testinden önce veya sonra polimer konsantrasyonunun artmasıyla azalmıştır. Söz konusu polimeri içeren sondaj sıvısının, tuza ve yüksek sıcaklığa karşı mükemmel bir toleransa sahip olduğunu gözlenmiştir.

Ayrıca Joel ve ark. (2012), çimento ile çamur kirlenmesi ile ilgili deneysel çalışma yapmıştır. Ajugwe ve ark. (2012) ise sondaj çamuru yapımında kullanılan kilin reolojisine etkisini ölçmeye dayalı olarak, Nijeryada yerel bölgelerden ve yabancı ticari bir kasabadan alınan bentonit kil numuneleri üzerinde testler ve analizler yapmışlardır. Çalışmalarında Nijerya'daki sondaj işlemleri için yerel kil numunelerinin performansı değerlendirilmiştir. Hazırlanan yerel çamur numunelerinin yabancı çamur numunelerine

kıyasla, reolojik özellikler gibi diğer birkaç parametrenin bir miktar ilave işlemi gerektirirken parametrelerinin, kum yüzdesi bileşimi, power low indeksi, yoğunluk, marsh hunisi viskozitesi, vb. gibi asgari şartları sağlamıştır. Bu nedenle, bu killerin herhangi bir endüstriyel uygulama için kullanılması, yüzey ve yüzey tesislerine zarar vermeyecek olup, yüksek kaliteli aktif yabancı bentonit kilinin önemli bir kısmının önlenmesi sayesinde Nijerya ekonomisine katma değer sağlamayacağı sonucuna varılmıştır.



3. MATERYAL ve METOD

Bu bölümde, deneylerde kullanılan alet, ekipman ve malzemeler ve teorik çalışmada kullanılan bilgisayar programı ile birlikte deneysel ve teorik çalışmalarda kullanılan yöntemler anlatılmıştır.

3.1. Materyal

3.1.1. Çalışmada Kullanılan Sarf Malzeme ve Kimyasallar

Bu çalışmada sarf malzeme ve kimyasal olarak, kimyasal bileşimleri Çizelge 3.1'de verilen her biri 500 ml miktarındaki Kırşehir-Bulamaçlı, Batman-Kozluk-Taşlıdere, İzmir-Balçova, Hatay-Hamamat, Hatay-Başlamış ve Osmaniye-Haruniye jeotermal sahalarından alınan sekiz farklı içeriklere sahip jeotermal su, 500 ml saf su ve yaklaşık olarak 290 g bentonit, 7 g XCD, 13 g CMC kullanılmıştır. Jeotermal suların seçiminde hem kaynak sulardan hem de jeotermal kuyu sularından örnekler alınmıştır.

3.1.2. Çalışmada Kullanılan Alet ve Ekipmanlar

Çamur numunelerinde bulunan bileşenler belirli ölçülerde kullanılmaktadır. Çizelge 3.1' de belirtilen miktarlardaki çamurları hazırlamak için hassas terazi kullanılmıştır. Hassas terazi, maddenin ağırlığını ölçmek için kullanılan bir araçtır. Çalışmada Denver Instrument Company'nin S-4002 modeli kullanılmıştır. Bu elektronik bir modeldir ve ölçümlerden önce kalibre edilmelidir. Ölçülebilir maksimum miktar 4000 gram olup 0.01 hassasiyetindedir (Denver, 2006) (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Elektronik hassas terazi

Çamur numunelerinin hazırlanması aşamasında kullanılan bentonit ve polimerlerin su ile homojen bir karışım oluşturabilmesi için Hamilton-Beach marka multi-mikser (çoklu karıştırıcı) kullanılmıştır. Şekil 3.2 çalışmadaki çoklu karıştırıcıyı göstermektedir.



Şekil 3.2. Çoklu karıştırıcı

Çalışmada çamurların reolojik özelliklerini ölçmek için Fann Model 50 SL Yüksek Sıcaklık-Yüksek Basınç (YSYB) Reometresi kullanılmıştır. Reometre, sondaj sıvılarının viskozitesini ölçmek için kullanılan yüksek hassasiyetli, ikili silindirden oluşan döner viskometredir. Bu cihaz, belirli sıcaklık altında basınç, kayma hızı, kayma gerilmesi, zaman ve viskozite gibi ölçülen verilerin kaydedilebildiği birçok avantaja sahiptir. Sondaj sıvısının reolojisi, yüksek hassasiyet ile istenilen kayma hızında, sıcaklıkta ve basınçta ölçülebilmektedir. Genel amaçlı olarak geniş bir yelpazede işlev göstermektedir. Model 50 SL Reometre bingham plastik akış, pseudoplastik (power law akışkan içeren) ve dilatent gibi reolojiye bağlı kayma hızını karakterize etmek için kullanılabildiği gibi, zamana bağlı tiksotropik ve reopektik akış davranışları çalışılabilmektedir. Fann model 50 SL Reometre, Remote Control Option (RCO) ara yüzü ve bilgisayar ile bağlantılı çalışmaktadır. Reometrenin operasyonları, reometreden bilgisayar ara yüzüne yönlendirilen enerji aktarımını yapan sinyaller tarafından algılanarak izlenir. Bilgisayar, Reometrenin uygun operasyonel sinyalleri ile ara yüz boyunca etkisini gösterir. (Fann-Manuel, 2015).

Numuneler iki eşmerkezli silindir arasındaki anülüste test edilir. Numune kabı adı verilen dış silindir, öngörülen bir açısız hızla (dev/dak) döndürülerek test sıvısından kaynaklanan viskoz sürtünme, bob adı verilen iç silindirin yüzeyine etki eder. Bobun yüzeyindeki kayma kuvveti, bob şaftında hassas bir berilyum-bakırdan yapılan burulma yayının açısız yer değiştirmesi sonucunda ortaya çıkan tork olarak ölçülür. Tork değeri, yayın açısız sapmasına göre doğru, yüksek çözünürlüklü bir açı algılayıcı dönüştürücü ile doğrusal olan bir elektrik sinyaline dönüştürülür ve kayma gerilmesi (shear stress) değerlerinin analiz edilmesini sağlar (Fann-Manuel, 2015).

Reometrenin en önemli özelliği istenen sıcaklığa ayarlanabilmesi olup, ancak sıcaklık 260 °C'yi aşmamalıdır. Reoloji yüksek sıcaklıklarda ölçüldüğünde, numunenin buharlaşmaması için numuneye basınç uygulanmalıdır. Basınç ayarlamak için reometrede hat basıncı (line pressure) ve uygulanan basınç (head pressure) olarak 2 basınç düğmesi bulunmaktadır. Hat basıncı, dış basınç kaynağından reometreye basınç sağlayıp en yüksek 3000 psi basınç vermektedir. Uygulama basıncı düğmesi, numuneye basınç vermek için kullanılır ve 1000 psi'yi geçmemelidir (Fann-Manuel, 2015). Isıtma banyosu ile sıcaklık artırılmakta veya azaltılmaktadır. Yağ, numune kabını istenilen sıcaklığa ısıtıp soğutmak için

kullanılmakta, ayrıca banyo yağı, belirli açısız hız rotasyonları sırasında sıcaklığı sabit tutmakta ve testten kesin veriler alınmasını sağlamaktadır.

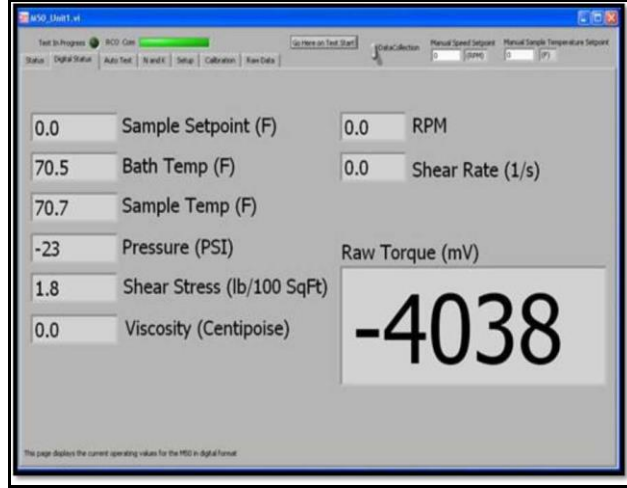
Reometre ile torsiyon yayları, boblar ve numune kapları değiştirilerek geniş aralıklarda viskozite ölçülebilmektedir. Çalışmada, çamur doldurmak için kullanılan reometre kabı 42 ml kapasiteye sahiptir. Şekil 3.3 araştırmada kullanılan reometreyi göstermektedir.



Şekil 3.3. Fann Model 50 SL Reometre

Çamur numunelerinin reolojisi 3, 6, 100, 200, 300 ve 600 devirlerde genel olarak ölçülür ve Reometre'nin nominal hızı 2 ile 600 dev/dak aralığındadır. Numune kabı döndürülerek kayma gerilmesi değerleri ölçülür ve RCO aracılığıyla bilgisayar'a gönderilir ve excel dosyasına (*.csv) formatında kaydedilir.

Reometrenin bilgisayar programı RCO üzerinden kontrol edilir. Programda, durum, dijital durum, otomatik test, N ve K, kurulum, kalibrasyon ve ham veriler olmak üzere 6 ana bölüm bulunmaktadır. Şekil 3.4 YSYB reometresinin programını göstermektedir. Reometre durumunu kontrol etmek için cihazın özel sıvıyla kalibre edildiği kalibrasyon bölümü de vardır. Şekil 3.4'de görüldüğü üzere, ham tork daima negatif değer almalıdır.



Şekil 3.4. YSYB reometre programı

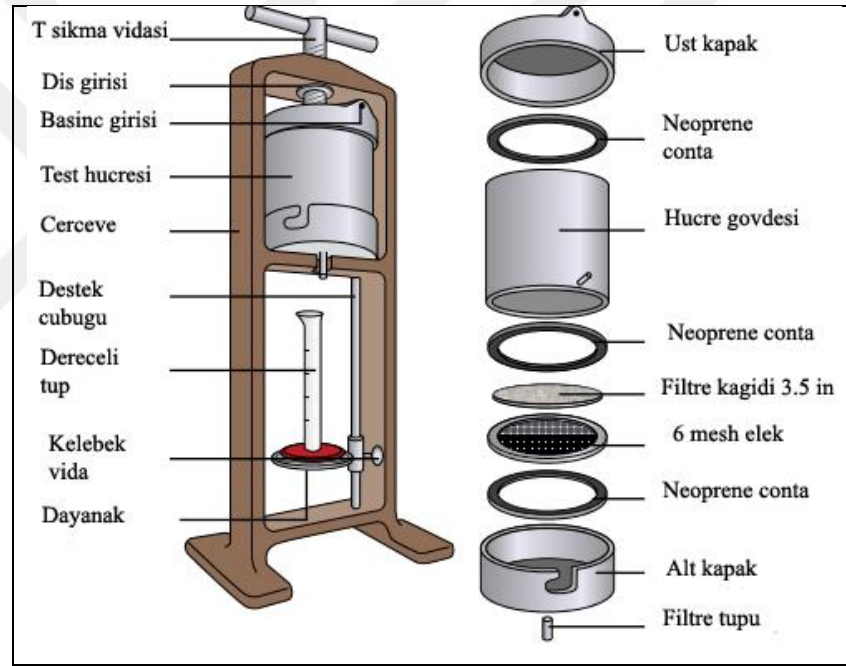
Hazırlanan numunelerin ortam koşullarındaki plastik viskozite, akma noktası ve jel mukavemetleri Fann Model 35 viskozimetre ile ölçülmüştür. Test sıvısı, silindirler arasındaki dairesel boşluk veya kayma aralığında bulunarak, sıvı tarafından uygulanan sürtünme, iç silindir veya bob üzerinde bir tork oluşturur. Bu tork, test koşulları ve cihaz sabitlerine bağlı hassas bir yaya iletilir. Kayma gerilmesi doğrudan kalibre edilmiş bir ölçekten okunur (Fann-Manuel, 2016). Model 35 viskometre şekil 3.5'de gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Fann Model 35 viskozimetre (Fann-Manuel, 2016).

Numunelerin ortam sıcaklığında sıvı kaybını ölçmek için API standart filtre presi kullanılmıştır (Şekil 3.6). API standart filtre presi 100 ± 5 psi (6.89 ± 0.3 kg/cm²) basınç, 30 dakikalık zaman ve ortam sıcaklığında çamurun su kaybını ölçmeye yaramaktadır.

Bu su kaybı değerine API standart su kaybı da denmektedir. Basınç kaynağı olarak kompresör hattından yararlanılabileceği gibi, pompa, basınçlı gaz tüpü kaynaklarından da yararlanır. Basınç iletici olarak hava, su, karbondioksit ve azot kullanılır (Özüdoğru ve Babür, 2009). OFITE düşük basınçlı filtre presi, sondaj sıvılarının filtreleme ve duvar kek yapısı özelliklerini belirlemeye yardımcı olmaktadır. Şekil 3.5’de API filtre presinin parçaları verilmiştir. Filtre presi tasarımı, çamur numunesini tutmak için bir hücre gövdesi, bir basınç girişi, elek ve filtre kağıdına sahip bir taban kapağı içerir. Basınç hücresi, 3½ "(9 cm) filtre kağıdı bölmenin altına yerleştirilerek sıvı parçacıklarının alınması için tasarlanmıştır. Filtreleme alanı $7.1 \pm 0.1 \text{ in}^2$ ($4,580 \pm 60 \text{ mm}^2$)'dir (Ofite-Manuel, 2016).



Şekil 3.6. API sıvı kaybı cihazı ve parçaları (Ofite-Manuel, 2016).

Çamur numunelerinin yüksek sıcaklıkta sıvı kayıplarını ölçmek için API Yüksek Sıcaklık-Yüksek Basınç (YSYB) filtre presi kullanılmıştır. Bu filtre presi, yüksek sıcaklık ve basınçlarda geçirgen bir formasyona karşı filtrasyonu canlandırmaktadır. API filtre presi ve YSYB filtre presi arasındaki fark, filtre kağıdının alanı olup, API filtre presi filtre kağıdı 45 cm^2 alana sahiptir ve YSYB filtre presinin alanı API filtre presinin yarısıdır. API filtre presi ortam sıcaklığında ve 100 psi basınçta çalıştırılırken, YSYB filtre presi ise, maksimum 500 °F ve maksimum 1800 psig olmak kaydıyla

istenilen sıcaklık ve basınca ayarlanabilir (Fann-Manuel, 2014; Bourgoyne ve ark., 1991). Basınç kaynağı olarak karbondioksit veya azot gazı kullanılmaktadır. Fann Yüksek Sıcaklıklı, Yüksek Basıncılı (YSYB) Filtre Presi, API spesifikasyonlarını karşılayan güvenli ve verimli testler için tasarlanmıştır. Sektörde 175 ml ve 500 ml olmak üzere 2 tip YSYB filtre presi bulunmaktadır. Çalışmada 500 ml YSYB Filtre Presi kullanılmıştır. Deney sırasında suyun buharlaşmasını önlemek için 750 psig geri basınç uygulanmalıdır (Fann-Manuel, 2014). YSYB filtre presi, ölçüm yapılmadan önce parçalarıyla birlikte ve ölçüm esnasında Şekil 3.7' de verilmiştir.



Şekil 3.7. API Yüksek Sıcaklık Yüksek Basınç Filtre Presi ölçümden önce parçaları ile birlikte ve ölçüm esnasındaki görünümü

Sondaj uygulamalarında gözlemlenen en önemli özelliklerden biri çamur yoğunluğu/ağırlığı'dır. Çamur numunelerin ağırlıklarının ölçümünde çamur terazisi kullanılmıştır. Şekil 3.8 çamur terazisini göstermektedir. Çamur terazisi bir tarafında sabit hacimli bir kap ile karşı ağırlıktaki kolu ve kol üzerinde hareket eden ölçme ağırlığından oluşur. Terazide doğru ölçmeye yardımcı olan bir seviye balonu bulunur. Okumaların doğruluğu, sondaj çamuru sıcaklığından etkilenmez. Bunlar 6,5 ile 23 aralığında olan lb/gal, 0,79-2,72 g/cm³ aralığında değişen spesifik gravite, 49-173 aralıklı lbs/ft³ ve 340-1190 aralıklarında psi/1000 ft birimleri bulunup istenilen birimden okumalar kaydedilir. Boyutu 55×11×10 cm olup ağırlığı 1,9 kg' dır.



Şekil 3.8. Çamur terazisi

Çamur numunelerinin pH'larının ölçümünde pH kağıtları kullanılmıştır. pH terimi, sulu çözeltilerdeki hidrojen iyonunun konsantrasyonudur ve aşağıdaki formülle tanımlanır:

$$pH = -\log [H^+] \quad (3.1)$$

Burada $[H^+]$, litre başına mol cinsinden hidrojenin iyon konsantrasyonudur. pH kağıdı, sıvıların alkalinitesini ölçmek için kullanılan bir araçtır. pH kağıdının başka bir adı Litmus kağıdıdır. Alkalinite, sondaj sıvılarının önemli bir parametresidir. Sondaj sıvısının pH değeri genel olarak $pH = 9$ 'da korunmaktadır. Sıvı asidik, bazik veya nötr olabilir.

$0 \leq pH < 7$ ise, asitli çözelti

$pH > 7$ ise, bazik çözelti

$pH = 7$ ise, nötr çözelti

Sıvıların asitliğini ölçmek için kullanılan pH metre cihazı da vardır ve Litmus kağıdına kıyasla yüksek hassasiyettedir.

Çamur numunelerinin ayrıca kek kalınlıkları ölçülmüştür. Bu amaçla Verniyer Tipi Kumpas kullanılmıştır. Kumpas, pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Petrol endüstrisinde de sondaj sıvısının önemli bir parametresi olan çamur kek kalınlığını ölçmek için kullanılır. Güvenilir ölçümler yapmak için kumpas çamur pastasına düzgün uygulanmalıdır. Gerçek ölçümlerin alınması, çoğu zaman kullanıcının becerisine bağlıdır. Kalibreye uygulanan kuvvet miktarı ölçüyü etkilemektedir. Çok fazla kuvvet endikasyona neden olurken, çok az kuvvet yetersiz temas verir ve fazla gösterge ile sonuçlanır.

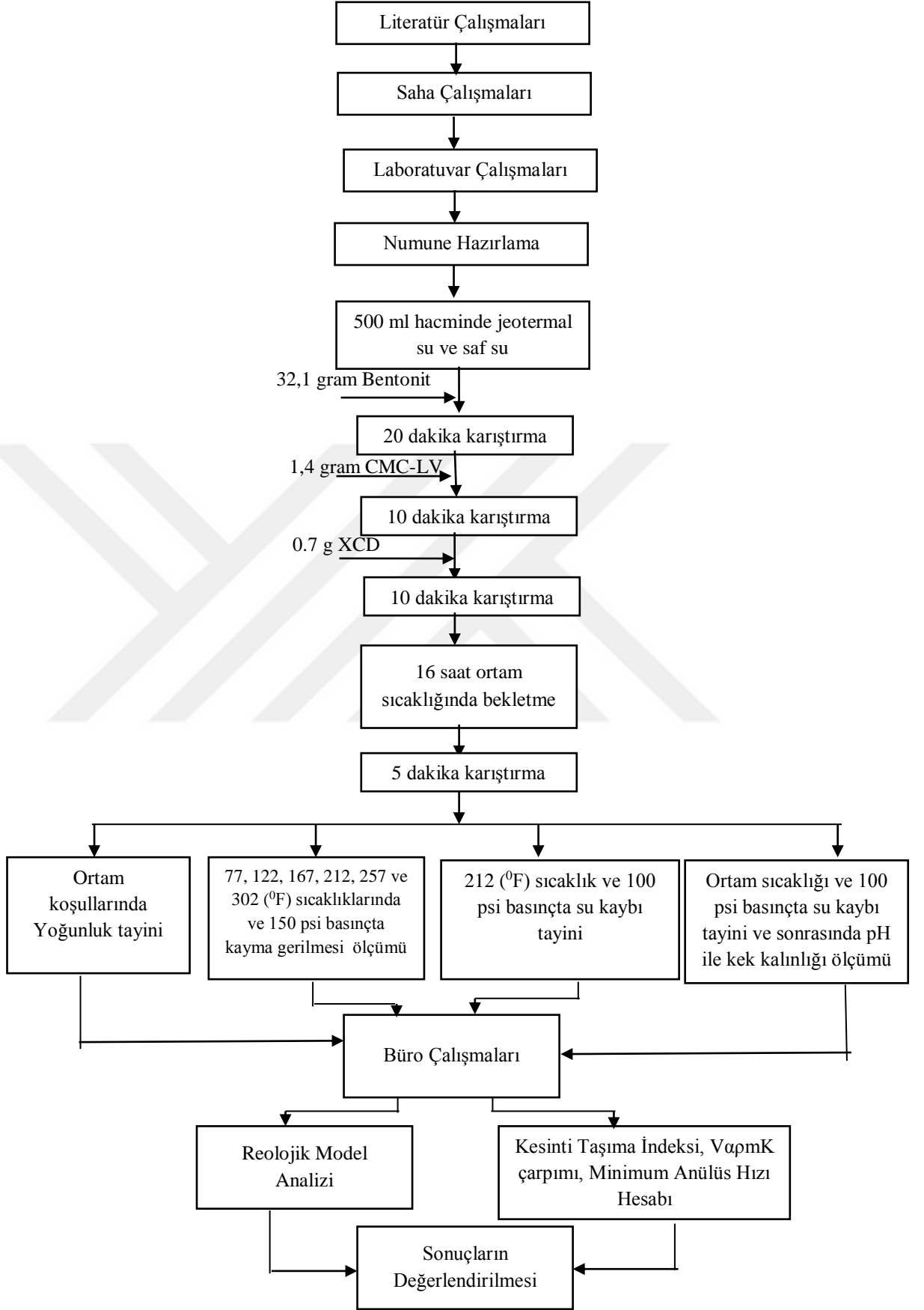
3.1.3. Çalışmada Kullanılan Bilgisayar Yazılımları

Akışkan numunelerinin reolojik davranışını en iyi ifade eden reolojik modelin tayini için MATLAB programı kullanılmıştır. MATLAB eğri uydurma araç kutusu (Matlab curve fitting toolbox), YSYB reometresi ile ölçülen verilerin modellenmesi için kullanılır. Matlab programı kayma gerilmesi değerlerini modellemenin kolay bir yolunu sunmaktadır. Bu çalışmada ayrıca kayma gerilmesi ve kayma hızı arasındaki ilişkiyi gösteren reolojik model istatistiksel olarak incelenmiştir. Matlab curve fitting toolbox, veriler programa yüklendikten sonra model parametreleri ve istatistiksel sonuçlarını (R^2 , SSE (Hata nedeniyle kareler toplamı) ve RMSE (Kök ortalama kare hatası)) vermektedir (Curve Fitting Toolbox, 2004).

Resimler üzerinde düzenleme yapmak amacıyla Adobe Photoshop 7.0, grafik çizimleri için sayısallaştırma programı ve Microsoft Excel kullanılmıştır.

3.2. Metod

Bu çalışma genel olarak literatür çalışmaları, saha çalışmaları, laboratuvar çalışmaları ve büro çalışmaları olarak dört aşamada tamamlanmıştır. Çalışmada, öncelikle farklı sahalardan su numuneleri alınmış, daha sonra bu sularla hazırlanan çamur numuneleri üzerinde sırasıyla Şekil 3.9' de belirtilen aşamalar izlenerek bir takım deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Bu aşamalar ve detayları aşağıdaki bölümlerde verilmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.9. Çalışmanın şematik gösterimi

3.2.1. Literatür Çalışmaları

Literatür çalışmaları, araştırmanın hemen hemen her aşamasında yapılmıştır. Sonuçta jeotermal kaynak suların sondaj çamurunun reolojik özelliklerine etkisine dair herhangi bir çalışma ile karşılaşılmadığından bu çalışmanın amacı literatürün bu noktadaki eksikliğini doldurmak olmuştur. Literatür taramasında derlenen bilgiler geniş olarak önceki çalışmalar bölümünde verilmiştir.

3.2.2. Saha Çalışmaları

Saha çalışmaları, jeotermal suların araziden alınması işlemlerini içermektedir. Jeotermal suların sıcaklıkları yüksek olduğu için numune alınırken uygun kıyafet ve numune kapları tercih edilmiştir. Daha önceden temizlenmiş ve saf sudan geçirilmiş olan sıcaklığa dayanıklı olan plastik numune kapları kullanılmıştır. Kaplarda hava kalmayacak şekilde doldurulmuş ve ağzı kapatılmıştır. Kapların üzerine alınan sahanın adı yazılmıştır.

Çalışmada Kırşehir-Bulamaçlı, Batman-Kozluk-Taşlıdere, Hatay-Hamamat, Osmaniye-Haruniye jeotermal sahalarında birer farklı, Hatay-Başlamış jeotermal sahasından ikişer farklı yüzeyleyen sulardan, İzmir-Balçova ve jeotermal sahasından ise ikişer farklı kuyu suyu numunesi alınmıştır.

3.2.3. Laboratuvar Çalışmaları

3.2.3.1. Numune Hazırlama

Kırşehir-Bulamaçlı, Batman-Kozluk-Taşlıdere, İzmir-Balçova, Hatay-Hamamat, Hatay-Başlamış ve Osmaniye-Haruniye jeotermal sahalarından alınan sular ile Şekil 3.9' da verildiği gibi, 500 ml'lik API standartlarına göre kil-su oranı korunarak 32,14 g bentonit olacak şekilde 20 dakika karıştırılmış daha sonra ilk olarak çamura 1,4 g sıvı kaybı önleyici CMC-LV (Karboksimetilselüloz) eklenip 10 dakika karıştırılmış son olarak 0,7 g viskozite düzenleyici XCD (Zantam Sakızı) eklenip homojen karışım oluşabilmesi için 10 dakika karıştırılarak, 500 ml'lik 1 adet saf su ile ve kullanılan

suyun çamur üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla aynı materyal ve miktar içerikli olmak üzere, söz konusu sahalardan temin edilen jeotermal sularla toplam dokuz adet çamur numunesi hazırlanmıştır. (Çizelge 3.1). Hazırlanan çamurlar ortam sıcaklığında hava alınmayacak şekilde ağızları streç film ile kapatılıp, API standartlarında bentonit çamurları için belirlenen 16 saat süresince bekletilmiştir (Şekil 3.10). Kırşehir-Bulamaçlı suyu ile hazırlanan çamur numunesi J1, Batman-Kozluk-Taşlıdere jeotermal suyuyla hazırlanan çamur numunesi J2, kimyasal içerikleri farklı olan İzmir-Balçova jeotermal suyuyla hazırlanan çamur numuneleri J3 ve J4, Hatay-Hamamat jeotermal suyuyla hazırlanan çamur numunesi J5, yine kimyasal içerikleri farklı olan Hatay-Başlamış jeotermal suyuyla hazırlanan çamur numuneleri J6 ve J7, Osmaniye-Haruniye jeotermal suyuyla hazırlanan çamur numunesi J8 ve son olarak saf su ile hazırlanan çamur numunesi S1 olarak etiketlenmiştir. Bekleme süresinin ardından, her numune 5 dakika karıştırıldıktan sonra deneysel ölçümler yapılmıştır.



Şekil 3.10. Çamur numunelerinin yaşlandırılması

Laboratuvar çalışmaları sırasında materyal bölümünde bahsedilen API ekipmanlarıyla API standartlarına göre hazırlanan çamur numunelerinin deneysel çalışmasında API Standartları kullanılmıştır (API RP-13B-1, 2003). Bu bağlamda hazırlanan çamur numunelerinin ortam sıcaklığında ve yükselen sıcaklıklarda reoloji, sıvı kaybı deneyleri ayrıca ortam sıcaklığında ağırlık ve pH tayini deneyleri API önerilerine göre yapılmıştır (API RP-13B-1, 2003).

Çizelge 3.1. Çamur numunelerinin kompozisyonu

Çamur Numuneleri	Katkı Maddeleri	Materyal Miktarı
J1	Su +Bentonit +CMC+ Polimer (XCD)	Kırşehir-Bulamaçlı Jeotermal Suyu=500 ml Bentonit=32.1 gram CMC=1.4 gram XCD=0.7 gram
J2	Su +Bentonit +CMC+ Polimer (XCD)	Batman-Kozluk-Taşlıdere Jeotermal Suyu=500 ml Bentonit=32.1 gram CMC=1.4 gram XCD=0.7 gram
J3	Su +Bentonit +CMC+ Polimer (XCD)	İzmir-Balçova Jeotermal Suyu=500 ml Bentonit=32.1 gram CMC=1.4 gram XCD=0.7 gram
J4	Su +Bentonit +CMC+ Polimer (XCD)	İzmir-Balçova Jeotermal Suyu=500 ml Bentonit=32.1 gram CMC=1.4 gram XCD=0.7 gram
J5	Su +Bentonit +CMC+ Polimer (XCD)	Hatay-Hamamat Jeotermal suyu=500 ml Bentonit=32.1 gram CMC=1.4 gram XCD=0.7 gram
J6	Su +Bentonit +CMC+ Polimer (XCD)	Hatay-Başlamış Jeotermal Suyu=500 ml Bentonit=32.1 gram CMC=1.4 gram XCD=0.7 gram
J7	Su +Bentonit +CMC+ Polimer (XCD)	Hatay-Başlamış Jeotermal Suyu=500 ml Bentonit=32.1 gram CMC=1.4 gram XCD=0.7 gram
J8	Su +Bentonit +CMC+ Polimer (XCD)	Osmaniye-Haruniye Jeotermal Suyu=500 ml Bentonit=32.1 gram CMC=1.4 gram XCD=0.7 gram
S1	Su +Bentonit +CMC+ Polimer (XCD)	Saf Su=500 ml Bentonit=32.1 gram CMC=1.4 gram XCD=0.7 gram

3.2.3.2. Viskozite Ölçümü

Reolojik özelliklerin ölçümü Fann Model 50 SL Reometre ile yapılmıştır. Reometrede, yarıçapı 1.7245 cm ve 7.62 cm uzunluğa sahip standart bob (B1), 1.8415 cm iç çapa sahip standart kap (R1) ile 42 ml'lik numune kullanılmıştır. Deneye başlarken ilk olarak ham tork değerini kontrol edilerek, bob şafta takılır. Ham tork değeri yaklaşık -3500 ve -4000 mV değerinde olmalıdır. Bobu takmak için uygulanan aşırı tork, aparata zarar vermekte ve bu da ölçümlerde sorunlara neden olabilmektedir. Ölçüm yapılmak istenen sıcaklıklar, döndürme hızları, hangi devirlerde kaç dakika boyunca döndürülmek istendiği sıcaklıkların artış miktarı excel dosyasında kaydedilir. Çalışmada deneye başlarken “Auto Test” bölümünden veillerin girildiği excel dosyası yüklenir ve istenilen bir isimle kaydedilir. Son olarak, basınç ayarlama regülatöründen gelen basıncı ayarlayarak test başlatılabilir.

Yüksek sıcaklıklarda reoloji ölçülmek istendiğinde öngörülen sıcaklıkta akışkanın kaynayabileceği göz önünde bulunmalıdır. Öngörülen sıcaklıkta test sıvısının kaynamaması için doygunluğa ulaşacağı basınç değerinden daha fazla basınç uygulanarak sıkıştırılır ve kaynama noktası arttırılarak reoloji ölçülebilir.

Hazırlanan çamur numunelerinin ortam sıcaklığındaki reolojik özellikleri altı hızlı Fann model 35 viskometre ile ölçülmüştür. Viskometre ile ölçüm için öncelikle viskometre kabı henüz karıştırılmış olan çamurla işaretli seviyeye kadar doldurulur ve rotor üzerindeki çizgiye kadar çamura batırılır. Rotor istenen hızda (600, 300, 200, 100, 6 ve 3 (rpm)) hızlarında döndürülür. Kadrandaki ibre sabit duruma geldiği okuma döndürülen hızdaki okuma olarak kaydedilir (Fann-Manuel, 2016).

Kayma hızında artışla viskozitenin azalması kayma incilmesi, viskozite düşmesi, (shear thinning) olarak adlandırılır ve normalde istenilen bir özelliktir. Çünkü viskozite yüksek kayma hızlarının olduğu tijlerde ve matkapta düşük olduğunda, pompalama basınçlarını düşürecek ve ilerleme hızını arttıracaktır. Ayrıca düşük kayma hızlarının olduğu anülüste ise daha düşük olup taşıma kapasitesini arttırarak kuyu temizliği sağlar. Akma noktasının (YP) plastik viskoziteye (PV) oranı (YP/PV) kayma hızıyla incelmenin bir ölçüsüdür. Bu oran ne kadar yüksek olursa kayma hızıyla incelme o kadar yüksek olur (Bourgoyne ve ark., 1991, Caenn ve ark., 2011; Skalle, 2011). 600 ve 300 rpm hızlarındaki okumalar (θ_{600} ve θ_{300}) kullanılarak plastik viskozite

Denklem (3.2) ile ve akma noktası Denklem (3.3) ve basit bir şekilde aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$PV = \theta_{600} - \theta_{300} \text{ (cp)} \quad (3.2)$$

$$YP = \theta_{300} - \mu_p \text{ (lb/100ft}^2\text{)} \quad (3.3)$$

3.2.3.3. Filtrasyon Ölçümü

Sondaj sıvıları, katı ve sıvı fazdan oluşur. Sondaj çamuru, yüzeysel tıjlerden, ağırlık borularından ve matkap nozullarından geçip anülüs kesitinden yüzeyle gelmektedir. Çamurun dolaşımı, kuyunun güvenli bir şekilde delinmesi için kesintisiz bir işlemdir. Sondaj, gözenekli ve geçirgen ortamda yapılır. Hidrostatik basınç, en azından gözenek basıncına eşit olmalıdır. Genel olarak, hidrostatik basınç gözenek basıncından daha yüksektir. Çamur dolaşımında, çamurdaki katı parçacıklar geçirgen formasyonu örter. Su, çamurlu kekten delinmiş formasyona akar. Yeraltı formasyonun realitesini anlamak için filtrasyon testleri yapılmaktadır. Filtreleme testi su kaybını ve çamur kek kalınlığını ölçmek için yapılır. Çamurlara diferansiyel basınç uygulanır ve sıvı faz filtre kağıdından süzülür ve filtreleme sonucunda çamur keki oluşur. Sondaj sıvılarının filtrasyon özelliklerini değerlendirmek için Fann Yüksek Sıcaklık Yüksek Basınç (YSYB) filtre presleri kullanılır. Filtreleme davranışı, sıcaklık ve basıncın yanı sıra çamurun türüne ve partikül boyutuna göre değişmektedir.

API filtre presinin filtrasyon alanı 7,1 in² olup, 45,8 cm²'ye eşittir. YSYB filtre presinin ise 3,5 in² olup 22,58 cm²'ye eşittir. Dolayısıyla YSYB filtre presinin deneysel sonuçları alınırken, filtre presleri arasındaki alan farkından dolayı API su kaybını elde etmek için YSYB su kaybı değerini ikiye katlamak gerekir (Caenn ve ark., 2011, APC, 1994).

Sondaj çamurunun bakımı ve kontrolü için filtrasyon özelliklerinin ve filtre keki özelliklerinin ölçülmesi gereklidir. Standart API sıvı kaybı ölçmek için, öncelikle filtre presinin alt kabı hazırlanır. Alt kap üzerine sırasıyla lastik conta, elek, filtre kağıdı, lastik conta yerleştirilir. Test hücresi, alt kaba sıkıca yerleştirildikten sonra, üzerinden 1/4" ($\approx 6.5\text{mm}$) boşluk kalana kadar çamurla doldurulur ve taşıyıcı iskelet üzerine yerleştirilir. Test hücresinin üzeri lastik conta ve üst kap parçasıyla kapatılarak "T" vida

sıkılır. İskeletin altına dereceli bir cam tüp konulduktan sonra, sisteme üstten bağlanmış olan hortumla 100 psi basınç verilir ve zaman tutulur. 30 dakika sonra basınç verilmesi durdurularak kabın altındaki dereceli tüpte biriken filtre sıvısı değeri kayıt altına alınır (Özüdoğru ve Babür, 2001).

YSYB sıvı kaybı, standart API sıvı kaybına benzer şekilde ölçülür. YSYB filtre presinin parçaları hazırlanır. Bunlar; kap tabanı, lastik conta, elek, bir tabaka filtre kağıdı, lastik conta ve üst kaptır. API filtre presinden farklı olarak hücre haznesinin alt ve üst kapağı 6 adet vidayla sıkılmaktadır. Çamur hücre haznesinin alt ucunda sıvının tahliye edileceği uçları açık, uzun ve ince giriş valfi gövdesi bulunup, ayrıca üst kısmında da yapı olarak alt ucundaki aparata benzer olan basınç girişini çamur hücre haznesine iletecek çıkış valfi gövdesi bulunmaktadır. Test edilecek çamur, 500 ml'lik hücre haznesine doldurulur. Çamur hücre haznesi ana YSYB gövdesine yerleştirilir. İstenilen basınç değeri regülatörden ayarlanarak çamur hazne hücresine uygulanır. İstenilen sıcaklığa gelecek şekilde ana gövde üzerinde yer alan ısıtma düğmesi ayarlanır. Isınma esnasında anlık sıcaklık değeri hazne üstündeki termometreden kontrol edilebilmektedir. İstenilen sıcaklık değerine ulaşıldığında çamur hücre haznesinin alt ucu gevşetilerek istenilen zaman aralıklarında toplanan filtratlar kaydedilir.

Hazırlanan numunelerin API standart filtre presi ve Yüksek Sıcaklık-Yüksek Basınç (YSYB) filtre presi ile sıvı kayıplarının ölçümünden sonra oluşan kek kalınlıkları verniyer tipi kumpas ile ölçülerek kaydedilmiştir (Şekil 3.11). YSYB sıvı kaybı testi, standart API testinden daha titizdir ve yüksek sıcaklık ve basınçta sondaj yapılırken daha uygundur. Kompozisyon ve partikül büyüklüğü dağılımı açısından çamur kalitesi hakkında daha iyi bir fikir verir (Azar ve Robello Samuel, 2007).



Şekil 3.11. Çamur kek kalınlığı ölçümü

3.2.3.4. Ağırlık (Yoğunluk) Tayini

Sondaj çamurunun yoğunluğu, sondaj çamurunun ana özelliklerinden biridir. Sondaj çamurlarında, çamurun yoğunluğu özgül ağırlık olarak tanımlanmakta ve çamur ağırlığı deyimi kullanılmaktadır. Çamur yoğunluğu lb/gal, lb/ft³, g/cm³ ve psi/1000 ft birimleriyle ifade edilmektedir. Çamur ağırlığı tayini için, öncelikle terazi haznesi, yoğunluğu ölçülecek çamur ile doldurulduktan sonra kapak, hazne üzerine koyulur. Haznenin dolu olduğuna emin olmak için kapaktaki delikten dışarıya bir miktar çamur akmalıdır. Kapaktaki delik, parmak ile kapatılmış bir şekilde haznenin ve terazi kolunun yüzeyine bulaşmış çamurun tümü yıkanır veya silinir. Terazî dayanma noktasına yerleştirilir ve terazinin kolu üzerindeki ağırlık hareket ettirilerek hazne ve kolunun dengelenmesi sağlanır. Terazî kolu üzerinde hareket ettirilen ağırlığın, sol el tarafına gelen kenarındaki değer çamur yoğunluğu değerini gösterir. Okuma istenilen birimden yapılarak, sonuç lb/gal, lb/ft³, g/cm³ veya psi/1000 ft olarak kaydedilir (Caenn ve ark., 2011).

3.2.3.5. pH Tayini

pH ölçümünde kullanılan skala 1-14 arasında olup, numunenin pH değerinin 7'den az olması asidik, 7'den yüksek olması bazik ve 7 olması nötr olduğu anlamına

gelmektedir. Çamurun pH değeri, kilin daha iyi şişmesi, metal malzemelerin kimyasal korozyonu ve bazı kimyasal çamur katkı maddelerinin reaksiyona girmesiyle direk olarak ilgili olduğu için, önem arz etmektedir (Özüdoğru ve Babür, 2011). pH kağıdı ile pH tayini için, pH ölçüm kağıdı ölçüm yapılmak istenen çamurun filtratına ya da çamura batırılır. 10 – 15 saniye boyunca kağıttaki renk değişimi için beklenir. Renk değişimi durduğunda, pH ölçüm kağıdı renkli kısmı üste gelecek şekilde pH kutusunun üzerindeki renklerin yanlarına getirilir ve en yakın renge karar verilerek çamur filtratının veya çamurun pH değeri okunur (Azar ve Robello Samuel, 2007).

3.2.4. Büro Çalışmaları

Bu bölüm, yapılan deneysel çalışma sonucu elde edilen verilerinin değerlendirilmesi, formüle edilen çamur numunelerinin davranışlarının açıklanmasında kullanılacak reolojik model analizini, yine formüle edilen çamur numunelerinin kesinti taşıma indeksleri, etkin kuyu temizliği için gerekli minimum anülüs hız değerlerinin hesaplanması ve tez yazım aşamasını içermektedir.

3.2.4.1. Reolojik Model Tespiti ve Model Tahminlerinin Karşılaştırılması

Sondaj sıvısı davranışını değerlendirmek için reolojik özelliklerin önemli uygulamaları, kuyu temizleme, kuyu erozyonu, kesintilerin süspansiyonu, hidrolik hesaplamalar ve sondaj sıvısı bakımı ile ilgili problemlerin çözümünde bulunmaktadır. Kayma gerilmesi ve kayma hızı ve ölçümleri içeren kavramlar, sondaj akışkanlarının akışının matematiksel olarak tanımlanmasını sağlar. Kayma hızı ve kayma gerilmesi, sondaj endüstrisinde yaygın olarak kullanılan iki temel ölçümdür ve bunların ilişkileri, akışkan akışının türünü tanımlar (Kök ve Alikaya, 2005).

Sondaj sıvılarındaki kayma hızıyla kayma gerilmesini ilişkilendiren doğru bir reolojik model, kuyu hidroliğinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi için her zaman gereklidir. Hidrolik programın önemli bir parçası olan sirkülasyon sistemindeki sürtünme basınç kayıplarının hesaplanmasında bir reolojik model şarttır. Sondaj sıvılarının anülüs akış performansı kuyu problemlerini en aza indirmek için önemli bir noktadır. Herhangi bir anüler hesaplamasının ilk adımı, sondaj akışkanlarının kayma

gerilmesi ve kayma hızı arasındaki ilişkiyi tanımlamaktır (Gücüyener, 1983). Hidrolik sistem sondaj çalışmaları sırasında aktif bir rol oynayarak, doğru tasarımı sondaj çalışmalarını hızlandırabilir ve toplam maliyeti düşürebilir (Merlo ve ark., 1995).

Sondaj kuyusunun hidroliğini sondaj sıvısının viskozitesi belirler. Viskozitenin tam olarak gösterilmesi, pompalanan akışkanın türüne ve akışkan parametrelerinin değerlendirilmesi için kullanılan reolojik modele göre değişir. Birçok akışkanın özelliği, sistemin reolojisine bağlıdır (Viloria Ochoa, 2006). Newtonian akışkanlarda kayma gerilmesi-kayma hızı ilişkisi basit bir matematiksel eşitlikten oluşur. Buna karşın non Newtonian akışkanların reolojisini tam olarak anlatan bir matematiksel eşitlik yoktur. Bu konuda çeşitli modeller önerilmiştir. Bunlara reolojik modeller denir. Bunlar reolojik temel modellerden olan Bingham Plastik, Power Law ve Herschel Bulkley modelleridir. Gerçeğe daha yakın sonuçlar veren ve bu temel modellerden türetilmiş modeller de bulunmaktadır (Özüdoğru ve Babür, 2001).

Akış eğrisi veya reogram, bir döner viskometrede elde edilen kayma hızına karşılık gelen kayma gerilimi okumalarının grafiğidir. Fann viskozimetrenin geometrisi ve kalibrasyonu nedeniyle, gerçek kayma gerilmesi (τ), elde edilen okumaların 1.06 ile çarpılmasıyla elde edilir. Bu sabit normalde göz ardı edilir (okumaları Bingham modelinden farklı modeller için uygularken) ve böylece okumaların (θ) kayma gerilmesine (τ) eşit olarak kabul edilmesi hatalı olacaktır (Skalle, 2011).

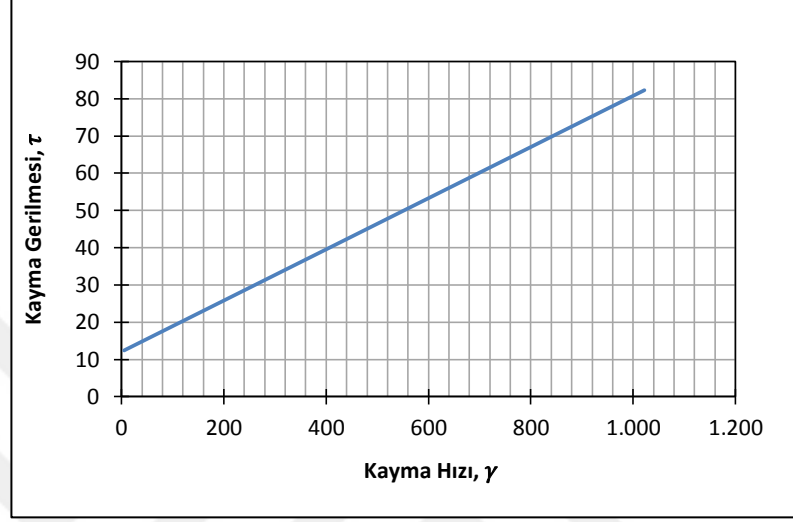
Bingham Plastik Modeli: Sondaj sıvıları için kullanılan en yaygın reolojik modeldir. Bu model, spesifik bir kayma gerilmesi aşıldığında kayma gerilmesi/kayma hızı oranının doğrusal olduğu bir sıvıyı tanımlar. Bu modeli tanımlamak için plastik viskozite ve akma noktası olarak iki parametre kullanılmıştır (Bingham, 1916). Bu sabitler kayma hızları 511 ve 1022 arasında belirlendiğinden, bu model yüksek kayma hızı aralığında bir sıvıyı karakterize eder.

Model ayrıca kayma gerilmesi eksenine ile kesişen kayma gerilimi τ_y değerini de göz önüne alarak Denklem (3.4) ile ifade edilir.

$$\tau = \tau_y + \mu_p \gamma \quad (3.4)$$

Burada μ_p (cp) plastik viskozite olup ile ve τ_y (lb/100 ft²) kopma gerilmesidir.

Parametre kısıtlamaları $\tau_y \geq 0$ ve $\mu_p > 0$ 'dır (Bingham, 1916). Doğrusal bir model olduğu için, parametreler basit bir regresyon analizi ile hesaplanır (Kök ve Alikaya, 2005). Şekil 3.12 hesaplamalarda sıklıkla kullanılan Bingham Plastik modelini göstermektedir.



Şekil 3.12. Bingham Plastik akış davranışı grafiği

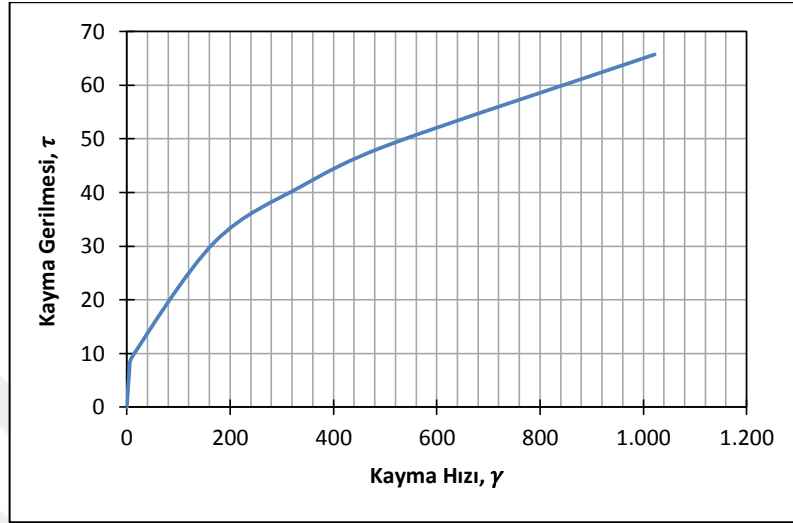
Power Law Modeli: Kayma gerilmesini kayma hızıyla doğrusal olmayan bir şekilde ilişkilendiren 2 parametrelili bir modeldir (De Waele, 1923; Farrow and Lowe, 1923; Ostwald, 1925) ve Şekil 3.13'de gösterilmektedir. Modelde akma dayanımı dahil edilmemekte ve ilişkiyi Denklem (3.5) ile ifade etmektedir:

$$\tau = K\gamma^n \quad (3.5)$$

Yukarıdaki denklem, literatürde Oswald-de Wale denklemi olarak da bilinir. Formülde gösterildiği üzere Bingham Plastik modelinde olduğu gibi, power law modeli 2 sabit parametreye sahiptir. K, kıvam faktörü olarak bilinir ve n parametresi, akış davranışı indeksi veya power law üssü olarak bilinir. K'nın birimi $\text{lb-s}^n/100 \text{ ft}^2$ ' dir. n değeri boyutsuzdur.

Power law modeli $n < 1$ ise psedoplastik akışkanları, $n = 1$ ise newtoniyen akışkanları, $n > 1$ ise dilatant akışkanları karakterize etmek için kullanılabilir (Bourgoyne, 1991). n değerinin düşük olması çamurun daha çok non Newtonian olduğu anlamına gelir. K, kıvam faktörü (consistency factor) dır. PV'ye benzer şekilde, K değerinin artışı çamurdaki katı konsantrasyonunun artmasına veya çamurdaki parçacıkların boyutlarının küçülmesine işaretir (Özüdoğru, Babür,

2001). Ayrıca, kayma gerilmesine karşı kayma hızı eğrisinin başlangıç noktasından geçmesi gerektiğine dikkat edilmelidir. Parametre sınırları $K > 0$ olup ve $0 < n < 1$ aralığındadır (De Waele, 1923; Ostwald, 1925).

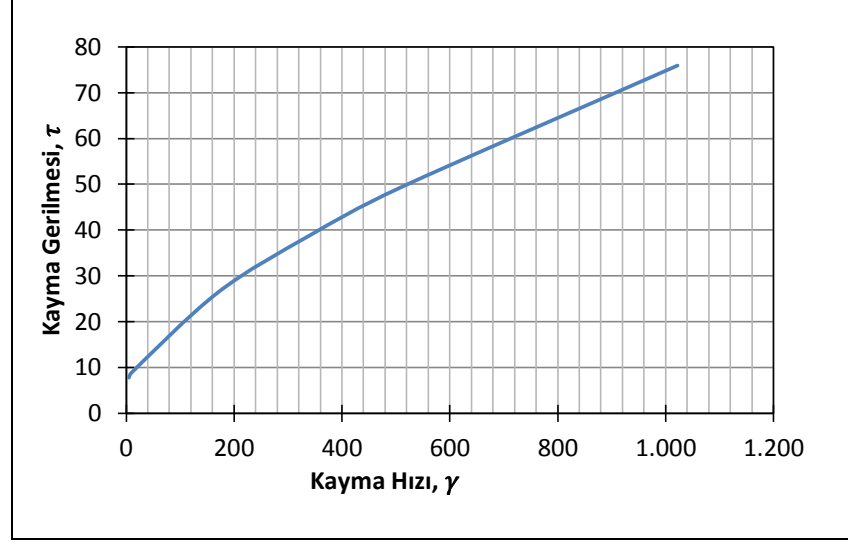


Şekil 3.13. Power Law akış davranışı grafiği

Herschel-Bulkley: Newtoniyen, bingham plastik ve power law akışkanlarını da tanımlayabilen 3 parametrelili bir modeldir (Herschel ve Bulkley, 1926). Bu modelin bir başka adı da akma dayanımlı power law modelidir. Şekil 3.14 Herschel-Bulkley Modelini göstermektedir. Bu modelin formülü Denklem (3.6)'da verilmiştir.

$$\tau = \tau_y + K\gamma^m \quad (3.6)$$

Burada, “ m ” H-B akış davranış endeksi (boyutsuz) olup “ K ” H-B kıvam faktörü ($\text{lb}\cdot\text{sn}^m/100 \text{ ft}^2$) olup ve “ τ_y ” kopma gerilmesini ($\text{lb}/100 \text{ ft}^2$) göstermektedir. Parametre sınırları $\tau_y \geq 0$, $K > 0$ ve $0 < m < 1$ 'dir (Herschel ve Bulkley, 1926).



Şekil 3.14. Herschel-Bulkley akış davranışı grafiği

Günümüzde kullanılan sondaj sıvıları genellikle Newton olmayan davranışlar sergilediklerinden dağılım reolojileri karmaşıktır. Newton olmayan akışkanlar kayma gerilmesi ile kayma hızı arasındaki doğru orantıya uymazlar ve bu tür akışkanların tümünün reogramını tam olarak tanımlayan tek bir denklem kanıtlanmamıştır (Viloria Ogoua, 2006).

Çamur numunelerinin reolojik model tesbiti için gerekli fonksiyon parametrelerinin hesaplanması Matlab programında yapılmış ve ayrıca modellerin yeterlilikleri; determinasyon katsayısı (R^2), hata kareleri toplamı (SSE) ve ortalama hata kareleri kökü (RMSE) istatistiksel verileri göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Aşağıda bahsedilen istatistiksel verilerin değerlendirme açısından anlamı ve hesaplama eşitlikleri verilmiştir.

Belirleme Katsayısı (Determinasyon Katsayısı) (R-Kare (R^2)) Verilerin varyasyonunu açıklarken uyumun ne kadar başarılı olduğunu gösterir. Bir başka deyişle, R-kare, gerçek gözlem değeri ile tahmin edilen değerler arasındaki korelasyon katsayısının karesidir. R^2 değeri sayesinde bağımlı değişkeninin değerleri arasındaki varyasyonun model tarafından ne oranda açıklandığı gözlemlenebilir ve Denklem (3.9) ile hesaplanır. R-kare, 0 ile 1 arasında herhangi bir değeri alabilir, 1'e yakın bir değere sahip olması değişkenler arasındaki ilişkinin daha güçlü olduğunu gösterir. Tahmin edilen değerlerle, tahmin edilen değerlerin aritmetik ortalamalarının farkının karelerinin toplamı (sum of squares of the regression) (SSR) olarak ifade edilip Denklem (3.7) ile

ve gerçek değerler ile gerçek değerlerin aritmetik ortalamaların farklarının kareleri toplamı karelerin toplamı (total sum of squares) (SST) olarak tanımlanıp Denklem (3.8) ile hesaplanır (Ross, 2014).

$$SSR = \sum_{i=1}^n w_i (x_i - \bar{x}_i)^2 \quad (3.7)$$

$$SST = \sum_{i=1}^n w_i (x - \bar{x})^2 \quad (3.8)$$

SST = SSR + SSE eşitliği göz önüne alındığında, R-kare şu şekilde ifade edilir: İstatistiksel literatürde (Scheaffer ve McClave, 1995; Kök, 2004) belirleme katsayısı, R^2

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (3.9)$$

Hata kareleri (Sum of squares due to error): Bu parametre, gerçek değerlerin tahmin değerlerinden toplam sapmasını ölçmektedir ve genellikle SSE olarak adlandırılır. Regresyon doğrusunun gözlemlere uygunluğu yükseldikçe hata kareleri toplamı küçülür. Gözlenen bütün değerlerin tahmini regresyon doğrusu üzerinde olduğunda hata kareler toplamı 0 değerini almaktadır. 0'a yakın bir değer, modelin daha küçük bir rastgele hata bileşenine sahip olduğunu ve uyumun tahmin için daha yararlı olacağını göstermektedir (Ross, 2014). Hata kareleri Denklem (3.10) ile hesaplanır.

$$SSE = \sum_{i=1}^n w_i (x_i - \hat{x})^2 \quad (3.10)$$

Hata kareleri ortalamasının karekökü (Root mean squared error): MSE, hata kareleri ortalaması olup Denklem (3.11)'de verilmiştir. Bir model ya da tahmin edici tarafından tahmin edilen değerler ile gözlemlenen değer arasındaki farkların ortalamalarının kökü olup Denklem (3.12) ile hesaplanır. Hata kareleri (SSE)'de olduğu gibi, 0'a yakın bir RMSE değeri, tahmin için daha kullanışlı bir uyumu gösterir (Ross, 2014).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i (x_i - \hat{x})^2 \quad (3.11)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (3.12)$$

Çoğu araştırmanın değerlendirme aşamasında R^2 değeri kullanılır. Fakat R^2 değeri lineer fonksiyonların performanslarının ölçümünde kullanılması, SSE ve RMSE değerlerinin ise lineer olmayan modeller için kullanılması daha yararlıdır (Weir ve Bailey, 1996; Bailey ve Weir, 1998; Kelessidis ve Maglione, 2006b; Vipulanandan ve Mohammed, 2014).

3.2.4.2. Sondaj Çamurunun Kesinti Taşıma Kapasitesi

Reolojik olarak çamurların etkinlikleri sahip oldukları plastik viskozite, akma noktası değerlerine göre değil, CCI performanslarına göre belirlenmelidir. Etkin bir kuyu temizliği koşulu kabulünde (CCI değerinin 1 olması) gerekli minimum anülüs ortalama çamur hızları Denklem (3.14)'den hesaplanmaktadır. Sondaj endüstrisinde düşey ve düşeye yakın açılı kuyularda etkin bir kuyu temizliği için kabul görmüş gerekli ortalama anülüs çamur hızı (v_a) 100 ft/dk olarak belirtilmektedir. Ancak, yeni nesil çamurların geliştirilmiş özellikleri nedeniyle aynı kuyu temizliğini sağlamak için gerekli anülüs çamur hızlarının daha da düşük olabileceği rapor edilmektedir, (Bourgoyne, 1991; Altun ve ark., 2011). Diğer bir deyişle, anülüste yüksek çamur hızlarının sağlanabilmesi için daha yüksek debilerde çamur pompası çalıştırılmalıdır. Dolayısıyla yüksek pompa hızlarına ulaşmak için daha fazla enerji harcanacağı için sondaj maliyeti artacaktır. Reolojik değerlerin uygunluğu ve farklı çamur türlerinin etkinliğinin karşılaştırılabilmesi için literatürde verilen yöntem takip edilmiştir. Bu yöntemde esas alınan ölçüt, sondaj çamurunun kesintileri taşıma kapasitesidir. Kontrol edilebilen sadece üç sondaj akışkan parametresi çamurun kesintileri kuyudan taşıyabilmesi yeteneğini geliştirebilir. Bunlar, çamurun anülüsteki ortalama hızı, çamur yoğunluğu ve çamur viskozitesidir (power law reoloji modeli ile tanımlanan akışkanın viskozitesi, K). Sahalarda düşey veya düşeye yakın kuyuların sondajlarında on yıllık bir süre içerisinde yapılan gözlemlerden bu üç parametrenin çarpımı 400.000 veya daha yüksek ise taşınan kesintilerin keskin köşeli oldukları, yani parçalanmadan taşındıkları belirlenmiştir. Burada sırasıyla bu üç parametrenin birimi ft/dk, lb/gal ve cp olarak verilmektedir. Eğer bu üç parametrenin çarpım değeri 200.000 civarında ise kesintilerin oldukça yuvarlatılmış bir şekle sahip olduklarını ve kuyudan taşınmaları sırasında öğütülmeye uğradıklarını göstermektedir. Eğer bu çarpım değeri 100.000 veya daha küçükse, kesintiler çok küçük boyutlu veya hemen hemen tanecik yapıda oldukları kabul edilmektedir. Sonuç olarak, taşıma kapasitesi indeksi (carrying capacity index, CCI) bu üç parametrenin çarpımının 400.000 değerine oranı olarak tanımlanmaktadır ve aşağıda Denklem (3.13) ile ifade edilmektedir (Osgouei, 2010; Altun ve ark., 2011).

$$CCI = \frac{V_a \rho_m K}{400000} \quad (3.13)$$

CCI : Taşıma kapasitesi indeksi, boyutsuz

V_a : Anülüs çamur hızı, ft/dk

ρ_m : Çamur yoğunluğu, lbm/gal

K : Power law akışkan kıvamlılık indeksi, cp

İyi bir kuyu temizliğinin sağlanabilmesi için CCI değerinin 1 veya daha yüksek olması gerekmektedir. Eğer hesaplanan CCI değeri 1'den çok küçük ise Denklem 1 ile verilen bağıntı CCI'nın 1 değeri için yeniden düzenlenerek kesintileri etkin bir şekilde yüzeye taşımak için gerekli viskozite parametresi K değeri hesaplanabilir (Altun ve ark., 2011).

Eğer akışkana ait 600 ve 300 dev/dk hızlarda kadran okumaları var ise, bu durumda K parametresi Denklem (3.15) ile akış davranış indeksi (n) Denklem (3.14) ile hesaplanabilir.

$$n = 3,32 \log \frac{\theta_{600}}{\theta_{300}} \quad (3.14)$$

$$K = \frac{510\theta_{300}}{511^n} \quad (3.15)$$

n :Power law akışkan davranış indeksi, boyutsuz

θ_{600} :Akışkanın viskometrede 600 dev/dk kadran okuması, boyutsuz

θ_{300} :Akışkanın viskometrede 300 dev/dk kadran okuması, boyutsuz

K :Power law akışkan kıvamlılık indeksi, cp

3.2.4.3. Delme Parametreleri ve İlerleme Hızı Üzerine Etkileri

Matkabın birim zamanda yaptığı ilerleme olup, m/saat, m/gün, cm/dak, sn/mm gibi birimlerle ifade edilir. Sondaj maliyeti bu parametreler ile belirlenir. Üretim sondajlarında amaç ilerleme hızını arttırmak ve sondajı en kısa zamanda bitirmektir (Göktekin, 1983).

Sondajlarda inilecek derinlik arttıkça, matkap değişimi kuyu arızası gibi sorunlar olduğundan çalışma koşulları güçleşmekte ve bu sorunların giderilmesi daha fazla zaman alacağından birim zamanda yapılan ilerleme miktarı azalma göstermektedir (Yünsel, 2001). İlerleme hızını etkileyen faktörlerin araştırılması; istenilen derinliğe

maksimum ilerleme hızı ile ulaşılabilmesi sondajın birim maliyetini ve başarı ile sonuçlandırılmasını doğrudan etkilemesi açısından büyük bir önem arz etmektedir (Onan ve Müftüoğlu, 1993).

İlerleme hızını etkileyen faktörler oldukça çok sayıdadır ve belki de şimdiye kadar bilinmeyen önemli değişkenler bulunmaktadır. Sondaj hızının net analizi değişken çalışma altında tamamen izole edilme zorluğu nedeniyle karmaşıklaşmaktadır. Örneğin, saha verilerinin yorumlanması kayaç özelliklerinde tesbit edilmemiş değişikliklerin olasılığı nedeniyle belirsizlikler içerebilmektedir. Sondaj akışkanı etkileri ile ilgili çalışmalar yapılırken, gözlem altında olanlar hariç, diğer tüm özellikleri aynı olan iki çamur örneği hazırlama zorunluluğu gerektirmektedir.

Genellikle sondaj hızını arttırmak istense de zararlı etkileri telafi etmek pahasına yapılmamalıdır. En hızlı delme, en düşük maliyetle kuyu açılması anlamına gelmeyebilir. Matkap aşınmasının hızlanması, ekipman verimi gibi diğer faktörler maliyeti arttırabilir. Herhangi bir döner sondaj çalışmasında sondaj hızına etki eden faktörleri aşağıdaki listede olduğu gibi sınıflandırmak uygun olacaktır.

1. Personel verimi
2. Kule verimi
3. Formasyon karakteristiği (dayanım, sertlik veya aşındırıcılık, elastiklik, yapışkanlık sıvı içeriği ve geçiş basıncı, porozite ve permeabilite)
4. Mekanik faktörler (matkaba verilen yük, matkap tipi ve dönme hızı)
5. Hidrolik faktörler (jet hızı, kuyu dibi temizliği)
6. Sondaj akışkanı özellikleri (çamur ağırlığı, viskozite, sıvı kaybı ve katı içeriği)

Sondaj akışkan özelliklerinin sondaj hızını etkileyebileceği bilinmektedir. Bu gerçek sondaj literatüründe daha önce kurulmuş ve birçok laboratuvar çalışması ile teyit edilmiştir. Önceden yapılan birçok çalışma çamur özelliklerinin doğrudan sondaj hızına etkisini net bir şekilde göstermiştir (Bourgoyne vd., 1986). Örneğin Evans B. ve Gray K.E. (1972) yaptıkları çalışmada kinematik viskozite, filtrasyon, basınç gradyeni, tanecik konsantrasyonu ve formasyonun suya duyarlılığının ROP (ilerleme hızı) üzerine etkisi ölçülmüştür. Çalışma sonucunda akışkanın özelliklerinin ROP üzerine etkisinin açıklanmasında tek başına yeterli olmadığı anlaşılmıştır. Filtrasyon, kinematik viskozite, basınç gradyeni gibi özellikler ROP'u etkilediği ancak bağımsız bir şekilde

tek başına ROP'u kontrol edemeyecekleri açıklanmıştır. Ancak laboratuvar sondaj testleri sondaj çamurunun ilerleme hızı üzerinde önemli etkisi olduğunu göstermiştir. Örneğin; hava ile sondajı su ile sondaja değiştirmek her zaman ilerleme hızında önemli düşüşe neden olmakta ve ayrıca sudan çamura değiştirmek ise ayrı bir ciddi düşüşe neden olmaktadır. İlerleme hızını etkileyen başlıca faktörler bir çok araştırmacı tarafından mikro yada tam ölçekli laboratuvar sondaj makineleri kullanılarak kurulmuştur (Murray ve Cunningham 1955; Cunningham ve Eenik 1959; Garnier ve Van Lingen 1959; Van Lingen 1962; Maurer 1962; Young ve Gray 1967 ; Caen ve ark., 2011).

Sondaj ilerleme hızını etkileyen sondaj akışkanlarının özellikleri

- 1) Yoğunluk
- 2) Reolojik akış özellikleri
- 3) Filtrasyon karakteristikleri
- 4) Katı içeriği ve boyutu
- 5) Kimyasal kompozisyon (Bourgoyne vd., 1986).

Sondaj çamuru ağırlığının ROP'yi etkilediği uzun zamandır bilinmektedir ve bu gerçek sondaj literatürlerinde önceden tespit edilmiş ve sayısız laboratuvar çalışması ile teyit edilmiştir (Fontenot ve Simpson 1974). Bununla birlikte, önceden yapılan bazı çalışmalar doğrudan standart çamur ağırlığı 9-10 ppg (pound per gallon) olan çamur özelliklerine odaklanmıştır. Fakat son zamanlarda, çamur ağırlığı 14.5 ppg'ye yükseltilmiş ve artış miktarı 5 ppg'ye yaklaşmıştır. Çamur ağırlığı, kuyudaki hidrostatik basıncı (HP) kontrol etmekte, kuyuya istenmeyen sıvı akışını ve muhafaza borusunun ile kuyunun çökmesini önlemektedir. Ancak aşırı çamur ağırlığı, çamur kayıplarına veya boru yapışmasına ve sondaj çamurunun ağırlığının formasyon basınç gradyanının üzerine çıkmasına neden olup, bu da penetrasyon oranını (PR) etkilemekte ve ayrıca sirkülasyon için daha fazla pompa basıncı gerektirerek sondaj işlemi daha pahalıya mal olabilmektedir.

Hızlı PR, her sondaj faaliyetinin hedefidir ve başarılması halinde sondaj maliyetini düşürebilir. Dolayısıyla, çamur ağırlığının seçilmesi sondaj işlemleri sırasında karşılaşılan bir zorluktur (Akgun, 2002a; Akgun, 2002b) ve sondajın etkili gerçekleştirilmesi ve sondaj kuyusu problemlerinden kaçınmak için doğru çamur

ağırlığının seçilmesi, önemli bir faktörü oluşturmaktadır (Akpabio, 2015). Akpabio ve ark., (2015) yaptıkları çalışmada, 8 farklı kuyudan elde ettikleri verileri çamur ağırlığının ilerleme hızı üzerindeki etkisini saptamak için analiz etmişlerdir. Su bazlı çamur için ortalama yoğunlukları 10.5, 11.5 ve 8.9 ppg olup, ortalama ilerleme hızları sırasıyla 25 ve 24 ve 37 ft/saat olduğu gözlenerek benzer şekilde ortalama penetrasyon oranları 28, 35 ve 50 ft/saat olan yağ bazlı çamurun yoğunlukları sırasıyla 11.3, 11.1 ve 8.6 ppg değerleri bulunmuştur. Buna bağlı olarak çamur yoğunluğundaki artışla penetrasyon oranının düştüğü söylenebilmektedir.

Çamur hidrostatik basıncı ile formasyon basıncı arasındaki fark "Chip Hold Down Pressure (CHDP)" olarak adlandırılır. Bu diferansiyel farklılık özellikle yumuşak ile orta sertlikteki formasyonlarda ROP üzerindeki en büyük etkenlerden biridir (Rabia, 2001). Laboratuvar deneyleri ve saha deneyimleri, nüfuz oranının çamurun overbalance basıncı (CHDP) (geçirgen kayaçlarda sondaj yapılırken çamur basıncı ve gözenek basıncı arasındaki fark) ile azaldığını göstermiştir. (Murray ve Cunningham 1955; Cunningham ve Eenink 1959; Garnier ve Van Lingen 1959; Vidrine ve Benit 1968).

Penetrasyon hızı, plastik viskozite, katı madde içeriği ve çamur ağırlığı artırılarak azaltılır (Paiaman, 2009; Akpabio, 2015).

Viskozite sondaj ilerleme hızını etkileyen başka bir özelliktir. Viskozitenin değişmesi, sistemin hidrolik gücünü ve akış özelliklerini doğrudan doğruya etkileyecektir. Viskozite arttığı zaman sirkülasyon sistemindeki sürtünme kuvvetleri artacağından ilerleme hızı azalır. Düşük viskozite matkap altından iyi taşıma sebebiyle hızlı delmeyi sağlar. Sondaj hızını etkileyen diğer diğer parametreler sabit tutulduğu sürece görünür viskozite ile ilerleme hızı ters orantılıdır. Yüksek kayma hızlarında düşük viskozite değerleri, çamurun pompalanabilirliğini ve ilerleme hızını iyileştirmeye katkı sağlar. Hızlı ilerleme sağlamanın ana faktörü düşük viskozite değerini korumaktır (Eckel, 1967, Beck ve ark., 1995, Gallino ve ark., 1996, Kelessidis ve ark., 2006a). Laboratuvar koşullarında sondaj hızı akışkan viskozitesi değiştirilerek 3 kata kadar etkilenebilir. Önceki literatürden sondaj hızının direkt sondaj akışkanı tipi veya akışkan içindeki katı miktarına bağlı olmadığı sonucuna varılabilir ancak katıların akışkan özelliklerine etkisi özellikle sondaj hızının matkap kayma hızı koşullarında plastik viskozite gibi akışkan viskozitesini yansıtan özelliklerine doğrudan bağlı olması

gerektiğini gösterir. (Eckel, 1967). Plastik viskozitenin artması genel olarak çamurdaki katı hacminin artması, katı parçacıklarının boyutlarının küçülmesi, şeklinin değişmesi veya bunların kombinasyonlarının olduğu anlamına gelip artması ilerleme hızının daha yavaş olmasına sebep olmaktadır (Trimble ve Nelson 1960). Moses A.O. ve ark. (2011) tarafından ROP için yarı-analitik model geliştirilerek, plastik viskozite arttıkça ROP değerinin azaldığı görülmüştür.

Bentonit, barit vb. bazı katılar çamura istenerek katılır. Bir de çamura istenmeden katılan sondaj sırasındaki formasyon kırıntıları gibi katılar vardır. Bu kırıntılar çamurdan uzaklaştırılmazlarsa zamanla, matkap tarafından tekrar tekrar parçalanarak viskozitenin artmasına neden olurlar. Yüksek konsantrasyonda katılar, çamur yoğunluğunu ve viskozitesini artırdığı için sondaj oranlarını düşürür (Rupert ve diğerleri 1981; Blattel ve Rupert 1982; Scharf ve Watts 1984; Simpson 1985; Montgomery 1985). Yüksek viskoziteler ve akma noktaları katı maddenin yüzeyde yeterince ayrılmasını önler ve katı içeriği aşırı olur.

Genel bir kural olarak, matkapta oluşan çamur viskozitesi düşük olduğunda penetrasyon hızı iyileşmektedir (Jha ve ark., 2015). Matkap çok iyi bir şekilde temizlendiğinde bile viskozitenin artmasıyla sondaj hızının azaldığı gösteren deneysel kanıtlar mevcuttur (Estes, 1974).

Akışkanın reolojik özellikleri (viskozite, akma noktası, jel dayanımı) ROP üzerinde çamur yoğunluğundan daha az etkiye sahiptir. (API, 1979; API, 1980]. Daha az katı içeriğiyle çamur daha hafif olup iyi hıza sahiptir. Bu hız kırıntıları daha kısa sürede yüzeye ulaştırır. Juhari ve Isham (1998) yaptıkları bir çalışmada daha az katı içerikli çamur kullanımının sondaj hızının arttırdığı bulgusunu elde etmişlerdir.

Sondaj hızı, çamur ağırlığının, viskozitenin ve katı içeriğinin artmasıyla azalırken filtrasyonun artmasıyla artar (Bourgoyne, 1991). Sıvı kaybı arttıkça ilerleme hızının arttığı laboratuvar deneylerinden çıkarılmıştır. Bunun nedeni su kaybı değişirken sondaj hızını etkileyen başka özelliklerin de değişmesi olarak düşünülebilir. Örneğin su kaybı artarken çoğu zaman viskozitede azalma görülür. Öte yandan su kaybını kontrol eden kimyasal maddeler genelde viskoziteyi arttırırlar. Penetrasyon hızıyla filtrasyon hızı ile ilgili birçok çalışma vardır. Eckel (1954), sondaj hızıyla filtrasyon hızı bağıntısı viskozite ilişkisiyle düşünülmeli gerektiğini göstermiştir. Homer vd., (1957), sondaj esnasında filtrasyonu çalışmış ve dinamik filtrasyon, reoloji ya da API sıvı kaybı

arasında net bir bağıntı bulamamıştır. Black ve ark. (1985), dört doygun kumtaşı örneğini delmek için dört tane su bazlı çamur kullanılmıştır. API filtrasyonunun ROP üzerinde herhangi bir etkisi bulunmazken sirkülasyon anındaki filtrasyon ile ROP arasında ilişki bulunmuştur. Cunningham ve Goins (1957), şeyllerde nişasta kullanımı ile API sıvı kaybı azaldıkça sondaj hızının da azaldığını rapor etmiştir. Ancak sondaj hızındaki azalma sıvı kaybı özelliğinden değil nişasta kullanımından kaynaklı viskozite artışından olduğu sonucuna varılmıştır. Lawhon ve Simpson (1967), sondaj sıvılarında kil ve polimerin laboratuvar sondaj hızı ve filtrasyon özelliklerini inceleyerek filtrasyon ve sondaj oranlarını ilişkilendirmeye çalışmışlardır. Fakat sondaj hızı ve filtrasyon arasında güvenilir bir ilişki bulamamışlardır. Genel olarak, API filtratı doğrudan delme hızıyla ilişkilendirilemez, ancak olağandışı bir şekilde yüksek veya düşük sıvı kayıpları, olağandışı yüksek veya düşük delme oranlarına eşlik ettiği sonucuna varmışlardır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Çizelge 4.1’de kimyasal içerikleri verilen jeotermal sularla ve Çizelge 3.1’de formülasyonları belirtilen sondaj çamuru numuneleri Şekil 3.9’da belirtilen aşamalar takip edilerek sırasıyla viskozite, standart API su kaybı, yüksek sıcaklık-yüksek basınç su kaybı, kek kalınlığı, yoğunluk ve pH deneylerine tabi tutulmuşlardır. Ardından ortam koşullarında ve yüksek sıcaklık-yüksek basınç koşullarında çamur numunelerinin reolojik davranışının açıklanmasında kullanılacak reolojik model analizi yapılmıştır. Son olarak da çamur numunelerinin yine ortam koşullarında ve yüksek sıcaklık-yüksek basınç koşullarında kuyu temizleme parametreleri hesaplanarak değerlendirme yapılmıştır. Yapılan çalışmanın sonuçları aşağıda ayrıntılı bir şekilde sırasıyla sunulmuştur.

4.1. Viskozite Testi

Formülasyonu Çizelge 3.1’de verilen çamur numunelerinin (J1, J2, J3, J4 ve S1) yüksek sıcaklıklardaki reolojik özelliklerinin ölçümünde Fann Model 50 SL reometre (Şekil 3.3) kullanılmıştır. Deneye başlarken ilk olarak ham tork değerini kontrol edilerek, bob şafta takılmıştır. Çalışmada, 25 °C’lik artışlarla 77, 122, 167, 212, 257, 302 (°F) sıcaklıklarında, 600, 300, 200, 100, 6 ve 3 rpm hızlarında ve döndürme süresi her bir devirde 1 dakika boyunca okuma yapacak şekilde ayarlanmıştır. “Auto Test” bölümünden veilerin girildiği excel dosyası yüklenmiş ve istenilen bir isimle kaydedilmiştir. Son olarak, basınç ayarlama regülatöründen gelen basıncı ayarlayarak test başlatılmıştır.

302 °F (150 °C) sıcaklıkta test sıvılarının kaynamaması için suyun doygunluğa ulaştığı basınç yaklaşık olarak 70 psi olup, reometre içinde deney esnasında basınç kayıpları göz önüne alınarak numuneye uygulanan basınç 150 psi olarak belirlenmiştir.

Deneyden numune ve banyo sıcaklığı, basınç, kayma hızı, kayma gerilmesi, tork değeri ve her işlemin ne kadar sürede gerçekleştiğini gösteren verileri alınmıştır. Her bir devirde 5 saniyede bir ölçüm alınmış ve bir dakika boyunca okuma yaptığından toplam 12 ölçüm sonucu alınmıştır. Her bir devirdeki 12

ölçümün aritmetik ortalaması alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Deneyden alınan veriler excel dosyasında verilmektedir.

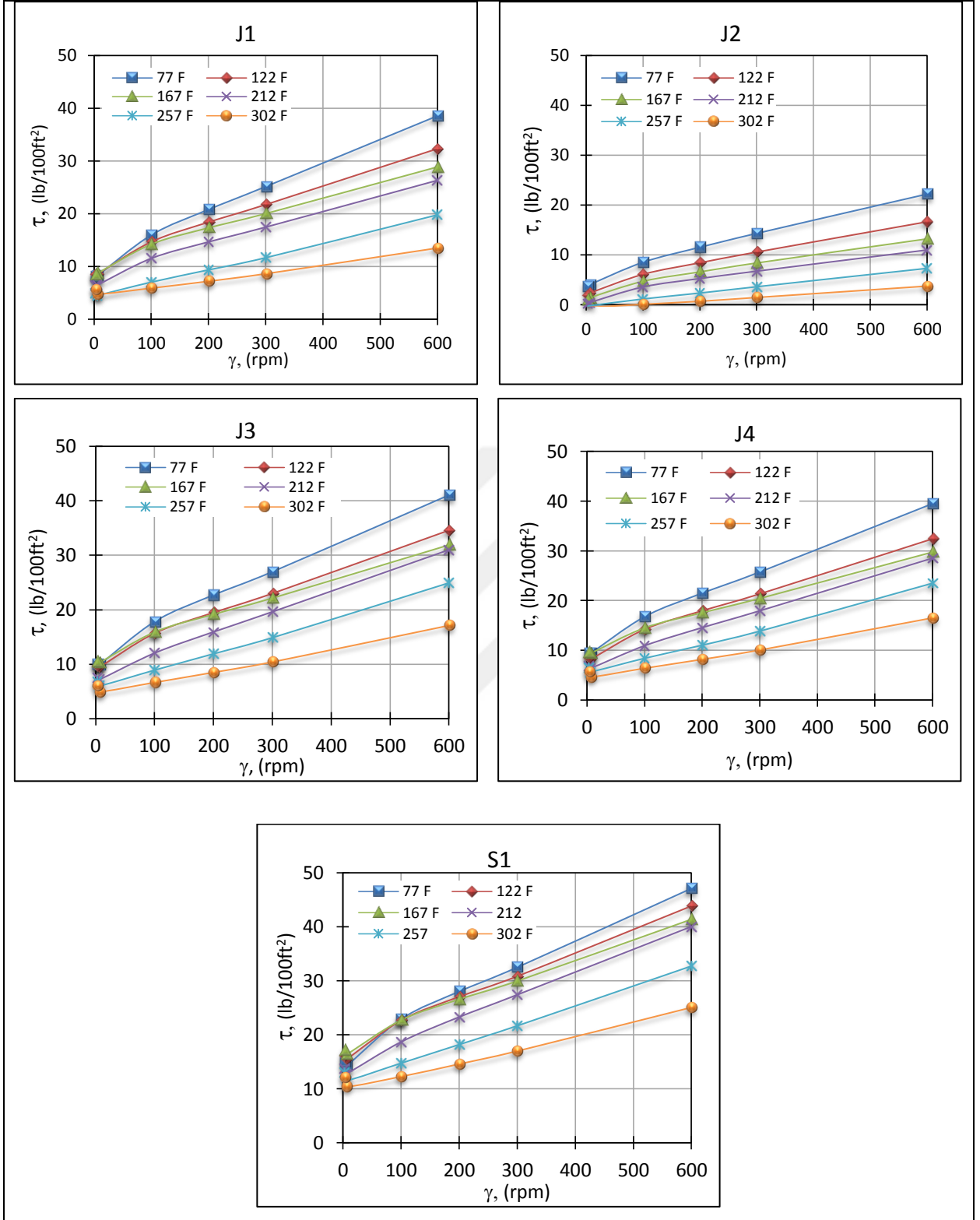
Çamur numunelerinin ortam koşullarındaki reolojik özellikleri Fann model 35 viskozimetre (Şekil 3.5) ile ortam koşullarında ölçülmüştür. Bunun için hazırlanmış olan çamur numuneleri 16 saatlik bekleme süresinden sonra beş dakika karıştırılarak viskozimetre kabında işaretli seviyeye kadar doldurulmuş ve rotor, üzerindeki çizgiye kadar çamura batırılmıştır. Rotor 600, 300, 200, 100, 6 ve 3 (rpm) hızlarında döndürülmüştür. Kadrandaki ibre sabit duruma gelmesi beklenmiş ve ibrenin sabitleştiği değer sözkonusu hızlardaki okuma olarak kaydedilmiştir.

Ölçümlere ait sıcaklık artışının numunelerinin davranışına etkisi, sabit sıcaklıktaki davranışları, her bir numunenin reogramınının saf su reogramıyla karşılaştırılması, sabit kayma hızındaki davranışları, jel mukavemetleri, kayma hızıyla incelleme özelliğini gösteren akma noktası/plastik viskozite oranlarının ortam ve yükselen sıcaklıklardaki değerlerinin sonuçları aşağıda sırasıyla verilmiştir.

Sıcaklık artışının, çamur numunelerinin (J1, J2, J3, J4 ve S1) reolojik özelliklerine etkisi Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Kayma gerilmesi–kayma hızı grafiği (reogram) incelendiğinde, bütün numunelerin Newtoniyen olmayan bir akışkan davranış özelliği gösterdiği anlaşılmaktadır. Sıcaklık arttıkça her bir numunenin akma noktası ve kayma gerilmesi değerleri azalmaktadır. Bütün numunelerde sabit sıcaklıkta kayma hızı arttıkça kayma gerilmesi değerleri artmaktadır. Ancak 257 ve 302 (°F) sıcaklıklarında tüm numuneler düşük kayma hızlarında akma noktası artacak şekilde bir davranış göstermiştir. (Şekil 4.1). J2 numunesi 257 ve 302 (°F) sıcaklıklarda düşük kayma hızlarında akma değeri vermemektedir. 257 °F sıcaklıkta 3 ve 6 rpm hızlarında reoloji göstermemiş, 302 °F sıcaklıkta ise 100 rpm hızına kadar akma noktası değeri göstermemiştir.

Kimyasal Parametreler	Çizelge 4.1. Jeotermal su örneklerinin kimyasal analizleri							
	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8
pH	7,41	7,72	8,33	7,64	7,29	6,66	6,8	6,1
Spesifik Kondüktivite (µmho/cm)	6714,0	3015,5	2028	1805,00	-	6200	4600	2020
Buharlaşma Kalıntısı (mg/l)	-	-	-	-	-	3558	4450	1706
K ⁺ (mg/l)	98,8	26	33,2	34,00	26,8	56	6,6	9,4
Na ⁺ (mg/l)	1215,0	256	423	363,00	297,4	265	46	108
NH ₄ ⁺ (mg/l)	<0,1	1,28	1,92	1,82	-	1,93	<0,2	0,8
Ca ⁺⁺ (mg/l)	97,0	287	22,40	28,80	207,7	20	135	378
Mg ⁺⁺ (mg/l)	17,5	34,3	0,72	8,64	34,0	575	594	82
As (Total)	-	<0,05	-	-	-	0,01	<0,01	0,0
B (Total)	5,6	0,2	15,10	12,30	-	7,5	1,5	2,0
Li ⁺ (mg/l)	1,5	-	1,05	0,98	-	-	-	-
SiO ₂ (mg/l)	81,0	56	203	187,00	-	146	122	10
CO ₃ (Erimis) (mg/l)	0,50	7,47	-	-	-	630	792,1	1659
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	7,6	245	580	626,00	-	1800	3271	1306
CO ₃ ⁻ (mg/l)	<10	<10	90	0,0	-	<1	<1	0,0
SO ₄ ⁻ (mg/l)	432,0	839	139	141,00	340,0	1659	237	338
Cl ⁻ (mg/l)	1670,0	325	216	196,00	-	216	57	122
I ⁻ (mg/l)	-	-	-	-	-	0,5	<0,5	0,5
F ⁻ (mg/l)	-	<0,1	-	-	-	0,25	0,6	1,3
NO ₂ ⁻ (mg/l)	-	<0,1	<0,05	<0,05	-	2,5	0,7	0,0
NO ₃ ⁻ (mg/l)	-	12,4	4,10	3,70	-	<1	<1	0,0
Tuzluluk (mpt)	-	-	1,0	0,9	-	-	-	-
TDS (mg/l)	-	-	1504	1390,00	-	-	-	-
Fe _{tot} (mg/l)	-	-	0,46	0,475	0,038	-	-	-
Al (mg/l)	-	-	-	-	0,025	-	-	-
Mn (mg/l)	-	-	-	-	0,07	-	-	-
Zn (Erimis) (mg/l)	-	-	-	-	0,032	-	-	-
H ₃ BO ₃ (mg/l)	-	-	-	-	4,73	-	-	-
Cr (mg/l)	-	-	-	-	0,020	-	-	-
Se (mg/l)	-	-	-	-	0,004	-	-	-
Ba (mg/l)	-	-	-	-	0,053	-	-	-
Br (mg/l)	-	-	-	-	1,70	-	-	-

*J1, J2, J6, J7, J8 (MTA-Envanter, 2005), J3 ve J4 (İzmir Jeotermal Enerji San. ve Tic. A.Ş., 2017), J5 (Adana Halk Sağlığı Toplum Merkezi, 2017).



Şekil 4.1. J1, J2, J3, J4, S1 numunelerinin artan sıcaklığa karşı reogramları

Çamur numunelerinin sabit sıcaklıktaki davranışları incelendiğinde 77, 122, 167 ve 212 (°F) sıcaklıklarına kadar stabil bir durum gözlenmiştir. Bu sıcaklığa kadar sabit sıcaklık ve kayma hızı altında en yüksek akma noktası ve kayma gerilmesi değerleri saf suda (S1) görülmüştür ve kayma hızı arttıkça kayma gerilmesi değerleri de artmıştır. Ancak 212 °F sıcaklıktan daha büyük sıcaklıklarda (257 ve 302 (°F)) farklı davranışlar gözlenmiştir (Şekil 4.2).

77 °F sıcaklıkta bütün numunelerin beklenen durum olan kayma hızı arttıkça kayma gerilmesi de artmıştır. Kayma gerilmesi değerleri ve akma noktaları sabit kayma hızlarında $S1>J3>J4>J1>J2$ şeklinde sıralanmaktadır. Sabit kayma hızlarında J2 numunesinin akma noktası ve kayma gerilmesi değerleri diğer numunelere kıyasla çok düşüktür. J4 ile J1 yakın değerler vermiş ancak yüksek hızlarda da aradaki farkta az miktarda bir değişim olmuştur (Şekil 4.2-a).

122 °F sıcaklıkta sabit kayma hızlarında kayma gerilmesi değerleri ve akma noktaları sıralamasında bir değişim olmamıştır. Yine $S1>J3>J4>J1>J2$ şeklindedir. Ancak J1 ile J4 ise 77 °F sıcaklıktaki davranışa kıyasla daha yakın değerler vermiştir (Şekil 4.2-b).

167 °F sıcaklıkta sabit kayma hızlarında kayma gerilmesi değerleri ve akma noktaları sıralamasında yine değişim gözlenmemiştir. $S1>J3>J4>J1>J2$ şeklinde sıralanmıştır. Ancak J4 ile J1 300 rpm hızına kadar çok yakın değerler verirken bu hızdan sonra J4 biraz daha yüksek değerler vererek aradaki fark az miktarda artmaya başlamıştır (Şekil 4.2-c).

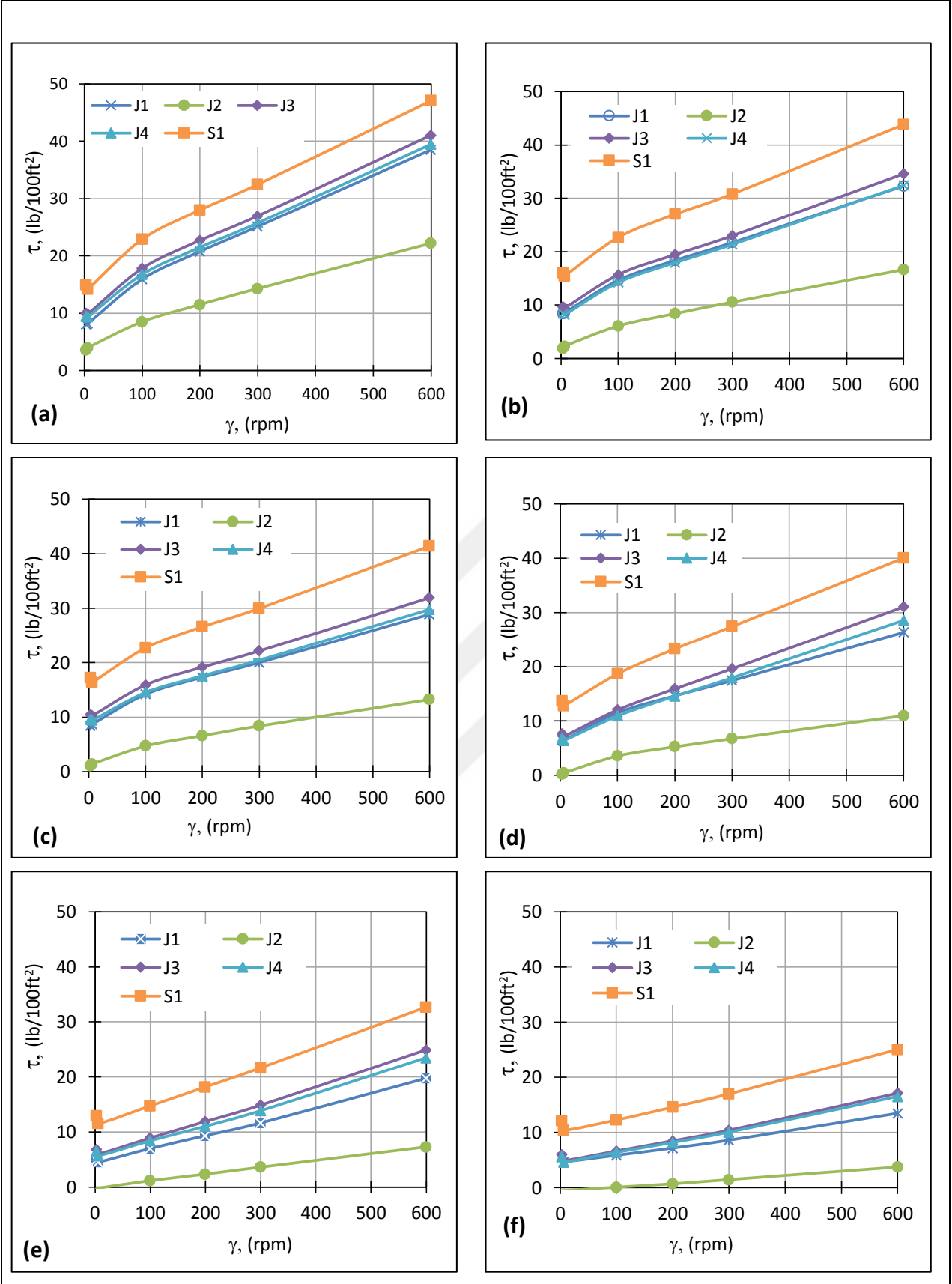
212 °F sıcaklıkta sabit kayma hızlarında kayma gerilmesi değerleri ve akma noktaları sıralamasında bir değişim olmamıştır. $S1>J3>J4>J1>J2$ şeklindedir. 100 rpm hızına kadar J3, J4 ve J1 yakın değerler göstermiş ancak 100 rpm hızından sonra J3 biraz daha yüksek kayma gerilmesi değerleri almıştır. J1 ile J4 ise 300 rpm hızına kadar çok yakın değerler verip ilk defa 212 °F sıcaklıkta 300 rpm hızından sonra J4 numunesine kıyasla daha yüksek kayma gerilmesi değerleri alıp aralarında belirgin bir fark oluşmuştur (Şekil 4.2-d).

257 ve 302 (°F) sıcaklıklarında, daha düşük sıcaklıklara (77, 122, 167, 212 (°F)) nazaran farklı davranışlar gözlenmiştir. Düşük kayma hızlarında tüm numunelerde kayma hızının artmasıyla kayma gerilmesi değerleri azalma göstermeye başlamıştır.

257 °F sıcaklığında, yine S1 en yüksek kayma gerilmesi ve akma noktası değerleri göstermiştir. 100 rpm hızına kadar J3 ile J4 çok yakın değerler göstermiş 212 °F sıcaklığında olduğu gibi 100 rpm hızından daha yüksek hızlarda (200, 300, 600) J3 daha yüksek kayma gerilmesi değerleri göstermiştir. Bu sıcaklıkta sabit kayma hızlarında diğer sıcaklardaki görülen kayma gerilimi ve akma noktası sıralaması bir değişiklik olmayıp $S1>J3>J4>J1>J2$ şeklinde sıralanmıştır (Şekil 4.2-e). J2 numunesi düşük kayma hızlarında (3 ve 6 rpm) akma noktası değeri vermemiştir. Bu durum çamurun floküle (topaklanma) olduğunu göstermektedir. Sondaj akışkanının flokülasyonuna neden olan üç temel unsur (1) formasyonlardan çamura giren yüksek aktif katı madde miktarı, (2) yüksek sıcaklık ve (3) yüksek elektrolit konsantrasyonudur (yüksek tuzluluk) (Altun, 2011). Aktif katı madde girişi, ya da tuz ilavesi olmadığından floküle olmasının sebebi yüksek sıcaklık olduğu sonucuna varılabilmektedir.

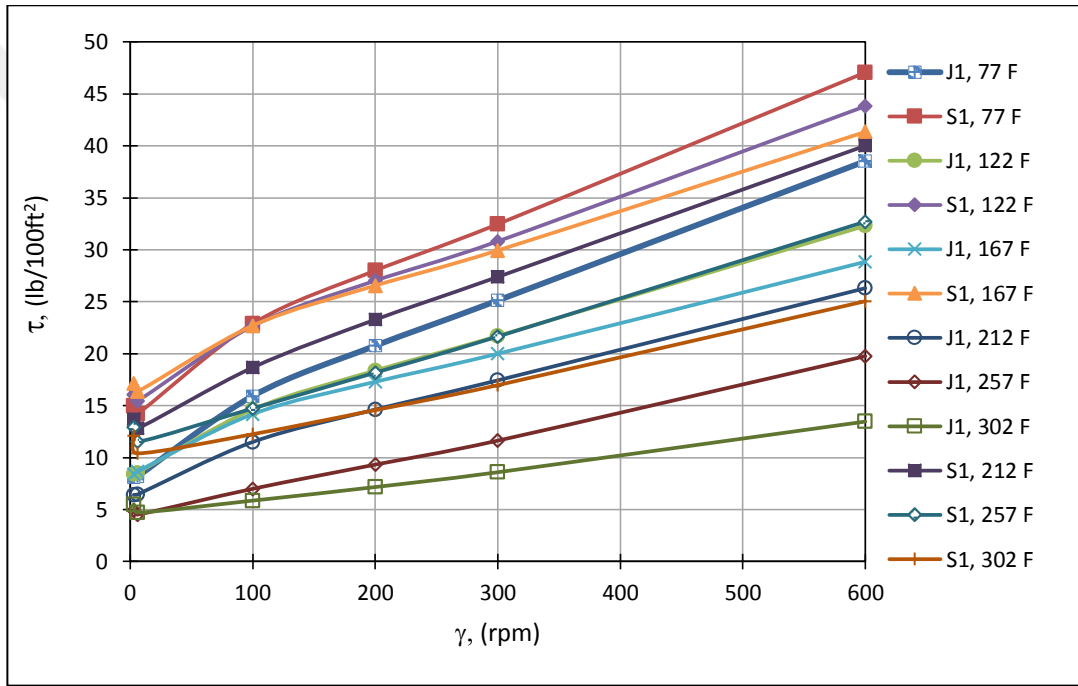
302 °F sıcaklıkta tüm numunelerinin düşük hızlarda kayma hızının artmasıyla kayma gerilmesi değerleri artmıştır (Şekil 4.2-f). Bu sıcaklıkta sabit kayma hızlarında kayma gerilmesi değerleri ve akma noktaları sıralaması yine $S1>J3>J4>J1>J2$ şeklindedir. J2 numunesi 257 °F sıcaklıktan farklı olarak daha yüksek kayma hızlarında da (100 rpm hızına kadar) reoloji göstermemektedir.

257 ve 302 (°F) sıcaklıklarında, çok düşük kayma hızlarında tüm numunelerde kayma hızının artmasıyla kayma gerilmesi değerleri azalma göstermeye başlamıştır. Bentonit çamurlarında kayma hızının artmasıyla kayma gerilmesi değerlerinin artması beklenir. Ancak 257 ve 302 (°F) sıcaklıklarda düşük kayma hızlarında bu durumun tersi görülmüştür. Bu husus, bentonit çamurlarının 250 °F sıcaklığa kadar stabil durumlarını koruyabildikleri, daha yüksek sıcaklıklarda bozulmaya floküle olmaya başladığı gerçeğini teyit ettirmektedir (Altun ve ark., 2011, Altun ve ark., 2013, Osgouei ve ark., 2015a). Floküle olan bir sondaj akışkanı beklenen görevleri sağlayamamakla birlikte önemli teknik ve ekonomik sondaj sorunlarına neden olmaktadır.



Şekil 4.2. J1, J2, J3, J4, S1 numunelerinin sabit sıcaklıklar altındaki reogramları, a) 77 °F, b) 122 °F, c) 167 °F, d) 212 °F, e) 257 °F, f) 302 °F.

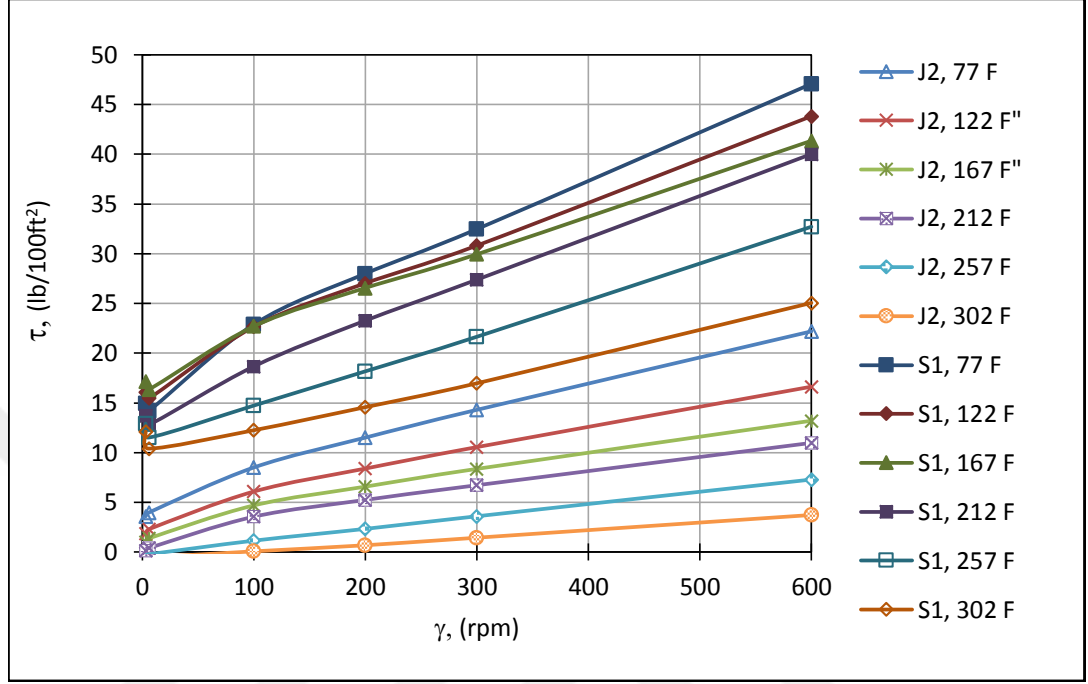
J1 ile S1 numunelerinin sıcaklığa bağlı olarak kayma hızı-kayma gerilmesi ilişkisi karşılaştırıldığında, sabit sıcaklıklarda S1 numunesinin akma noktası ve kayma gerilmesi değerleri J1 numunesinden daha büyük olup, S1'in en düşük kayma gerilmesi değeri olan 302 °F sıcaklıktaki değeri, J1 numunesinin 257 ve 302 (°F) sıcaklığındaki kayma gerilmesi değerlerinden daha büyük olduğu görülmüştür. S1 numunesinin 77, 122, ve 167 (°F) sıcaklıklarındaki, kayma gerilmesi değerleri J1 numunesinin en yüksek kayma gerilmesinin okunduğu 77 °F sıcaklıktaki değerinden daha yüksek çıkmıştır (Şekil 4.3). Artan sıcaklığa karşı S1 numunesinin daha iyi reoloji gösterdiği gözlenmektedir.



Şekil 4.3. J1-S1 numunelerinin reogramlarının karşılaştırılması

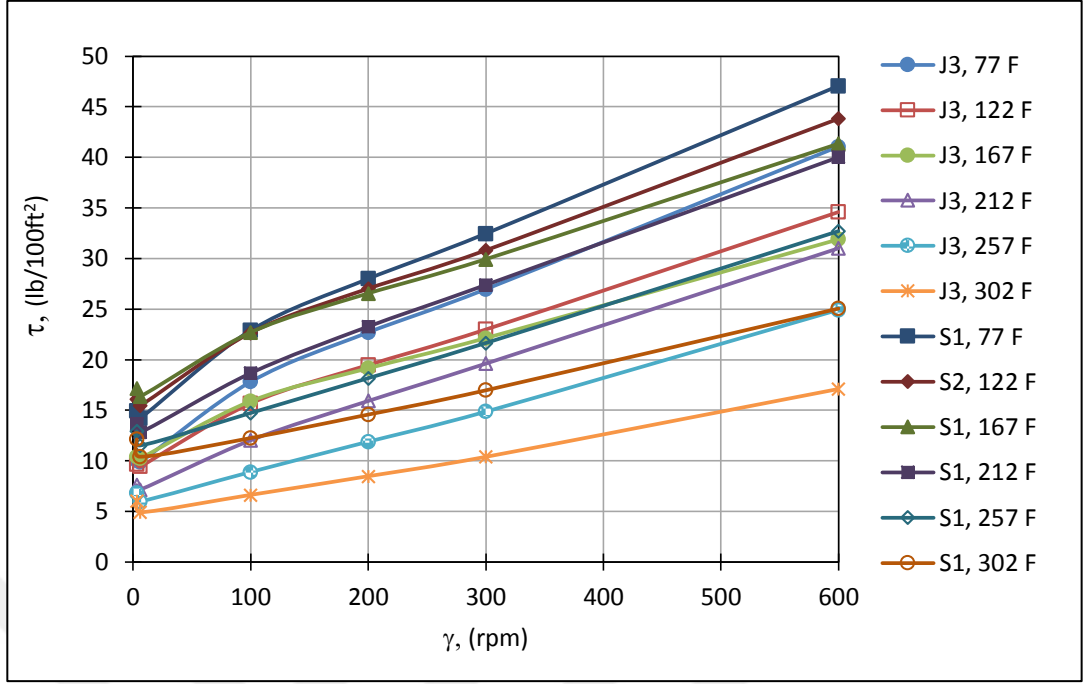
Şekil 4.4 J2 ile S1 numunelerinin reogramlarının sıcaklığa bağlı değişimlerinin karşılaştırılmasını göstermektedir. Her iki numunede de sıcaklığa bağlı olarak akma noktası ve kayma gerilmesi değerleri azalmıştır. Aynı zamanda kayma hızı arttıkça da kayma gerilmesi değerleri yine artış göstermiştir. Söz konusu olan tüm sıcaklıklarda sabit kayma hızlarında S1 numunesinin akma noktası ve kayma gerilmesi değerleri J2 numunesinden daha yüksektir. Hatta S1 numunesinin 302 °F sıcaklıktaki en düşük kayma gerilmesi değeri J2 numunesinin 77 °F sıcaklığındaki en yüksek kayma

gerilmesi değerinden daha yüksektir. Diğer numunelere kıyasla S1 numunesinin arasındaki farkın en fazla olduğu J2 numunesi olmuştur.



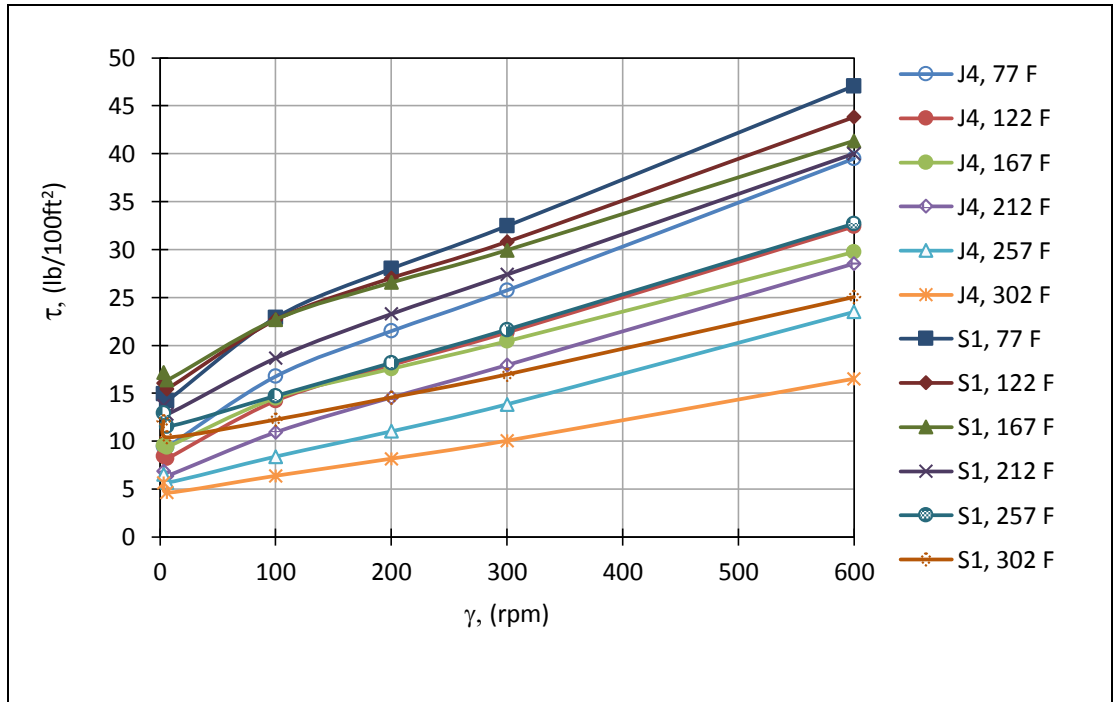
Şekil 4.4. J2-S1 numunelerinin reogramlarının karşılaştırılması

Şekil 4.5 J3 ile S1 numunelerinin sıcaklıkla kayma hızı-kayma gerilmesi ilişkisini göstermektedir. J1 numunesi ile benzer davranış görülmüştür. Çalışılan bütün sabit sıcaklıklarda S1 numunesinin akma noktası ve kayma gerilmesi değerleri J3 numunesinden daha büyüktür. S1 numunesinin en düşük kayma gerilmesi değeri olan 302 °F sıcaklıktaki değeri, J3 numunesinin 257 ve 302 (°F) sıcaklığındaki kayma gerilmesi değerlerinden daha büyüktür. Ancak J1 numunesine nazaran 600 rpm kayma hızında J3 ile S1 numunelerinin kayma gerilmeleri arasındaki fark daha azdır.



Şekil 4.5. J3-S1 numunelerinin reogramlarının karşılaştırılması

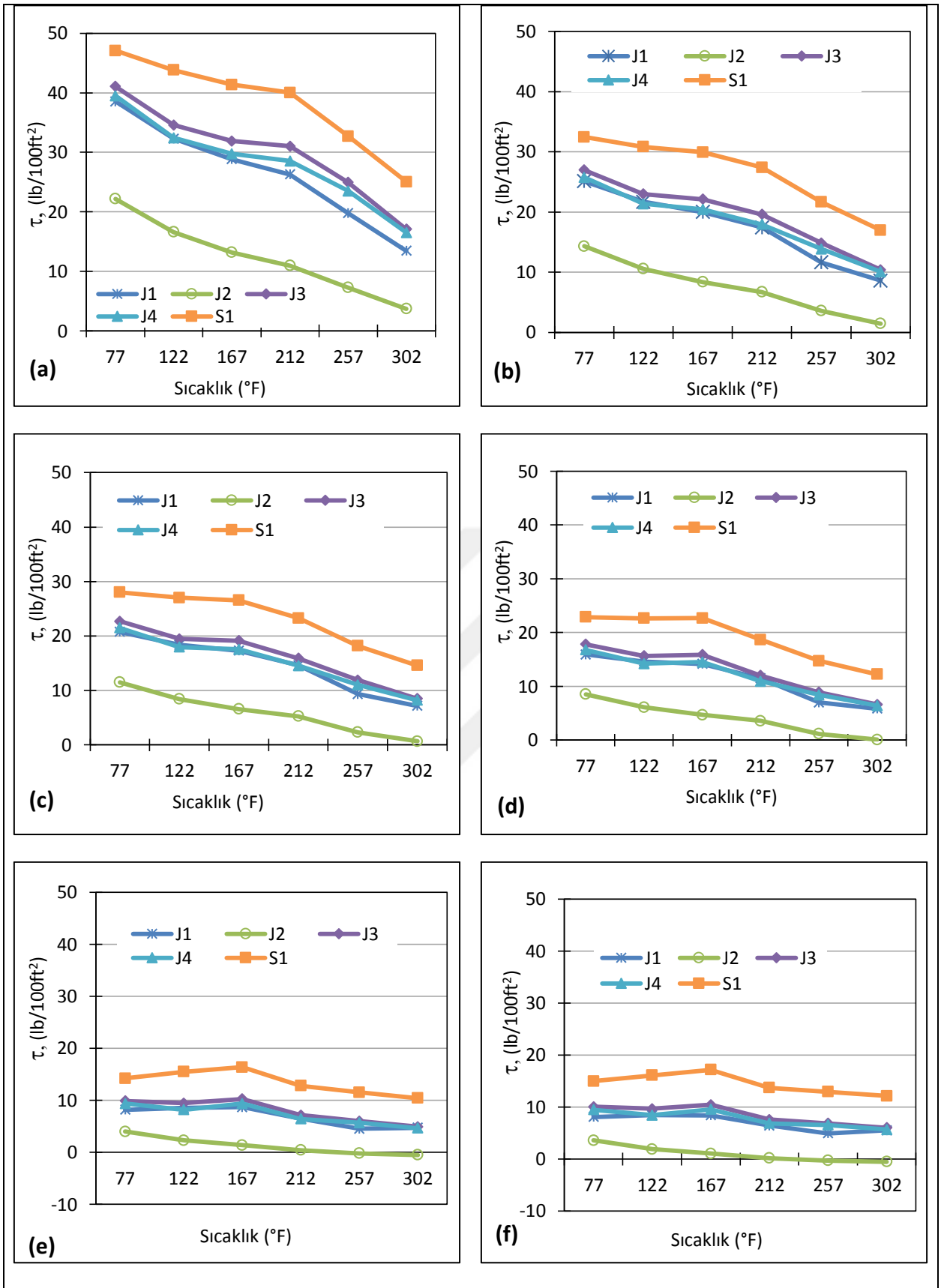
J4 ile S1 numunelerinin ilişkisini incelediğimizde J1 ile J3 numunelerine benzer bir davranış görülmüştür (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. J4-S1 numunelerinin reogramlarının karşılaştırılması

Bütün numunelerde ortak olarak saf suyun 77, 122 ve 167 (°F) sıcaklığındaki kayma gerilmesi değerleri jeotermal sularının en yüksek kayma gerilmesinin okunduğu 77 °F sıcaklıktaki değerinden daha yüksektir.

Hazırlanan numunelerin sıcaklığa bağlı olarak sabit kayma hızlarındaki davranışları Şekil 4.7’de verilmiştir. Buna göre 600 rpm kayma hızında 212 °F sıcaklığa kadar kayma gerilmesi değerlerinde yumuşak bir azalım görülürken, 212 °F sıcaklıktan sonra önemli bir düşüş meydana gelmiştir (Şekil 4.7-a). 300 rpm kayma hızlarında 212 F sıcaklıktan sonra kayma gerilmesi değerlerinde düşüş görülmekle birlikte 600 rpm hızındaki kadar belirgin değildir (Şekil 4.7-b). Buna göre kayma hızı arttıkça 212 °F sıcaklıktan sonra kayma gerilmesi değerleri daha ciddi düşüşler göstermektedir. 200 rpm hızında yine sıcaklık artışıyla bütün numunelerde kayma gerilmesi düşmekte ve tüm numunelerde 167 °F sıcaklıktan itibaren ciddi düşüş görülmüştür (Şekil 4.7-c). 100 rpm kayma hızında 200 rpm hızındaki benzer davranışlar görülmüştür (Şekil 4.7-d). 6 rpm (Şekil 4.7-e) ve 3 rpm (Şekil 4.7-f) gibi düşük kayma hızlarındaki davranışlar incelendiğinde 200 rpm ve 300 rpm kayma hızlarındaki davranışa benzer şekilde 167 °F sıcaklıktan itibaren önemli düşüşler görülmüştür. Ayrıca, J2 numunesi 257 ve 302 (°F) sıcaklıklarda kayma gerilmeleri negatif değerler olarak reoloji göstermemiştir.



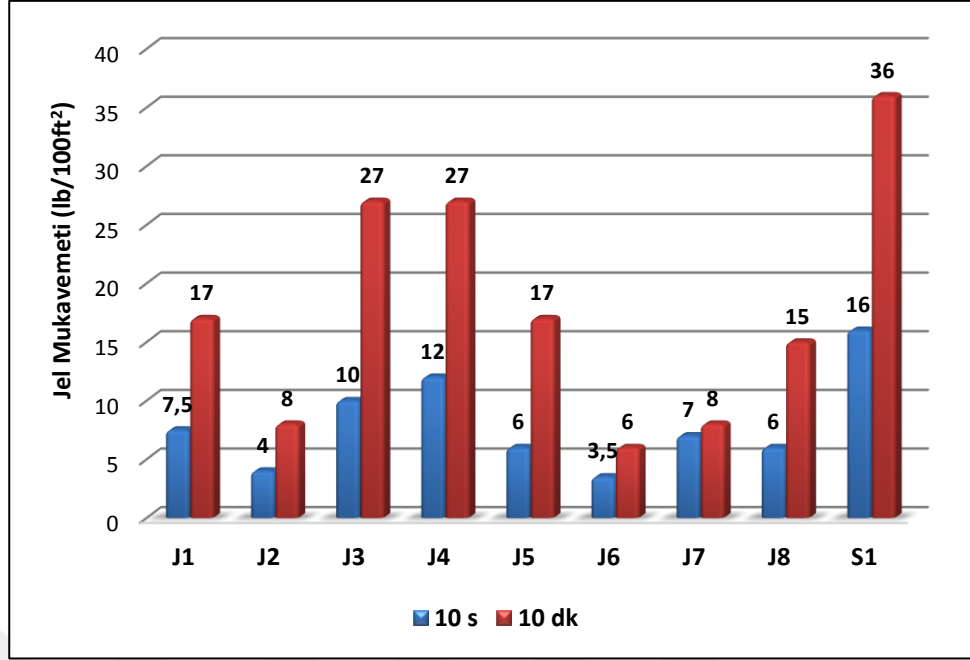
Şekil 4.7. J1, J2, J3, J4, S1 numunelerinin sabit kayma hızlarında sıcaklığa bağlı davranışı: a) 600 rpm, b) 300 rpm, c) 200 rpm, d) 100 rpm, e) 6 rpm, f) 3 rpm

Formülasyonu Çizelge 3.1’de verilen çamur numunelerinin altı hızlı Fann model 35 viskometre (Şekil 3.5) ile ortam koşullarında ölçülen kadran okumaları Çizelge 4.2’de verilmiştir. Yine jeotermal sulu çamurların saf sulu çamurdan altı farklı kayma hızında da daha düşük kadran okumalarının olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.2. Çamur numunelerinin ortam koşullarındaki kadran okuma değerleri

Numuneler		J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	S1
Kadran Okuması (θ)	600 rpm	32.5	21	37	35.5	35	19.5	25	31	43
	300 rpm	23.5	14.5	27	25.5	23.5	15	17.5	20.5	33
	200 rpm	19	11.5	22.5	21.5	18.5	11.5	14.5	16.5	29
	100 rpm	14.5	8	17	16.5	13.5	8	11	11.5	23
	6 rpm	7	4	9	10	4.5	3.5	4,5	3	14
	3 rpm	5	3	7	10	4	2.5	4	2.5	13

6 devirli Fann Model 35 döner viskometre kullanılarak hazırlanan çamur numunelerinin 16 saat dinlendirme işleminden sonra 5 dakika karıştırılarak 10 s ve 10 dk jel mukavemetleri Fann Model 35 viskometre (Şekil 3.5) ile ölçülmüştür. Jel mukavemetleri ölçülürken öncelikle numune 10 s boyunca 600 rpm hızında karıştırılmıştır. Daha sonra 10 s mukavemetleri ölçümünde viskometre durdurulmuş 10 s beklemeden sonra 3 rpm hızında çalıştırılıp kadran okumasının gösterdiği maksimum değer 10 s jel mukavemeti olarak kaydedilmiştir. Maksimum değer 3 rpm hızında çalıştırılmaya başlandığında ibrenin gösterdiği ilk gösterdiği en yüksek değer lb/100ft² cinsinden jel mukavemeti olarak alınmıştır. Daha sonraki okumalar ilk değerden hep daha düşük çıkmıştır. 10 dakika jel mukavemetini ölçmek için ise numune yine 600 rpm hızında 10 s süreyle karıştırıldıktan sonra viskozimetre durdurulmuş ve kronometre kullanılarak 10 dakika hareketsiz bekletilmiştir. 10 dakikalık beklemeden sonra viskometre 3 rpm hızında çalıştırılmış ve bu hızda ölçülen maksimum değer lb/100ft² cinsinden kaydedilmiştir. Ölçümlere ait sonuçlar Şekil 4.8’de gösterilerek J2 numunesi, J5 ve J6 numuneleri dışındaki diğer tüm numunelerde jel kuvveti ilerleyen (progressive) yapıya yakın olduğu görülmüştür.



Şekil 4.8. Numunelerin 10 s ve 10 dk jel mukavetleri

Çamur numunelere ait Denklem (3.2) kullanılarak plastik viskozite (PV), Denklem (3.39) kullanılarak akma noktaları (YP) hesaplanarak YP/PV oranları Çizelge 4.3’de verilmiştir. Buna göre tüm sıcaklıklarda en yüksek YP/PV değerleri S1 numunesi vermiştir. Bütün numuneler 122 ve 167 (°F) sıcaklıklarda kimyasal aliterasyonlarını tamamlayıp, bu sıcaklıklardan sonra YP/PV oranlarında azalma başlamıştır. 250 °F sıcaklıktan sonra bentonit çamurlarının stabilitelelerinin bozulduğu gerçeği göz önüne alındığında özellikle 302 °F sıcaklıkta YP/PV oranındaki hafif artış sebebi açıklanabilir. Kayma hızıyla incelleme özelliği bakımından numunelerin etkinlikleri 250 °F sıcaklığa kadar en yüksek S1 numunesinde, en düşük ise J2 numunesinde görülmüştür. J3 ile J4 numunelerinin etkinlikleri birbirine yakındır. 257 °F sıcaklıkta tüm numunelerde 212 °F sıcaklığındaki değerlere göre kayma incelmeye derecesinde belirgin bir düşüş görülmüştür. 302 °F sıcaklıkta ise floküle olmanın belirtisi olarak bu derece yüksek sıcaklıkta kayma incelmeye etkinliği artmaya başladığını görülmektedir. Bu nedenle 250 °F sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıklardaki değerler güvenli değerler olmayacaktır. Ortam koşullarında ise en yüksek YP/PV oranları S1 numunesi ile J6 numunelerinde görülmüştür.

Çizelge 4.3. Çamur numunelerinin ortam koşullarında ve artan sıcaklıklardaki YP/PV (lb/100ft²/mPas) oranları

Numunelerin artan sıcaklıklardaki YP/PV (lb/100ft²/mPas) Oranları									
Sıcaklık (°F)	77	122	167	212	257	302			
J1	0,873	1,04	1,26	0,965	0,43	0,761			
J2	0,813	0,739	0,729	0,581	-0,022	-0,83			
J3	0,913	0,979	1,266	0,72	0,476	0,549			
J4	0,872	0,927	1,194	0,694	0,437	0,555			
S1	1,223	1,369	1,623	1,169	0,957	1,1			
Numunelerin ortam koşullarındaki YP/PV (lb/100ft²/mPas) Oranları									
Numuneler	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	S1
	1,611	1,230	1,7	1,55	1,043	2,333	1,333	0,952	2,3

4.2. Filtrasyon Testi

Bu çalışmada çamur numunelerinin ortam sıcaklığındaki sıvı kayıpları için standart API filtre presi ile 100 psi basınç altında ölçümler yapılmıştır. Sıcaklık artışının numunelerin filtrasyonu üzerindeki etkisini inceleyebilmek için, YSYB filtre presi (500 ml) ile aynı basınç altında (100 psi), 212 °F sıcaklıkta ölçümler yapılmıştır. Ölçümlere ait sonuçlar ve ölçüm yöntemi Bölüm 3.2’de belirtildiği şekilde yapılmış olup aşağıda verilmiştir.

4.2.1. Standart API Sıvı Kaybı Testi

Hazırlanan numunelerin sıvı kayıpları öncelikle ortam sıcaklığında API filtre presi (Şekil 3.6) ile ölçülmüştür. Deney yapımında alt kapağa sırasıyla 60 mesh’lik elek, Watman No. 50 filtre kağıdı ve basınç verildiği anda herhangi bir sızma olmaması için conta yerleştirilerek hücre haznesi üstten ½ inç kalacak şekilde test edilecek çamurla doldurulmuştur. Çamur haznesinin ağzı, contası yerleştirilmiş üst kapak ile kapatılıp sıkıştırma kolu ile sabitlenerek ana gövdeye yerleştirilmiş ve çamur haznesinin altına birikecek filtrat okumaları için mezür konmuştur. Daha sonra 100 psi basınç girişi açılarak 0.25, 0.50, 1, 3, 5, 7,5, 10, 15, 20, 25 ve 30 (dk)’ da filtrat okumaları kaydedilmiştir.

Şekil 4.9’da jeotermal sulu çamurlarla saf sulu çamurların zaman- standart API sıvı kayıpları karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Buna göre aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

S1 numunesinin 1. Dakikaya kadar ani sıvı kaybı J1 numunesinden yüksek olup ilerleyen diğer tüm süreler sonunda J1 numunesinin sıvı kayıpları daha büyük değerler almıştır. S1 numunesi 20. Dakikada normal seyrinden daha düşük sıvı kayıpları vermiştir.

J2 numunesi ile S1 numunesi zamana bağlı olarak standart API sıvı kaybı değerlerine baktığımızda 1 dakikalık süre sonuna kadar ani sıvı kayıpları aynı değerlerde olurken 3, 5, 7,5, 10, 15, 20, 25 ve 30 dakikalık süreler sonunda J2 numunesinin ölçülen sıvı kayıpları S1 numunesinden sürekli daha yüksek değerler almıştır.

J3 numunesi ile S1 numunesinin zamana bağlı standart API sıvı kayıplarını inceledimizde 3. dakikaya kadar olan ani sıvı kayıpları J3 numunesinde daha düşük olup 5. Dakikada aynı değerlerde sıvı kayıpları ölçülmüştür. Daha sonraki çalışılan tüm süreler sonunda J3 numunesinin sıvı kaybı değerlerinin daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

J4 ile S1 numunelerinin zamana bağlı standart API sıvı kaybı ilişkileri incelendiğinde 0.25, 0.5, 1, 3, 5 ve 7.5 dakikalık süre sonunda J4 sıvı kayıpları saf su numunesinden düşük çıkıp, 10. ve 15. dakika süreler sonunda ise aynı değerleri aldıkları görülmüştür. 30 dakikalık süre sonunda saf su çok az miktarda daha az sıvı kaybı göstermiştir.

J5 ile S1 numunelerinin zamana bağlı standart API sıvı kaybı ilişkileri incelendiğinde hem ani sıvı kayıpları hem de ölçüm yapılan diğer tüm süre sonlarında J5 numunesi S1 numunesinden daha yüksek sıvı kaybı değerleri göstermiştir.

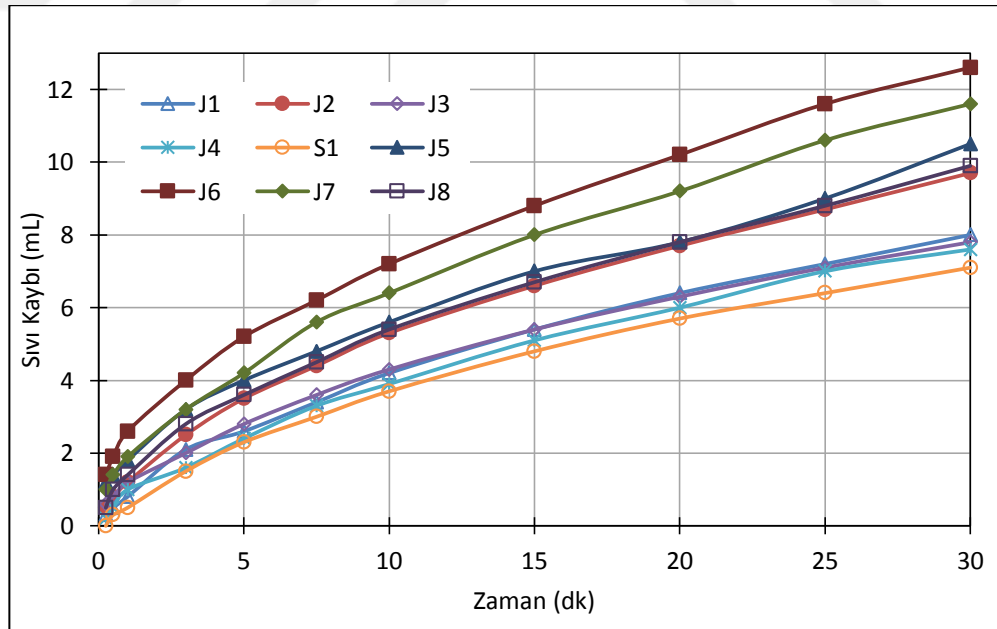
J6 ile S1 numunelerinin zamana bağlı standart API sıvı kaybı ilişkileri incelendiğinde J5-S1 sonucuna benzer şekilde hem ani sıvı kayıpları hem de ölçüm yapılan diğer tüm süre sonlarında J6 numunesi S1 numunesinden daha yüksek sıvı kaybı değerleri göstermiştir.

J7 ile S1 numunelerinin zamana bağlı standart API sıvı kaybı ilişkileri incelendiğinde yine J5-S1, J6-S1 sonucuna benzer şekilde hem ani sıvı kayıpları hem de

ölçüm yapılan diğer tüm süre sonlarında J7 numunesi S1 numunesinden daha yüksek sıvı kaybı değerleri göstermiştir.

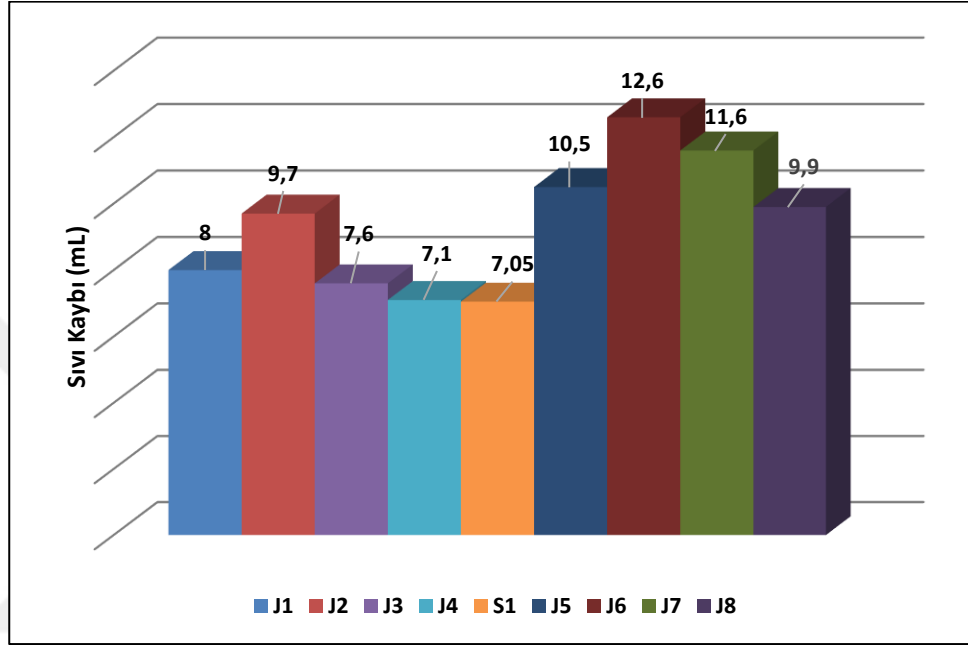
J8 ile S1 numunelerinin zamana bağlı standart API sıvı kaybı ilişkileri incelendiğinde yine J5-S1, J6-S1, J7-S1 sonucuna benzer şekilde hem ani sıvı kayıpları hem de ölçüm yapılan diğer tüm süre sonlarında J8 numunesi S1 numunesinden daha yüksek sıvı kaybı değerleri göstermiştir.

Ölçüm yapılan bütün süreler sonunda standart API sıvı kaybı en yüksek çıkan J6 numunesi olmuştur. Aynı zamanda ani sıvı kaybı değeri en yüksek yine J6 numunesinde görülmüştür. En düşük sıvı kayıpları J4 numunesi ile S1 numunesinde görülmüştür. Ani sıvı kayıpları açısından en düşük değerler J4 numunesinde görülürken zamana bağlı olarak 5, 7.5 ve 25. dakikalarda saf su çok az miktarda daha yüksek değerler alırken, 10. ve 15. dakikalarda aynı değerleri vermişlerdir. 20. ve nihayet süre olan 30 dakikada ise en düşük değerler S1 numunesinde okunmuştur. Saf suyun 30 dakikalık süre sonunda sıvı kaybı çalışılan numuneler arasından en düşük sıvı kaybı değeri gösterirken ani sıvı kayıplarının 1. dakikaya kadar J2 ile aynı, J3, J4 ve J1 numunesinden yüksek olması dikkat çekicidir.



Şekil 4.9. Numunelerin zamana bağlı standart API sıvı kayıplarının birlikte gösterimi

Her bir numunenin 30 dakika sonundaki API filtre presiyle ölçülen sıvı kaybı değerlerine bakıldığında J6>J7>J8>J5>J2>J1>J3>J4>S1 şeklinde bir sıralama oluşmaktadır. J4 ile S1 numunelerinin 30 dakikalık sıvı kayıpları arasında önemli bir fark gözlenmemiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Tüm çamur numunelerinin 30 dakikadaki standart API sıvı kaybı değerlerinin karşılaştırılması

4.2.2. API Yüksek Sıcaklık-Yüksek Basınç (YSYB) Sıvı Kaybı Testi

Numunelerin (J1, J2, J3, J4, S1) 212 °F sıcaklığındaki sıvı kayıpları ölçmek için Şekil 3.7’de verilen API Yüksek Sıcaklık-Yüksek basınç filtre presi kullanılmıştır. Standart API su kaybının ölçümünde olduğu gibi alt kapağa elek ve conta yerleştirilmiş ancak farklı olarak sıkma işlemi altı adet vida ile yapılmıştır. Çamur haznesi 500 ml çamurlar yerleştirildikten sonra üst kapak da altı vida ile sıkılmış ve ana gövdeye yerleştirildikten sonra 100 psi basınç verilmiştir. Isıtma düğmesi 5’ e getirilerek 212 °F sıcaklığına ısınması için beklenmiştir. Bekleme esnasında termometreden sıcaklık değerleri kontrol edilip 212 °F sıcaklığına ulaştığında, çamur haznesinin alt ucu açılarak yine 0.25, 0.50, 1, 3, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25 ve 30 (dk)’ da filtrat okumaları alınmıştır.

Şekil 4.11’de jeotermal sulu çamurlarla saf sulu çamurların API-Yüksek Sıcaklık-Yüksek Basınç sıvı kayıpları karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir. Buna göre aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

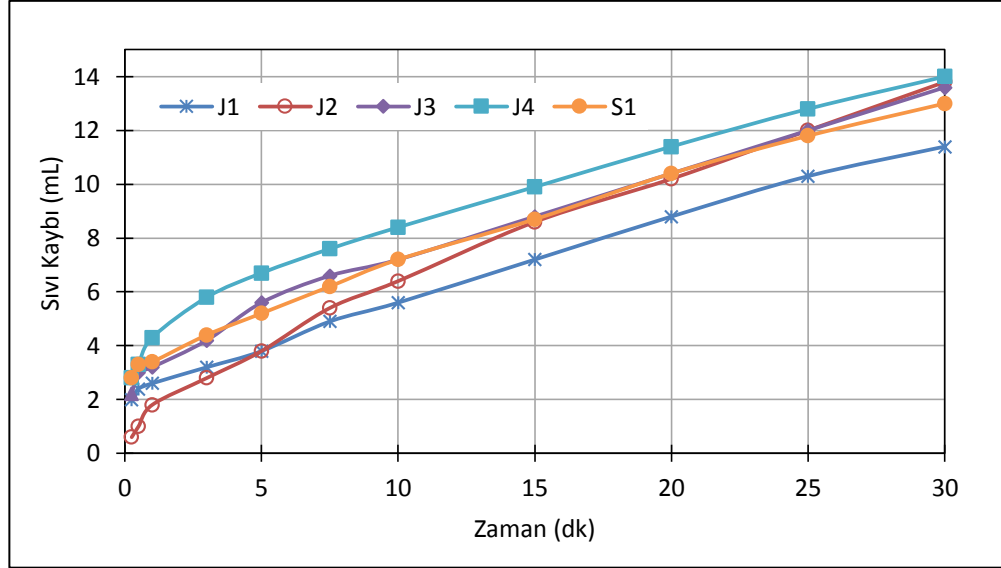
J1 ile S1 numunelerinin 212 °F sıcaklığındaki sıvı kayıpları incelendiğinde sözkonusu olan tüm süreler sonunda ölçülen sıvı kayıpları S1 numunesinin J1 numunesinden hep daha yüksek çıkmıştır.

J2 ile S1 numunelerinin 212 °F sıcaklık ve 100 psi basınç altındaki zamana bağlı sıvı kaybını göstermektedir. Buna göre J2 numunesi 20. dakikaya kadar olan tüm süre sonlarında sıvı kaybı değerleri S1 numunesinden daha düşüktür. 25 ve 30 dakikadaki sıvı kayıpları S1 numunesinden daha yüksek ölçülmüştür.

J3 numunesinin 3. dakikaya kadar ani sıvı kaybı S1 numunesinde daha yüksektir. Diğer artan süre sonlarında yapılan ölçümlerde ise J3 numunesi S1 numunesinden daha yüksek sıvı kayıpları vermiştir.

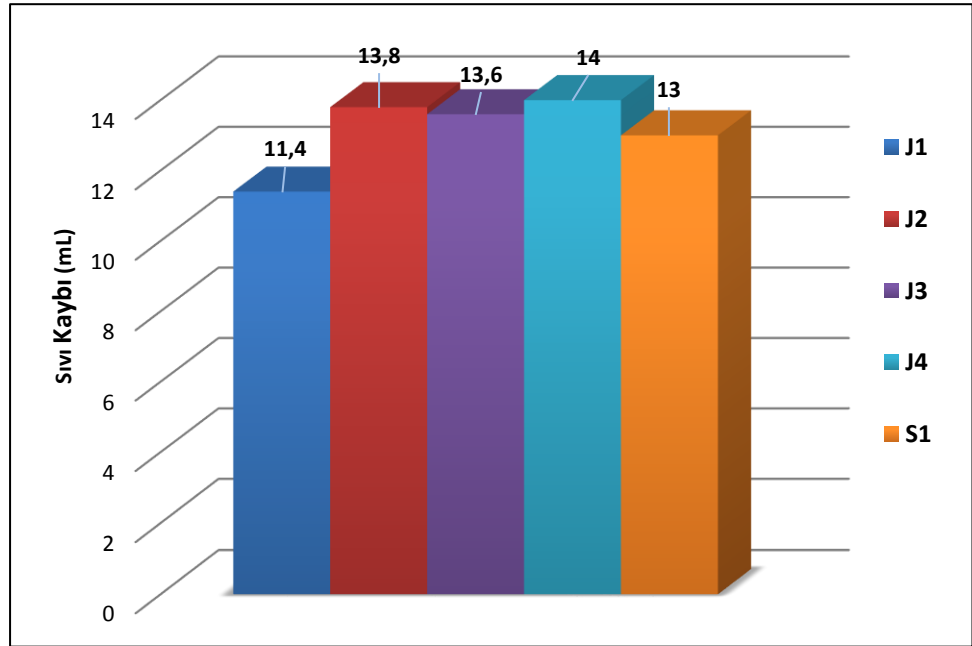
J4 örneğinde ise tüm süreler sonunda sıvı kayıpları hep S1 numunesinden daha yüksek çıkmıştır.

Ölçüm yapılan tüm süreler sonundaki sıvı kayıpları en yüksek hep J4 numunesinde görülmüştür. Aynı şekilde ani sıvı kayıpları en yüksek olan yine J4 numunesi olmuştur. En düşük ani sıvı kayıpları 3. Dakikaya kadar J2 numunesinde görülürken sonraki tüm süre sonlarında ölçülen sıvı kayıplarında en düşük değerleri J1 numunesi göstermiştir.



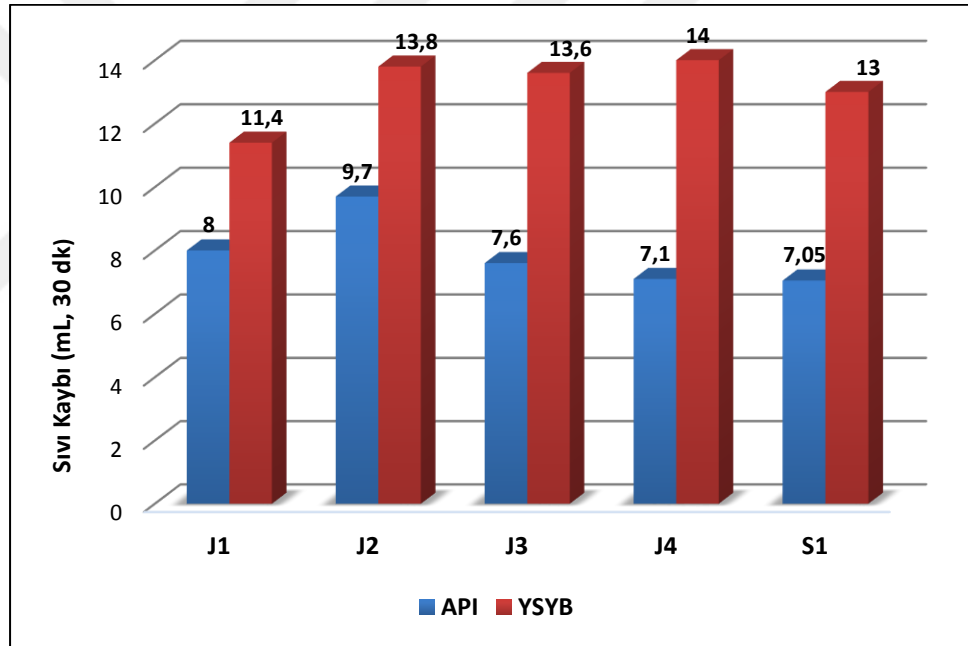
Şekil 4.11. J1, J2, J3, J4, S1 numunelerinin zamana bağlı API Yüksek Sıcaklık, Yüksek Basınç sıvı kayıplarının birlikte gösterimi

J1, J2, J3, J4, S1 numunelerinin 30 dakika sonundaki YSYB filtre presiyle ölçülen sıvı kaybı değerlerine bakıldığında $J4 > J2 > J3 > S1 > J1$ şeklinde bir sıralama oluşmaktadır. J3 ile J2 ve S1 numunelerinin 30 dakikalık sıvı kayıpları arasında önemli bir fark gözlenmemiştir (Şekil 4.12).



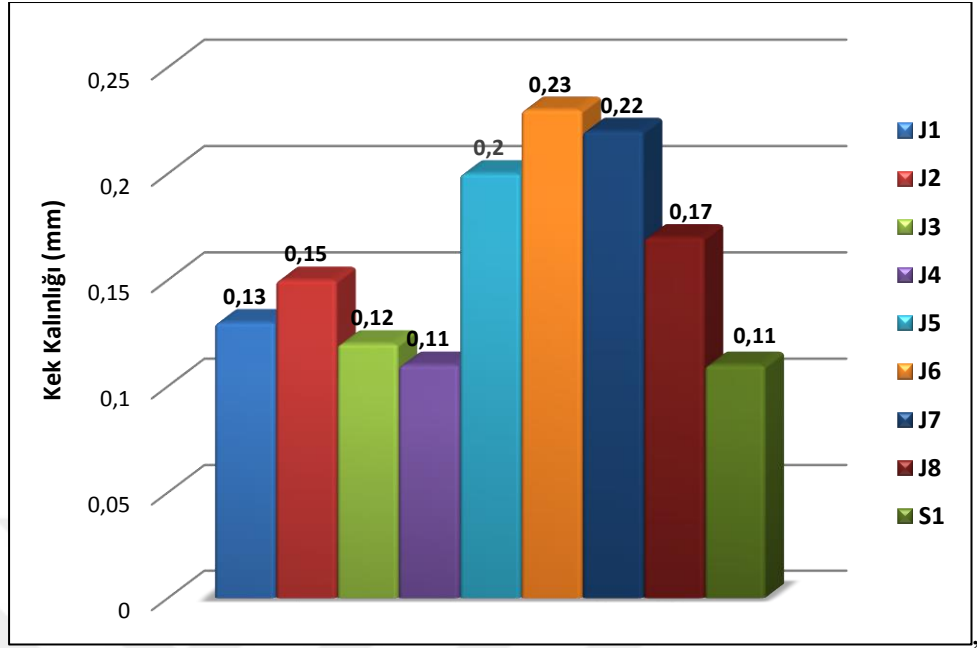
Şekil 4.12. J1, J2, J3, J4, S1 numunelerinin 30 dakikadaki API Yüksek Sıcaklık, Yüksek Basınç sıvı kaybı değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.13’de API filtre presi ölçümlerden çok farklı olarak J2 numunesi çalışılan numuneler arasından 3. dakikaya kadar en düşük değerleri vererek, diğer süre sonlarında artışa geçip 30 dakika sonunda J4 numunesinden sonra en yüksek sıvı kaybını veren numune olmuştur. J4 numunesi API filtre presi ölçümlerinden çok farklı bir davranış göstermiştir. Çalışılan bütün süreler sonunda sıvı kayıpları diğer numunelere nazaran sürekli en yüksek değeri vermiştir. Halbuki API filtre presi ölçümlerinde S1 numunesi ile en düşük değerleri vermiştir. J1 numunesi API filtre presi ile ortam sıcaklığındaki ölçümlerde 30 dakikada J2 numunesinden sonra en yüksek sıvı kaybı değeri gösterirken, 212 °F sıcaklıkta en düşük sıvı kayıplarını 7.5 dakikadan itibaren olan tüm sürelerde J1 numunesi göstermiştir.



Şekil 4.13. J1, J2, J3, J4, S1 numunelerinin API-YSYB ve standart API sıvı kayıplarının birlikte gösterimi

Çamur numunelerinin API filtre preslerinin ölçümünden sonra kek kalınlıkları kumpas ile ölçülmüştür. Numunelerin API filtre presi sonucu ölçülen kek kalınlıkları Şekil 4.14’de gösterilmiştir. En düşük kek kalınlığı J4 ve S1 numunesinde ölçülmüş en yüksek ise J6 ile J7 numunelerinde görülmüştür. Tüm numunelerin kek kalınlıkları birbirine yakın olup API standartlarında önerilen değer (1-2 mm) çok altındadır.



Şekil 4.14. Numunelerin standart API filtre presi ile sıvı kaybı ölçümü sonrası kek kalınlıkları

4.3. Çamur Yoğunluğu Testi

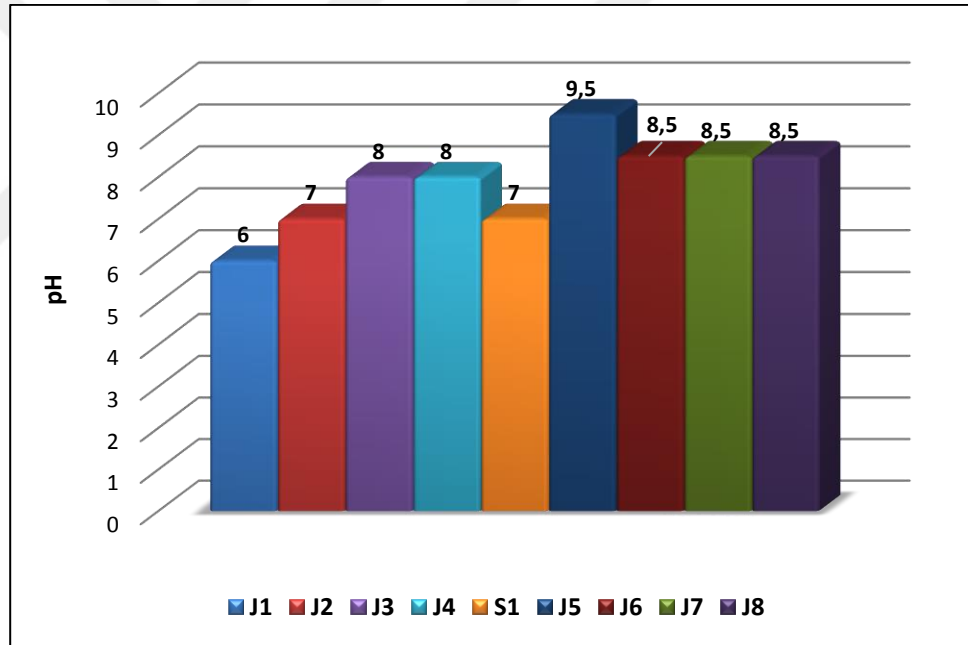
Hazırlanan numunelerin yoğunlukları Şekil 3.8’de verilen çamur terazisi ile ölçülmüştür. Deneye başlamadan önce, terazinin kalibrasyonu kontrol edilerek (tatlı suyun kalibrasyonunun skalası referans alınarak, 8,33 lb/gal), kap temiz ve kuru kullanılmıştır. Çamur numuneleri kabın üzerindeki delikten bir miktar çamur çıkmasına dikkat edilerek, kabın dolu olduğundan emin olunarak gerekli miktarda kaba konulmuştur. Numune koyulduğunda hava kabarcıkları gidene kadar beklenmiş, kapak kapatıldıktan sonra Kapağın üstündeki havalandırma deliği kapatılıp kap veya kolundaki çamur kırıntıları yıkanıp ve kurulmuş ardından mekanizmadaki yerine konmuştur. Terazi dayanma noktasına getirilmiş, terazi kolu üzerindeki ağırlık hareket ettirilerek hazne ve kolunun dengelenmesi sağlanmıştır. Terazi kolu üzerinde hareket ettirilen ağırlığın sol el tarafına gelen kenarındaki değer okunarak çamur yoğunlukları kaydedilmiştir.

Eşit miktarda bentonit ve su kullanılarak hazırlanan sondaj çamuru süspansiyonlarında, farklı lokasyonlardan alınmış olan numunelerde de yoğunluğun

belirleyici özellik olmadığı belirlenmiştir. Üzerinde çalışılan numunelerin yoğunlukları 8,6 lb/gal olarak ölçülmüştür.

4.4. pH Testi

Hazırlanan numunelerin API standart filtre presi ile sıvı kayıplarının ölçümünden sonra toplanan filtrata 4 renkten oluşan pH kağıdı batırılmış, sıvının yüzeyi ıslatmasına ve rengin sabitlenmesine kadar beklenmiştir. pH kağıdında oluşan renk dizimi, değişik pH değerleri için olması gereken renklerle karşılaştırılarak, pH değerleri belirlenmiştir. Numunelere ait pH değerleri Şekil 4.15’de verilmiştir. Sadece J1 numunesi asit olup, J2 ve S1 numuneleri nötr, J3, J4, J5, J6, J7, J8 numuneleri ise alkali (bazik) dir.



Şekil 4.15. Numunelerin standart API filtre presi ile sıvı kaybı deneyi sonrası ölçülen pH değerleri

4.5. Reolojik Model Analizi

Reolojik model tahmininde MATLAB programı kullanılarak modellere ait parametreler ve belirleme katsayısı (R^2), ortalama karesel hata (SSE) ve hata kareleri

toplamı kökü (RMSE) hesaplanmıştır. 3 ve 6 (rpm) hızlarında negatif kayma gerilmeleri elde edildiğinden bu hızlardaki değerler model tahminlerine dahil edilmemiştir. Numunelere ait reolojik parametre ve reolojik model tesbitine yönelik yapılan istatistik sonuçlar Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Çamur numunelerinin ortam koşullarında ve artan sıcaklığa bağlı Bingham Plastik, Power Law ve Herschel Bulkley model parametreleri ve istatistik sonuçları

J1 numunesi sıcaklığa bağlı reolojik parametreler ve istatistik sonuçları							
Sıcaklık, °F	77	122	167	212	257	302	
Bingham Plastik	μ_p (Pa-s)	0.01264	0.00964	0.00820	0.00828	0.007218	0.00431
	τ_y (Pa)	5.557	5.076	5.424	4.131	2.025	1.995
	SSE	0.01495	0.2115	0.00696	0.00421	0.03403	0.01642
	R ²	0.9998	0.9944	0.9997	0.9998	0.9984	0.9978
	RMSE	0.08646	0.3252	0.05901	0.0459	0.1304	0.0906
Power-Law	n	0.528	0.483	0.4249	0.4962	0.642	0.5167
	K (Pa-s ⁿ)	0.468	0.5156	0.7125	0.3974	0.1086	0.1755
	SSE	0.7882	1.432	0.598	0.4381	0.3611	0.2227
	R ²	0.9879	0.9623	0.9782	0.9843	0.983	0.9707
	RMSE	0.6278	0.8461	0.5468	0.468	0.4249	0.3337
Herschel-Bulkley	m	0.9508	1.216	0.9912	0.9781	1.172	1.207
	K (Pa-s ⁰)	0.01815	0.00200	0.00875	0.00973	0.002066	0.000955
	T ₀ (Pa)	5.249	5.865	5.39	4.044	2.515	2.337
	SSE	0.006192	0.1192	0.00684	0.003479	0.002358	4,97E-02
	R ²	0.9999	0.9969	0.9997	0.9999	0.9999	1
	RMSE	0.07869	0.3452	0.08276	0.05899	0.04856	0.007051
J2 numunesi sıcaklığa bağlı reolojik parametreler ve istatistik sonuçları							
Sıcaklık, °F	77	122	167	212	257	302	
Bingham Plastik	μ_p (Pa-s)	0.007633	0.005881	0.004745	0.004127	0.00346	0.0020
	τ_y (Pa)	2.867	1.986	1.51	1.067	-0.04401	-0.3477
	SSE	0.01893	0.0114	0.01196	0.008582	0.000243	0.0023
	R ²	0.9992	0.9992	0.9987	0.9988	1	0.9987
	RMSE	0.09729	0.07549	0.07732	0.06551	0.01102	0.03438
Power-Law	n	0.567	0.5931	0.607	0.6552	1.027	1.494
	K (Pa-s ⁿ)	0.2064	0.1293	0.09343	0.05566	0.002841	5,73E-02
	SSE	0.1627	0.08043	0.03787	0.01964	0.0002229	0.01079
	R ²	0.9931	0.9943	0.9959	0.9972	1	0.9939
	RMSE	0.2853	0.2005	0.1376	0.09909	0.01056	0.07345
Herschel-Bulkley	m	0.8825	0.8815	0.8509	0.8572	1.015	1.148
	K (Pa-s ⁰)	0.0182	0.01412	0.01433	0.01189	0.003099	0.00070
	τ_y (Pa)	2.386	1.612	1.115	0.7406	-0.02003	-0.2233
	SSE	8,94E-02	2,25E-02	4,18E-02	0.0003958	0.0001828	0.00034
	R ²	1	1	1	0.9999	1	0.9998
	RMSE	0.009453	0.00473	0.006466	0.0199	0.01352	0.0187

Çizelge 4.4. (devam) J3 numunesi sıcaklığa bağlı reolojik parametreler ve istatistik sonuçları							
Sıcaklık, °F		77	122	167	212	257	302
Bingham Plastik	μ_p (Pa-s)	0.0130	0.01063	0.0089	0.0106	0.0090	0.0059
	τ_y (Pa)	6.345	5.672	6.077	3.968	2.63	2.071
	SSE	0.0176	0.0124	0.0065	0.0017	0.0313	0.0288
	R^2	0.9997	0.9997	0.9998	1	0.9991	0.998
	RMSE	0.0940	0.0789	0.0574	0.0294	0.1252	0.997
Power-Law	n	0.502	0.587	0.419	0.57	0.6328	0.5884
	K (Pa-s ⁿ)	0.5953	0.479	0.8194	0.2816	0.1462	0.1359
	SSE	1.17	0.9864	0.8269	0.5497	0.5088	0.3226
	R^2	0.983	0.9785	0.9748	0.9881	0.9847	0.9775
	RMSE	0.7649	0.7023	0.643	0.5243	0.5044	0.4016
Herschel-Bulkley	m	1.005	1.05	1.033	0.9947	1.13	1.198
	K (Pa-s ⁰)	0.01252	0.0073	0.0070	0.01107	0.0035	0.0014
	τ_y (Pa)	6.377	5.908	6.209	3.941	3.113	2.524
	SSE	0.01758	0.006341	0.0047	0.0016	0.0023	0.0007
	R^2	0.9997	0.9999	0.9999	1	0.9999	0.9999
	RMSE	0.1326	0.07963	0.06865	0.04081	0.04896	0.0276
J4 numunesi sıcaklığa bağlı reolojik parametreler ve istatistik sonuçları							
Sıcaklık, °F		77	122	167	212	257	302
Bingham Plastik	μ_p (Pa-s)	0.01274	0.01021	0.008562	0.009869	0.00856	0.0057
	τ_y (Pa)	5.882	5.072	5.473	3.575	2.425	1.995
	SSE	0.01041	0.00747	0.00530	0.00284	0.05625	0.0242
	R^2	0.9998	0.9998	0.9998	0.9999	0.9981	0.9982
	RMSE	0.07215	0.06113	0.05151	0.03768	0.1677	0.1102
Power-Law	n	0.5158	0.4972	0.4333	0.5771	0.64	0.5894
	K (Pa-s ⁿ)	0.5207	0.4857	0.6924	0.2467	0.1308	0.1304
	SSE	1.048	0.7798	0.7367	0.456	0.5483	0.2925
	R^2	0.9841	0.9816	0.9753	0.9885	0.9816	0.9782
	RMSE	0.724	0.6244	0.6069	0.4775	0.5236	0.3824
Herschel-Bulkley	m	1.004	1.024	1.043	0.9944	1.193	1.188
	K (Pa-s ⁰)	0.01239	0.00857	0.00626	0.01029	0.00210	0.0014
	τ_y (Pa)	5.905	5.184	5.636	3.548	3.064	2.415
	SSE	0.01036	0.00618	0.00239	0.002772	0.000364	0.00041
	R^2	0.9998	0.9999	0.9999	0.9999	1	1
	RMSE	0.1018	0.07862	0.04897	0.05265	0.01908	0.02031

Çizelge 4.4. (devam) S1 numunesi sıcaklığa bağlı reolojik parametreler ve istatistik sonuçları										
Sıcaklık, °F	77	122	167	212	257	302				
μ_p (Pa-s)	0.01353	0.01186	0.01045	0.01193	0.01013	0.0072				
τ_y (Pa)	8.703	8.824	9.091	6.997	5.272	4.544				
SSE	0.01769	0.02556	0.0151	0.01712	0.01202	0.02582				
R^2	0.9998	0.9996	0.9997	0.9997	0.9997	0.9988				
RMSE	0.09404	0.1131	0.0869	0.09252	0.07751	0.1136				
n	0.4318	0.3956	0.3583	0.4549	0.4855	0.4376				
K (Pa-s ⁿ)	1.108	1.322	1.616	0.8046	0.5304	0.5639				
SSE	1.605	1.613	1.369	0.9435	0.9361	0.6939				
R^2	0.9785	0.9718	0.9692	0.9837	0.9776	0.9675				
RMSE	0.8957	0.898	0.8273	0.6868	0.6841	0.589				
m	0.995	1.044	1.033	0.9413	1.072	1.152				
K (Pa-s ⁰)	0.01404	0.00860	0.00821	0.01838	0.005993	0.0023				
τ_y (Pa)	8.671	9.057	9.247	6.647	5.588	4.987				
SSE	0.01759	0.01972	0.01253	0.005973	0.00058	0.00058				
R^2	0.9998	0.9997	0.9997	0.9999	1	1				
RMSE	0.1326	0.1404	0.1119	0.07729	0.02419	0.02425				
Numunelerin ortam koşullarındaki Bingham Plastik, Power Law ve Herschel Bulkley model parametreleri ve istatistik sonuçları										
Numuneler	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	S1	
Bingham Plastik	μ_p (Pa-s)	0.0207	0.0148	0.02285	0.0218	0.0127	0.0066	0.008255	0.0114	0.0226
	τ_y (Pa)	11.77	6.143	14.2	13.61	5.05	3.506	4.474	4.301	20.43
	SSE	2.17	1.232	3.027	1.607	0.3432	1.009	0.1634	0.3245	3.714
	R^2	0.9878	0.9865	0.9859	0.9917	0.9948	0.9468	0.9941	0.994	0.9825
	RMSE	1.042	0.7849	1.23	0.8964	0.4142	0.7101	0.2859	0.4028	1.363
Power-Law	n	0.4637	0.5413	0.4413	0.44	0.5529	0.4808	0.4749	0.5657	0.3531
	K (Pa-s ⁿ)	1.303	0.4935	1.733	1.67	0.3858	0.362	0.4721	0.3129	3.701
	SSE	0.3756	0.0137	0.1599	0.5794	0.1652	0.2389	0.0978	0.0621	0.3674
	R^2	0.9979	0.9998	0.9993	0.997	0.9975	0.9874	0.9965	0.9988	0.9983
	RMSE	0.4334	0.0828	0.2828	0.5382	0.2874	0.3456	0.2211	0.1763	0.4286
Herschel-Bulkley	m	0.5845	0.5473	0.536	0.6375	0.722	0.1926	0.6919	0.6882	0.4856
	K (Pa-s ⁰)	0.4865	0.47	0.7911	0.3363	0.1022	5.398	0.08342	0.1192	1.184
	τ_y (Pa)	4.608	0.1515	4.559	7.618	2.692	-10.48	2.706	1.801	8.7
	SSE	0.1728	0.0134	0.00877	0.00356	0.0248	0.1031	3,35E-02	0.0031	0.0744
	R^2	0.999	0.9999	1	1	0.9996	0.9946	1	0.9999	0.9996
RMSE	0.4157	0.116	0.09366	0.05974	0.1578	0.3211	0.00579	0.0565	0.2728	

Numunelerin plastik viskoziteleri genel olarak 212 °F sıcaklığa kadar azalır, 212 °F sıcaklıkta bir miktar artış görüldükten sonra tekrar azalma görülmüştür. J2 numunesinde sıcaklıkla plastik viskozite sürekli azalmıştır. Çamur numunelerinin akma noktaları ise 167 °F sıcaklığa azalır, 167 °F sıcaklıkta bir miktar artarak bu sıcaklıktan sonra tekrar azalma görülmüştür. Farklı olarak J2 numunesinde akma noktası sıcaklıkla sürekli azalmıştır.

Reolojik model tesbitinde en yüksek R^2 en düşük SSE ve RMSE değerlerine göre inceleme yapıldığında bütün çamur numunelerinin davranışı çalışılan tüm sıcaklıklarda en iyi Herschel Bulkley modeli ile ifade edilmiştir.

4.6. Kesinti Taşıma Kapasitesi

Kesintilerin sondaj çamuru ile hızlı bir şekilde uzaklaştırılması matkabin formasyonun ilerlemesi için yeni yüzeylerin açılmasını kolaylaştırdığından, çamurun taşıma kapasitesi arttıkça ilerleme hızını artmaktadır (Bilgesu ve ark., 2002). Çamur numunelerinin Fann model 35 viskometre ile ortam koşullarındaki, Fann model 50 SL reometre ile ise yüksek sıcaklıklarda kayma gerilmeleri ölçülerek kesinti taşıma indeksleri Denklem (3.13) ile hesaplanmıştır. Denklem (3.11) parametreleri olan “Power Law K ” parametresi Denklem (3.15) ile ve “akış davranış indeksi (n) parametresi” ise Denklem (3.14) ile hesaplanmış olup, çamur ağırlığı değeri (ρ_m) yoğunluk tayini deneyinden elde edilmiş, anülüs hızı ise sondaj endüstrisinde düşey ve düşeye yakın açılı kuyularda etkin bir kuyu temizliği için kabul görmüş gerekli ortalama anülüs çamur hızı (V_a) olan 100 ft/dk alınarak (Bourgoyne, 1991; Altun ve ark., 2011) ortam koşullarında ve çalışılan sıcaklıklar altında hesaplama yapılmıştır. Ayrıca bu parametreler hesaplandıktan sonra $V_a\rho_mK$ çarpımı değerleri ve CCI değeri 1 kabul edilerek etkili kuyu temizliği için gerekli minimum anülüs hızı değerleri hesaplanmıştır ve yapılan hesaplama sonuçları Çizelge 4.5’de verilmiştir.

J1 numunesinin ortam koşullarında CCI değeri 1 değerinin, $V_a\rho_mK$ çarpımı 400.000 değerinin üstü ve etkin kuyu temizliği için gerekli minimum anülüs hızı 100 ft/dk değerinin altında olarak gerekli koşulları sağlarken, 167 °F sıcaklığa kadar $V_a\rho_mK$ Çarpımı 200.000-300.000 civarında, CCI değeri 0,5-0,8 arasında değişmektedir. Buna göre kesintilerin yuvarlatılmış bir şekle sahip olup, kuyudan taşınımları sırasında öğütülmeye uğrayacaklardır. $V_a\rho_mK$ Çarpımı 400.000 civarında olmayıp, CCI değeri sadece ortam sıcaklığında 1 civarı olup artan sıcaklıklarda 1 veya daha yüksek değildir. Dolayısıyla düşük sıcaklıkta bile kesintiler etkili bir şekilde taşınmayacaktır. 167 °F sıcaklıktan sonra ise $V_a\rho_mK$ Çarpımı 100.000 ve CCI değeri ise 0,4-0,1 arasında değişerek kesintiler tanecik yapısına dönüşüp, etkin bir şekilde taşınmayacaktır. Özellikle 212 °F sıcaklıktan yüksek sıcaklıklarda taşıma

kapasitesinde düşüş görülmüş ve buna paralel olarak etkin kuyu temizliği için gerekli minimum anülüs hızı 167 °F sıcaklıktan itibaren artarak tüm sıcaklıklarda kabul görülen 100 ft/dk değerinin üstündedir.

J2 numunesinde 77 °F sıcaklık altında $V_{\alpha\rho_mK}$ Çarpımı 100.000 civarında, CCI değeri ise 0,3 civarında olup artan diğer sıcaklıklarda ise çok daha düşük değerler almıştır. Kesintileri tanecik yapısında taşımak durumunda kalacağından etkin bir taşıma sağlamayacaktır. Taşıma kapasitesi en düşük olan numunedir. Sıcaklığa bağlı olarak taşıma kapasitesinde düşüş görülmüş ve etkin kuyu temizliği için gerekli minimum anülüs hızı sıcaklıkla arttıkça artarak tüm sıcaklıklarda kabul görülen 100 ft/dk değerinin çok üstündedir. Çalışılan hiçbir sıcaklıkta kesintiler etkin bir şekilde taşınamayacak ve anülüste yüksek çamur hızlarının sağlanabilmesi için daha yüksek debilerde çamur pompası çalıştırılması gerekecek, dolayısıyla yüksek pompa hızlarına ulaşmak için daha fazla enerji harcanacağı için sondaj maliyeti artacaktır.

J3 ile J4 numuneleri yakın değerler olarak ortam koşullarında CCI değeri 1 değerinin, $V_{\alpha\rho_mK}$ çarpımı 400.000 değerinin üstü ve etkin kuyu temizliği için gerekli minimum anülüs hızı 100 ft/dk değerinin altında olarak gerekli koşulları sağlarken, 167 °F sıcaklığa kadar $V_{\alpha\rho_mK}$ Çarpımı 200.000-300.000 civarında, CCI değeri ise 0,6-0,9 arasında seyretmiştir. Artan diğer sıcaklıklarda ise $V_{\alpha\rho_mK}$ Çarpımı 100.000 ve daha düşük değerler, CCI değeri ise 0,3-0,1 arasında değişmiştir. Burda da sıcaklığa bağlı olarak kesinti taşıma kapasitelerinde düşüş görülmüştür. Etkin kuyu temizliği için gerekli minimum anülüs hızı 212 °F sıcaklıktan itibaren artmıştır tüm sıcaklıklarda (ortam koşulları hariç) kabul görülen 100 ft/dk değerinin üstündedir.

Ortam koşullarında J5, J7 ve J8 numuneleri CCI değeri 1 değerinin, $V_{\alpha\rho_mK}$ çarpımı 400.000 değerinin altı ve etkin kuyu temizliği için gerekli minimum anülüs hızı 100 ft/dk değerinin üstünde olarak gerekli koşulları sağlamamaktadır. J6 numunesi ise ortam koşullarında CCI değeri 1 değerinin, $V_{\alpha\rho_mK}$ çarpımı 400.000 değerinin üstü ve etkin kuyu temizliği için gerekli minimum anülüs hızı 100 ft/dk değerinin altında olarak gerekli koşulları sağlamaktadır.

Çizelge 4.5. Çamur numunelerinin kesinti taşıma indeksi, $V_{a\rho m}K$ çarpım değerleri ve etkin kuyu temizliği için gerekli minimum anülüs hızları

Numunelerin artan sıcaklığa bağlı Kesinti Taşıma Kapasitesi İndeksleri (CCI)									
Sıcaklık (°F)	77	122	167	212	257	302			
J1	0,591105	0,66781	0,81458	0,473527	0,108753	0,165584			
J2	0,302715	0,196042	0,152506	0,090304	0,007048	0,000325			
J3	0,675486	0,64006	0,912868	0,350717	0,156429	0,130288			
J4	0,605793	0,548046	0,767599	0,305305	0,131981	0,127615			
S1	1,26505	1,430871	1,806462	0,997233	0,580676	0,562747			
Numunelerin ortam koşullarındaki Kesinti Taşıma Kapasitesi İndeksleri (CCI)									
Numuneler	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	S1
	1,395	0,568	1,741	1,427	0,716	1,554	0,776	0,545	3,348
Numunelerin artan sıcaklığa bağlı $V_{a\rho m}K$ (ft/dk.lb/gal.cP) çarpım değerleri									
Sıcaklık (°F)	77	122	167	212	257	302			
J1	236442,1	267123,9	325832	189410	43501,4	66233,56			
J2	121086,2	78417,17	61002,76	36121,87	2819,389	130,3463			
J3	270194,4	256024,2	365147,1	140286,8	62571,79	52115,13			
J4	242317,2	219218,3	307039,6	122122,2	52792,3	51046,03			
S1	506242,2	572348,5	7211584,7	398893	232270,3	225098,8			
Numuneler	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	S1
	55838	227546	696612	570913	286764	621707	310623	218181	1339419
Numunelerin artan sıcaklığa bağlı Minimum Anülüs Hızları (ft/dk)									
Sıcaklık (°F)	77	122	167	212	257	302			
J1	169,175	149,743	122,763	211,181	919,511	603,924			
J2	330,343	510,092	655,708	1107,36	14187,5	306875			
J3	148,042	156,235	109,545	285,13	639,266	767,531			
J4	165,073	182,467	130,276	327,541	757,686	783,607			
S1	79,0136	69,8875	55,3568	100,278	172,213	177,721			
Numunelerin ortam koşullarındaki Minimum Anülüs Hızları (ft/dk)									
Numuneler	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	S1
	71,984	175,7	57,42	70,063	139,48	64,338	128,773	183,333	29,863

S1 numunesinde $V_{a\rho m}K$ Çarpımı, 212 °F sıcaklığa kadar 400.000-500.000 civarında değerler olarak CCI değeri de 1 ve daha büyük olduğundan etkili bir şekilde kesinti taşınacaktır. 257 ve 302 (°F) sıcaklıklarında ise $V_{a\rho m}K$ Çarpımı 200.000 civarında, CCI değeri ise 0,5 civarında seyrederek kesintiler yuvarlak şekilli olup,

taşıyınları sırasında öğütölmeye uğrayacaklardır. Sıcaklık arttıkça kesinti taşıma kapasitesinde düşüş yaşandığı görölmüş ve etkin kuyu temizliği için gerekli minimum anölüs hızı 167 °F sıcaklıktan itibaren artmaya başlamıştır ancak 257 ve 302 (°F) sıcaklıklarında kabul görölen 100 ft/dk değerinin üstündedir.

YP/PV oranı değerlerinde göröldüğü gibi bütün numunelerde $V_{\rho m}K$ Çarpımı, 122 ve 167 (°F) sıcaklıklarında kimyasal aliterasyonlarını tamamlamış ve bu sıcaklıktan sonra ciddi bir düşüş görölmüştür. Kesinti taşıma kapasitesi YP/PV oranının artmasıyla artmaktadır (Hussaini ve Azar, 1983;Osgouei ve Altun, 2015b). Sonuçlardan göröldüğü üzere YP/PV oranları veya n değerleri kesinti taşıma kapasitesi sonuçlarıyla paralel bir değişim göstermektedir.

İyi bir kuyu temizliği için CCI değeri 1 veya daha büyük olması, $V_{\rho m}K$ Çarpımının ise 400.000 veya daha yüksek olması gerekmektedir. Bu koşulu en iyi sağlayan S1 numunesi olup 212 °F sıcaklıktan sonra CCI değeri 1'in altına düşmektedir. Bu durum bentonit çamurlarının 250 °F sıcaklıktan sonra etkinliklerini kaybettiklerini hatırlatmaktadır. S1 numunesi dışında hiçbir numunenin $V_{\rho m}K$ Çarpımı 400.000 veya daha yüksek ve CCI değeri 1 veya daha yüksek değer aldığı görölmemiştir. Aynı zamanda etkin kuyu temizliği için minimum anölüs hızı da en düşük olan S1 çamuru olmuştur ve 212 °F sıcaklığa kadar kabul görölen 100 ft/dk değerinin altındadır. Dolayısıyla kuyu temizliği için daha düşük debilerde çamur pompalanacak ve daha az enerji gerektireceğinden sondaj maliyeti azalacaktır. En düşük taşıma kapasitesi J2 numunesinde görölmüştür. En düşük sıcaklık olan 77 °F sıcaklıkta bile $V_{\rho m}K$ Çarpımı 100.000 civarında, CCI değeri ise 0,3 civarında seyretmiş ve gerekli kuyu temizliği yapılmayacaktır. Sıcaklık arttıkça kapasite daha da düşmüş, 302 °F sıcaklıkta $V_{\rho m}K$ Çarpımı 130 civarında olup, CCI değeri ise 0,0003 gibi çok küçük değerler almıştır. Sonuçlara bakıldığında artan sıcaklığa bağlı olarak taşıma kapasitelerinde düşüş olduğu görölmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çamur yapımında kullanılan suyun farklılığı sondaj çamurunun reolojik özelliklerini etkilemekte ve sıcaklık artışına karşı davranışını değiştirmektedir. Genel olarak jeotermal sularla hazırlanan çamurların sabit hızlardaki viskoziteleri ve akma noktaları saf sudan daha düşük olup özellikle 250 °F sıcaklıktan sonra düşük kayma hızlarında reoloji vermeyecek kadar bozulabilmektedirler. Yüksek sıcaklıkta sondaj yapabilmek, kararlı reolojik özelliklere sahip bir sondaj çamuru gerektirdiğinden, yüksek sıcaklık koşulunda jeotermal sulu bentonit çamurunun performansını artırmak için gereğinden fazla katkı maddeleri kullanılmak durumunda kalınacak, bu durum kuyu maliyetini arttırmakla birlikte, kullanılan katkı maddeleri zararlı olabilmekte ve kirlilik kaynağı olabilmektedir. Jeotermal sondajlarda su bazlı çamurların hazırlanmasında kullanılacak suların kimyasının göz önüne alınarak kuyuda kullanılması artan sıcaklığa karşı çamur ıslahında daha az katkı maddesi kullanılacak olup, maliyet ve çevresel açıdan yararlı olacaktır.

Saf sulu çamurların kayma hızıyla incelme etkinliği hem ortam sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıkta en iyi derecededir. Dolayısıyla saf sulu bentonit çamurlarında yüksek kayma hızlarının olduğu tıjlerde ve matkapta viskozite düşük olacağından, pompalama basınçlarını düşürecek ve ilerleme hızını arttıracaktır. Ayrıca düşük kayma hızlarının olduğu anülüste ise viskozite düşük değerler alıp, taşıma kapasitesini arttırarak kuyu temizliği sağlayacaktır. Sondaj operasyonunda kuyu temizleme önemli bir rol oynayarak, uygun olmayan kuyu temizliği, penetrasyon oranının düşmesi, tork ve sürtünmenin artması gibi problemlere ve boru yapışma potansiyelinde artışa neden olabilir. Jeotermal sulu bentonit çamurlarında kayma hızıyla incelme etkinliği daha az olup sıcaklığa bağlı olarak daha da azalma söz konusu olduğundan kuyu temizliğini ve sondaj ilerleme hızını olumsuz etkileyerek kuyu maliyetini doğrudan etkileyecektir.

Kayma hızının artmasıyla viskozitenin azalması saf su ve jeotermal sulu çamurların akış davranışını psedoplastik olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda reogramları Newtoniyen akışkanların orjinden geçip doğrusal devam etme özelliğinin en az birinden sapma gösterdiği için Non-Newtoniyen akışkanlar grubuna girmektedirler.

Jeotermal sulu çamurlar ile saf sulu çamurun sıvı kayıpları arasında belirgin olmamakla birlikte farklılık sözkonusudur. Jeotermal sulu çamurlar saf sulu çamurdan ortam sıcaklığında daha yüksek sıvı kayıpları vermektedirler. Bu durum filtrasyon ıslahı açısından yine gereğinden fazla katkı maddelerinin kullanılmasına ihtiyaç duyulacaktır. Sıcaklık artışı hem saf su hem de jeotermal sulu çamurların sıvı kayıplarının artmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda pH ve kek kalınlıkları yine çamur yapımında kullanılan suyun farklılığına bağlı olarak değişmektedir. Jeotermal sulu çamurlarda yine belirgin bir fark olmamakla birlikte ortam sıcaklığında en yüksek kek kalınlıkları elde edilmiştir. Bu durumda jeotermal sulu çamurların kullanılarak yapılan sondajlarda, saf su çamurlarına oranla, kuyu cidarında daha kalın filtrasyon keklerinin oluşması beklenecek ve bu da genellikle ciddi mekaniksel olarak boru yapışması, diferansiyel basınç yapışması ve kuyu hasar problemleri oluşma ihtimalini arttıracaktır.

Sondaj çamuru hazırlanmasında kullanılan farklı kimyasal içeriğe sahip suların yoğunluklarının aynı olduğu görüldüğünden ilerleme hızına ağırlık açısından herhangi bir şekilde etki etmemektedir.

Sondaj çamurunda kullanılan suyun farklılığı çamurların kayma hızı-kayma gerilimi ilişkisinin ifadesinde kullanılacak olan reolojik modeli etkilememektedir. Çalışılan tüm sıcaklıklar altında bütün numunelerin reogramını en iyi ifade eden Herschel-Bulkley modeli olup, tüm kayma hızı aralığında çamur davranışını daha doğru bir şekilde karakterize etmiştir. Ancak hesaplamaların karmaşıklığı nedeniyle bu model geniş olarak kabul görülmeyip endüstride çamur raporlarında reolojik değerler çoğunlukla Bingham plastik modeli parametrelerine göre verilmektedir. Hesaplanan/ölçülen değerlerde farklılık olması sondaj hidroliği tasarımını doğrudan etkileyeceği için kuyu stabilitesi sorunları yaşanabileceği gibi sondaj akışkanının en önemli görevlerinden birisi olan sondaj kesintilerinin kuyudan uzaklaştırılması görevini de yerine getirememesine, nihayetinde kuyunun terkine sebep olabilecektir. Dolayısıyla bu tür çamurlarla çalışılırken reogramını en iyi ifade eden modelin kullanılması ile sondaj sıvısının akış profili, viskozitesi, kuyu temizleme yeteneği, basınç kaybı, eşdeğer sirkülasyon yoğunluğu, kuyu hidroliği açısından spesifik olarak analiz edilmesinde daha sağlıklı sonuçlar elde edilerek sondaj operasyonunun başarısını arttırıp, toplam kuyu maliyetini azaltacaktır.

Artan sıcaklığa baęlı olarak hem jeotermal hem de saf sulu çamurların tařıma kapasiteleri dūřmektedir. Ancak saf sularla hazırlanan çamurların tařıma kapasitesi indeksleri hem ortam kořullarında hem de yūksək sıcaklık ve basınç kořullarında en iyi deęerleri almıřtır. Aynı zamanda saf sulu çamurların etkin kuyu temizlięi için gerekli minimum anūlū hızı jeotermal sulu çamurlardan daha dūřūktūr. Dolayısıyla jeotermal sulu çamurlar kullanılırken kuyu temizlięi için daha yūksək debilerde çamur pompalanacak ve daha fazla enerji gerektireceęinden sondaj maliyeti artacaktır. Ayrıca kayma hızıyla incelme etkinlikleri en iyi saf su çamurunda gūrūldūęunden jeotermal sulu çamurların ilerleme hızları daha dūřūk olacak ve yine sondaj maliyeti artmasına neden olacaktır.

Jeotermal sulu bentonit çamurları da tatlı su bazlı bentonit çamurları gibi özellikle dūřūk kayma hızlarında 250 ⁰F sıcaklıktan sonra stabil durumları bozulmaya bařlayarak yūksək sıcaklıktan ōtūrū flokūle olmaya bařlamaktadırlar. Çoęu zaman 250 ⁰F sıcaklıktan daha yūksək sıcaklıklarda yapılan jeotermal sondajlarda bentonit çamurlarına alternatif olarak yūksək sıcaklıklara dayanıklılıęı ortaya konmuř ve rezervi açısından dūnyada sayılı ūlkeler arasında olduęumuz sepiyolit temelli çamurlar kullanılabilir.

Jeotermal sulu çamurların saf su çamurlarına oranla sıcaklık artıřına karřı daha yūksək toleransı, kesinti tařıma kapasitesindeki daha dūřūk deęerler, etkin kuyu temizlięi için gereken daha yūksək minimum anūlū hızları, daha dūřūk kayma hızıyla incelme etkinlikleri ve ıslahı için gerekli daha fazla katkı maddesi gōz ōnūne alındıęında opratōrlerin maliyeti dūřūrmeđ adına sondaj mahalinin yakınında bulunan jeotermal suları kullanmaları sōz konusu faktōrler açısından maliyetin artmasına neden olduęundan bu uygulamanın yapılmaması gerektięi sonucuna varılabilmektedir.

KAYNAKLAR

- Adekomaya, O. A., (2013). Experimental analysis of the effect of magnesium saltwater influx on the behaviour of drilling fluids. **Journal of Petroleum Exploration and Production Technology**, 3(1), 61-67.
- Adekomaya, O. A. and Olafuyi, O. (2011). An Experimental Study of the Effect of Contaminants on the Flow Properties of Oil based Drilling Mud. **Petroleum & Coal**, 53(4), 315-319.
- Ajugwe, C. Oloro, J. and Akpotu, D., (2012). Determination of the rheological properties of Drilling fluid from locally source clay from various geographical areas. **Journal of Engineering Applied Science**, vol. 4.
- Akpabio, J. U., Inyang, P. N. and Iheaka, C. I. 2015. "The Effect of Drilling Mud Density on Penetration Rate" **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, Volume: 02 Issue: 09.
- Alderman, N. J., Gavignet, A., Guillot, D. and Maitland, G. C., (1988). High-temperature, high-pressure rheology of water-based muds. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Ali, K., Vipulanandan, C. and Richardson, D., (2013). Salt (NaCl) Contamination on the Resistivity and Plastic Viscosity of a Bentonite Drilling Mud. Proceedings of THC-IT Conference & Exhibition.
- Ali, M., S. and Al-Marhoun, M.A., (1999). The Effect of High Temperature High Pressure and Aging on Water Based Driling Fluid. **Paper SPE**, SPE-21613-MS
- Altun, G., Osgoue, A. E., Serpen, U. ve Çelik, M., (2011). Aktif Katı İle Kirlenmiş Sepiolit Çamurlarında Reoloji ve Su Kaybı Özelliklerinin Kontrolü. X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir. s: 163-174.
- Altun, G., Osgouei, A. E. ve Serpen, U., (2013). Su Bazlı Sepiolit Çamur Özelliklerinin Zorlu Sondaj Koşullarında Deneysel Olarak İncelenmesi. 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, s: 93-116.
- Alum, M. A. and Egbon, F., (2011). Semi-analytical models on the effect of drilling fluid properties on rate of penetration (ROP). In Nigeria Annual International Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Amani, M., Al-Jubouri, M. and Shadravan, A., (2012). Comparative study of using oil-based mud versus water-based mud in HPHT fields. **Advances in Petroleum Exploration and Development**, 4(2), 18-27.
- American Petroleum Institute, (2003). RP-13B-1. Recommended practice for field testing water-based drilling fluids, 3rd edition, Washington.
- American Petroleum Institute, (1979). API Specification for Oil Well Drilling Fluid Material. API Specifications 13A 7th Edition, Washington DC: American Petroleum Institute.
- American Petroleum Institute, (1980). API Standard Procedure for Testing Drilling Fluid. API RP 13B. 7th Edition. Washington DC: American Petroleum Institute.
- Amoco Production Company, (1994). Drilling Fluids Manual. six ed., pp. 426.

- Azar, J. J. and Robello Samuel, G., (2007). Drilling Engineering. **PennWell Books**, 486 sayfa.
- Bailey, W. J. and Weir, I. S., (1998). Investigation of methods for direct rheological model parameter estimation. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 21(1), 1-13.
- Barnes, H. A., Hutton, J. F. And Walters, K., (1989). An introduction to rheology. Vol. 3. Elsevier.
- Barnes, H. A., (1989) An Introduction to Rheology, Elsevier, Amsterdam - Lausanne - New York - Tokyo - Oxford.1270–1274. Trans AIME. 225.
- Barrett, M. L., (2011). Drilling Mud: A 20th Century History. International Symposium On The History Of The Oil Industry Marietta, Ohio, v. 12, no. 1, p. 161-168.
- Basirat, B., Vipulanandan, C. and Richardson, D., (2013).Effect of Salt Contamination on the Filtration Loss in 4% Bentonite Drilling Mud with Xanthan Gum. Proceedings of THC-IT Conference & Exhibition.
- Beck, F. E., Powell, J. W. and Zamora, M., (1995). The effect of rheology on rate of penetration. In SPE/IADC Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers.
- Bilgesu, H. I., Ali, M. W., Aminan, K. and Ameri, S., (2002). Computational fluid dynamics (CFD) as a tool to study cutting transport. In SPE Eastern Regional Meeting, Lexington.
- Bingham, E.C., (1916). An investigation of the laws of plastic flow. Paper 278, Scientific Papers of the Bureau of Standards, Vol. 13. Dept. of Commerce, Washington, DC, pp. 309–353.
- Black, A. D., Dearing, H. L. and DiBona, B. G., (1985). Effects of pore pressure and mud filtration on drilling rates in a permeable sandstone. **Journal of petroleum technology**, 37(09), 1-671.
- Blattel, S.R. and Rupert, J.P., (1982). Effect of weight material type on rate of penetration using dispersed and non-dispersed water-base muds. **SPE Paper** No. 10961, Annual Meeting, New Orleans, September.
- Bourgoyne, A. T., Millheim, K. K., Chenevert, M. E. and Young, F. S., (1991). Applied drilling engineering. **SPE Textbook Series**, Dallas, TX, 2.
- Bourgoyne, A. T., Millheim, K. K., Chenevert, M. E. and Young, F. S., (1986). Applied Drilling Engineering”, **SPE Textbook series**.
- Caenn, R. and Chillingar, G. V., (1996). Drilling fluids: State of the art. **journal of petroleum science and engineering**, 14(3-4), 221-230.
- Caenn, R., Darley, H. C. and Gray, G. R., (2011). Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids, 6th ed., USA: Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier.
- Cunningham, R. A. and Eenink, J. G., (1959). Laboratory study of effect of overburden, formation and mud column pressures on drilling rate of permeable formations. Society of Petroleum Engineers.
- Cunningham, R. A. and Goins, W. C., (1957). Laboratory drilling of Gulf Coast shales. In Drilling and Production Practice. American Petroleum Institute. Society of Petroleum Engineers.

- Curve fitting toolbox for use with MATLAB®: user's guide (2002). Version 1, (The Mathworks, Inc).
- Çelebi, N., (2009). Rheology. **Modern Farmasötik Teknoloji**, 391-405.
- Çetinel, T. (2008). Ara ve Ca bentonitlerin soda ve MgO ile aktivasyonu. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya.
- De Waele, A., (1923). Viscometry and plastometry. **J. Oil Color Chemists' Assoc.** 6 (38), 33–88.
- Denver Instrument Company, (2006), Electronic Analytical and Precision Balances Operating Instructions, Germany, s:107.
- Eckel, J. R., (1954). Effect of mud properties on drilling rate. In *Drilling and Production Practice*. American Petroleum Institute.
- Eckel, J. R., (1967). Microbit studies of the effect of fluid properties and hydraulics on drilling rate. **Journal of Petroleum Technology**, 19(04), 541-546.
- Emsap, W. J., Siepmann, J. and Paeratakul, O., (2002). Disperse Systems In Modern Pharmaceutics, ; Ed: Banker, GS, Rhodes, CT. Marcel Dekker, Inc. New York, 121, 260-261.
- Erkekol, S., (2005). Sondaj Akışkanları Teknolojisi Kursu (Lignosülfonat Çamuru), Tpaö Araştırma Merkezi Sondaj Teknolojisi Müdürlüğü, Ankara
- Estes, J. C., (1974). Guidelines for Selecting Rotary Insert Rock Bit. **Petroleum Engineer**, 30-34.
- Evans, B. and Gray, K. E., (1972). Effect of Bentonitic Fluid Properties On Drilling Rate. **Journal of Petroleum Technology**, 24(06), 657-662.
- Fann Instrument Company Instruction Manual, (2014). “High-Pressure, High-Temperature Filter Press” (Manual No: 209486), Houston, Texas, USA.
- Fann Instrument Company Instruction Manual, (2015). “Model 50SL Rheometer”, Houston, Texas, USA.
- Fann Instrument Company Instruction Manual, (2016). “Model 35 Viscometer”, Houston, Texas, USA.
- Farrow, F. D. and Lowe, G. M., (1923). XXIII.—The Flow of Starch Paste Through Capillary Tubes. **Journal of the Textile Institute Transactions**, 14(11), T414-T440.
- Finger, J. and Blankenship, D., (2010). Handbook of best practices for geothermal drilling. Sandia National Laboratories, Albuquerque.
- Fontenot, J. E., & Simpson, J. P. (1974). A Microbit Investigation of the Potential For Improving the Drilling Rate of Oil-Base Muds in Low-Permeability Rocks. **Journal of Petroleum Technology**, 26(05), 507-514.
- Gallino, G., Guarneri, A., Poli, G. and Xiao, L., (1996). Scleroglucan biopolymer enhances WBM performances. In SPE annual technical conference and exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Garnier, A. J., and Van Lingen, N. H., (1959). Phenomena affecting drilling rates at depth. Society of Petroleum Engineers.
- Geothermal Technical Working Paper, (2016). Produced Fluids, DOE/EE-1396.5. No. 5, June U.S. Department of Energy, Energy Efficiency&Renewable Energy.

- Ghassem Alaskari, M. K. and Nickdel Teymoori, R., (2007). Effects of salinity, PH and temperature on CMC polymer and XC polymer performance. **International Journal of Engineering**. Transactions B: Applications, 20(3), 283-290.
- Göktekin, A., (1983). Sondaj Tekniği. İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi, İstanbul, 438 sayfa.
- Gücüyener, I. H., (1983). A rheological model for drilling fluids and cement slurries. In Middle East Oil Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Hassiba, K. J. and Amani, M., (2012). Salinity effect on the rheological properties of drilling mud under high pressure and high temperatures of deep well. SPE Kuweyt International Petroleum Conference and Exhibition Held in Kuweyt City-Kuweyt. SPE 163315.
- Herschel, W.H. and Bulkley, R., (1926). Measurement of consistency as applied to rubber-benzene solutions. Proc. 29th Annual Meeting of the American Society of Testing Materials, 26 (82), 621-630.
- Homer V., White, M. M., Cochran, C. D. and Deily, F. H., (1957). "Microbit Dynamic Filtration Studies," TAIME, Vol. 210, 183.
- Hussaini, S. M. and Azar, J. J., (1983). Experimental study of drilled cuttings transport using common drilling muds. **Society of Petroleum Engineers Journal**, 23(01), 11-20.
- Fontenot, J. E. and Simpson, J. P., (1974). A Microbit Investigation of the Potential For Improving the Drilling Rate of Oil-Base Muds in Low-Permeability Rocks. **Journal of Petroleum Technology**, 26(05), 507-514.
- Inteq, B. H., (1995). Drilling Engineering Workbook-A Distributed Learning Course, 80270H Rev. B, December.
- Jha, P. K., Mahto, V. and Saxena, V. K., (2015). Effects of Carboxymethyl Cellulose and Tragacanth Gum on the Properties of Emulsion-Based Drilling Fluids. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, 93(9), 1577-1587.
- Joel, O. F., Ndubuisi, E. C. and Ikeh, L., (2012). Effect of cement contamination on some properties of drilling mud. In Nigeria Annual International Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Juhari, Y. and Isham, I., (1998) Managing Drilling Mud Weight Using Ilmenite. Paper Presented at the Faculty of Chemical and Natural resources Engineering Conference, Universiti Teknologi Malaysia (UTM), Johor, Bahru.
- Kelessidis, V.C. and Maglione, R., (2006b). Modeling rheological behavior of bentonite suspensions as Casson and Robertson-Stiff fluids using Newtonian and true shear rates in Couette viscometry. **Powder technology**, 168(3), 134-147.
- Kelessidis, V.C., Maglione, R., Tsamantaki, C. and Aspirtakis, Y., (2006a). Optimal determination of rheological parameters for Herschel-Bulkley drilling fluids and impact on pressure drop, velocity profiles and penetration rates during drilling. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 53(3), 203-224.
- Kok, M. V. and Alikaya, T., (2005). Effect of polymers on the rheological properties of KCl/polymer type drilling fluids. Energy Sources, 27(5), 405-415.

- Kök, V., M., (2004). Determination of rheological models for drilling fluids (a statistical approach). *Energy sources*, 26(2), 153-165.
- Lawhon, C. P. and Simpson, J. P., (1967). Laboratory Drilling Rate and Filtration Studies of Clay and Polymer Drilling Fluids. **Journal of Petroleum Technology**, 19(05), 688-694.
- Lee, J., Shadravan, A. and Young, S., (2012). Rheological properties of invert emulsion drilling fluid under extreme HPHT conditions. In IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Li, M. C., Wu, Q., Song, K., Lee, S., Jin, C., Ren, S. and Lei, T., (2015). Soy protein isolate as fluid loss additive in bentonite–water-based drilling fluids. **ACS applied materials & interfaces**, 7(44), 24799-24809.
- Lund, J. W. and Boyd, T. L., (2016). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. **Geothermics**, 60, 66-93.
- Mahto, V. and Jain, R., (2013). Effect Of Fly Ash On The Rheological And Filtration Properties Of Water Based Drilling Fluids. **International Journal of Research in Engineering and Technology**.
- Mahto, V. and Sharma, V. P., (2004). Rheological study of a water based oil well drilling fluid. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 45(1), 123-128.
- Martin A., (1993). Rheology. Physical Pharmacy (Fourth Ed),Eds: A Martin, P Rustamante, A C Chun, Lea&Febiger Philadelphia, 453-476.
- Maurer, W. C., (1962). The perfect-cleaning theory of rotary drilling. **Journal of Petroleum Technology**, 14(11), 1-270.
- Meng, X., Zhang, Y., Zhou, F. and Chu, P. K., (2012). Effects of carbon ash on rheological properties of water-based drilling fluids. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 100, 1-8.
- Merlo, A., Maglione, R. and Piatti, C., (1995). An innovative model for drilling fluid hydraulics. In SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference. Society of Petroleum Engineers.
- Mert, B.A. ve Avcı, E., (2017). Evaluation of the Environmental Impact of Geothermal Drilling Mud Wastes, International Congress on New Trends in Science, Engineering and Technology, Spain, pp: 153-161.
- Mertoğlu O., Şimşek, Ş. ve Başarır, N., (2015). Geothermal Country Update Report of Turkey (2010-2015), Proceedings World Geothermal Congress, Australia, p. 9. Paper No: 01046.
- Montgomery, M., (1985). Discussion of “the drilling mud dilemma—recent examples.” **J. Petrol. Technol.**1230.
- Murray, A. S. and Cunningham, R. A., (1955). Effect of mud column pressure on drilling rates. *Trans. AIME*, 204, 196-204.
- Nagre, R. D., Zhao, L. and Owusu, P. A., (2014). Thermosaline Resistant Acrylamide-Based Polyelectrolyte As Filtration Control Additive In Aqueous-Based Mud. **Petroleum & Coal**, 56(3), 222-230.
- Nguyen, Q. D. and Boger, D. V., (1992). Measuring the flow properties of yield stress fluids. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 24(1), 47-88.

- Nur, S., Dody, N. and Rejeki, H. S., (2005). Laboratory Study of High Temperature Additive to Rheology Properties of Drilling Mud under Dynamic Conditions. In Proceedings World Geothermal Congress.
- OFI Testing Equipment Instruction Manual, (2016). "Bench-Mount Filter Press With Hose and Regulator", Part No. 140-31, Inc. 11302 Steeplecrest Dr. · Houston, Texas · 77065 · U.S.A.
- OFI Testing Equipment Instruction Manual, (2014). "Metal Mud Balance (Machined Balance)", 4-Scale, 11302 Steeplecrest Dr. · Houston, Texas · 77065 · U.S.A.
- Onan, M. ve Müftüoğlu, Y.V., (1993). Gelik - 44 Sondajında Sondaj Parametreleri ve İlerleme Hızı İlişkilerinin Etüdü. Türkiye XIII. Madencilik Kongresi, s: 221-234.
- Osgouei, A. E. ve Altun, G., (2015). Kesinti Taşınımının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yaklaşımıyla Kestirimi. **Engineer & the Machinery Magazine**, 56(664).
- Osgouei, A. E., (2010). Controlling Rheological and Filtration Properties of Sepiolite Based Drilling Fluids under Elevated Temperatures and Pressures, İstanbul Teknik Üniversitesi, Master tezi.
- Osgouei, A. E., Altun, G. ve Serpen, U. (2015a). Sondaj Akışkanı Isıl Reolojik Özellikleri Üzerine Karşılaştırmalı Bir Çalışma: Klasik Viskometre Ve Isıl Reometre. Jeotermal Enerji Semineri, s: 213-223, İzmir.
- Ostwald, W. O., (1925). The velocity function of viscosity of disperse systems. *Kolloid Zeitschrift*, 36(99), 157.
- Özüdoğru S. ve Babür, E., (2001), Jeotermal Akışkan Üretim ve Re-Enjeksiyon Kuyuları", Jeotermal Enerji Doğrudan Isıtma Sistemleri: Temelleri ve Tasarımı, Sayfa: 35-124, MMO Yayın No: 270
- Özyol, F., (2015). Buca killerinin sondaj çamuru olarak kullanımının araştırılması, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Paiaman, A. M., Al-Askari, M. K. G., Salmani, B., Al-Anazi, B. D. and Masihi, M. (2009). Effect of Drilling Fluid Properties on Rate of Penetration. **NAFTA** 60 (3) 129-134.
- Rabia, H., (2001). Well Engineering & Construction, **Entrac Consulting**, p. 789.
- Raheem, A. M. and Vipulanandan, C., (2014). Effect of Salt Contamination on the Bentonite Drilling Mud Shear Strength and Electrical Resistivity. Proceedings of THC-IT Conference & Exhibition.
- Ramsey, M. S., Shipp, J. A., Lang, B. J., Black, A. and Curry, D., (1996). Cesium formate: Results and analysis of drilling with a new high density unweighted brine. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Rommetveit, R. and Bjorkevoll, K. S., (1997). Temperature and pressure effects on drilling fluid rheology and ECD in very deep wells. In SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference. Society of Petroleum Engineers.

- Ross, S. M., (2014). Introduction to probability and statistics for engineers and scientists. **Academic Press**. Fourth edition. Printed Canada. p:664. Elsevier.
- Rossi, S., Luckham, P. F., Zhu, S. and Briscoe, B. J., (1999). High-pressure/high-temperature rheology of Na⁺-montmorillonite clay suspensions. In SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. Society of Petroleum Engineers.
- Rupert, J. P., Padro, C. W., and Blattel, S. R., (1981). The Effects of Weight Material Type and Mud Formulation on Penetration Rate Using Invert Oil Systems. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Sami, N. A., (2016). Effect of magnesium salt contamination on the behavior of drilling fluids. **Egyptian Journal of Petroleum**, 25(4), 453-458.
- Santoyo, E., Santoyo-Gutierrez, S., García, A., Espinosa, G. and Moya, S. L., (2001). Rheological property measurement of drilling fluids used in geothermal wells. *Applied Thermal Engineering*, 21(3), 283-302.
- Scharf, A.D. and Watts, R.D., (1984). Itabirite: an alternative weighting material for heavy oil base muds. SPE Paper No. 13159, Annual Meeting, Houston, Sept. 16–19.
- Scheaffer, R. L. and J. T. McClave., (1995). *Probability and Statistics for Engineers*. Belmont, CA: Duxbury Press.
- Schott H., (2000). *Rheology. Remington: The Science and Practice of Pharmacy*, (20th Ed), Lippincott Williams & Wilkins, Baltimore, Maryland. s. 335-355.
- Serpen, U., (2005). “Jeotermal Sondajların Özellikleri ve Kullanılan Donanımlar”, Jeotermal Enerji Semineri, s: 55-66. İzmir, (mmo yayın no : E/2005/393-2).
- Simpson, J. P., (1985). The Drilling Mud Dilemma Recent Examples (includes associated papers 14481 and 14527). **Journal of petroleum technology**, 37(02), 201-206.
- Skalle, P., (2011) “Drilling Fluid Engineering”, Bookboon, 159 s.
- Şimşek, Ş., (1985). Geothermal Model of Denizli, Sarayköy - Buldan Area, *Geothermics*, 14(2/3), 393-417.
- TPAO (Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı), 2007. Sondaj Akışkanları Teknolojisi, Araştırma Merkezi Daire Başkanlığı, Sondaj Teknolojisi Müdürlüğü, Ankara.
- Trimble, G. A. and Nelson Jr, M. D., (1960). Use of Inverted-Emulsion Mud Proves Successful in Zones Susceptible to Water Damage. **Journal of Petroleum Technology**, 12(02), 23-30.
- U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, (2016). Geothermal Technical Working Paper, Produced Fluids No. 5, pp. 111.
- Van Lingen, N.H., (1962). Bottom scavenging—a major factor governing penetration rates at depth. **J. Petrol. Technol.**, 187–196. Trans AIME. 225.
- Vidrine, D. J. and Benit, E. J., (1968). Field verification of the effect of differential pressure on drilling rate. **Journal of Petroleum Technology**, 20(07), 676-682.

- Viloria Ochoa, M., (2006). Analysis of drilling fluid rheology and tool joint effect to reduce errors in hydraulics calculations (Doctoral dissertation, Texas A&M University).
- Vipulanandan, C. and Mohammed, A. S., (2014). Hyperbolic rheological model with shear stress limit for acrylamide polymer modified bentonite drilling muds. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 122, 38-47.
- Weir, I. S. and Bailey, W. J., (1996). A statistical study of rheological models for drilling fluids. **SPE Journal**, 1(04), 473-486.
- Wu, Y. M., Zhang, B. Q., Wu, T. and Zhang, C. G., (2001). Properties of the forpolymer of N-vinylpyrrolidone with itaconic acid, acrylamide and 2-acrylamido-2-methyl-1-propane sulfonic acid as a fluid-loss reducer for drilling fluid at high temperatures. **Colloid & Polymer Science**, 279(9), 836-842.
- Young Jr., F.S. and Gray, K.E., (1967). Dynamic filtration during microbit drilling. **J. Petrol. Technol.** 19(9), 1209–1224. Trans AIME 240.
- Yünsel, T. Y., (2001). Rotary (Döner) Sondajlarda Matkap Çalışma ve Kaya Parametrelerinin İlerleme Hızı Üzerine Etkileri. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi. Adana.

ÖZGEÇMİŞ

Yazar 1990 yılında Batman'da doğdu. İlkokul, ortaokul ve lise eğitimini Antalya'da tamamladı. 2010 yılında Mustafa Kemal Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümünü kazanarak, 2014 yılında mezun oldu. Aynı yıl Mustafa Kemal Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Bekar ve İngilizce bilmekte olup, İskenderun Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya devam etmektedir.

