

**KAYAÇ ISLATIMLILIĞININ KILCAL TÜP YÜKSELİM
YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Celal Hakan CANBAZ

Anabilim Dalı: Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği
Programı: Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. H. Özgür YILDIZ
Eş Danışman: Yrd. Doç. Dr. Şenol YAMANLAR

HAZİRAN 2008

**KAYAÇ ISLATIMLILIĞININ KILCAL TÜP YÜKSELİM
YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Celal Hakan CANBAZ**

Anabilim Dalı: PETROL VE DOĞAL GAZ MÜHENDİSLİĞİ

Programı: PETROL VE DOĞAL GAZ MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. H. Özgür YILDIZ
Eş Danışman : Yrd. Doç. Dr. Şenol YAMANLAR
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Mustafa ONUR
Jüri üyesi : Prof. Dr. Mehmet Sabri ÇELİK
Jüri üyesi : Prof. Dr. Ali Ayhan SİRKECİ

HAZİRAN 2008

İSTANBUL TEKNİK UNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KAYAÇ ISLATIMLILIĞININ KILCAL TÜP YÜKSELİM
YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Celal Hakan CANBAZ
505051501**

Anabilim Dalı: Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği

Programı: Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. H. Özgür YILDIZ

Eş Danışman: Yrd. Doç. Dr. Şenol YAMANLAR

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Petrol endüstrisinde yaygın olarak kullanılan önemli bir parametre olan kayaç ıslatımlılığının saptanmasına alternatif bir yöntem sunularak daha az zaman ve maliyetle tespit edilmesine olanak tanıyabileceğine inandığım bu çalışmada, araştırılan konuyu öneren, çalışma süresince beni yönlendiren ve ayrıca yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışmanlarım Doç. Dr. H. Özgür Yıldız ve Yrd. Doç. Dr. Şenol Yamanlar'a teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Ayrıca, çalışmalarım sırasında bilgi alışverişinde bulunduğum ve görüşlerini aldığım sayın jüri üyelerim Prof. Dr. Ayhan A. Sirkeci, Prof. Dr. Mehmet Sabri Çelik ve Prof. Dr. Mustafa Onur'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tüm üniversite hayatım boyunca büyük bir özveri ile bana bilgilerini aktaran ve yardımlarını esirgemeyen tüm değerli hocalarıma, çalışmalarım sırasındaki yardımlarından dolayı değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Fatma Bahar Hoşgör ve Uzman Eda Ay'a ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen diğer araştırma görevlisi arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve yüksek lisans yapmam için beni teşvik eden sevgili aileme ve nişanlım Ebru Günister'e üzerimdeki emeklerinden dolayı en içten saygılarımı sunar ve teşekkürlerimi iletirim.

Haziran 2008

Celal Hakan CANBAZ

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	6
2.1. Islatımlılık	6
2.2. Ara Yüzey Gerilimi	7
2.3. Temas Açısı	8
2.3.1. Hava-Sıvı-Katı Sistemi için Temas Açısı Belirlenmesi	8
2.3.2. Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi için Temas Açısı Belirlenmesi	9
2.4. Kılcal Basınç	10
2.4.1. Plateau Eşitliği	12
2.4.2. Leverett Yaklaşımı	15
2.5. Kılcal Yükselim ve Washburn Eşitliği	15
2.6. Islatımlılık Ölçüm Yöntemleri	20
2.6.1. Doğrudan Temas Açısı Ölçüm Yöntemi	20
2.6.2. Amott Islatımlılık İndeksi	21
2.6.3. USBM Islatımlılık İndeksi	22
2.6.4. İnce Tabaka Yükselim(Thin Layer Wicking) Yöntemi	24
2.6.5. Kılcal Tüp Yükselim Yöntemi	25
3. DENEYSEL YÖNTEM	27
3.1. Ön Çalışmalar	27
3.1.1. Toz Numunelerin Hazırlanması	27
2.2.3.1. Yüzey Kayaçlarının Hazırlanması	27

2.2.3.2. Rezervuar Kayaçlarının Hazırlanması	27
3.1.2. Akma Ölçümleri	29
3.1.3. Yüzey ve Ara Yüzey Gerilimi Ölçümleri	30
3.2. Malzemeler	32
3.2.1. Katı Örnekler	32
3.2.2. Islatım Sıvıları	33
3.3. Kullanılan Donanımlar	34
3.3.1. Kılcal Tüp	35
3.3.2. Toz Islatımlılığı Ölçüm Aleti (Sigma 701)	36
3.3.3. Hassas Teraziler	37
3.4. Yöntem	37
3.4.1. Deney Öncesi Kılcal Tüpün Hazırlanması	37
3.4.1.1. Kılcal Tüpün Temizlenmesi	38
3.4.1.2. Filtre Kağıdının Tüp İçerisine Yerleştirilmesi	39
3.4.1.3. Toz Numunelerin Kılcal Tüpe Yerleştirilmesi	39
3.4.1.4. Paketleme İşlemi	39
3.4.2. Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü	39
3.4.2.1. C Sabitinin Belirlenmesi	41
3.4.2.2. Temas Açısı Saptanması	41
3.5. Hesaplamalar	42
3.5.1. Temas Açısının Hesaplanması	42
3.5.1.1. Hava-Sıvı-Katı Ara Yüzeyi için Hesaplamalar	42
3.5.1.2. Sıvı-Sıvı-Katı Ara Yüzeyi için Hesaplamalar	46
4. DENEYSEL VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ	48
4.1. Kuvars Örneği Sonuçları	48
4.2. Kalsit Örneği Sonuçları	50
4.3. Bentheim Örneği Sonuçları	52
4.4. Berea Örneği Sonuçları	53
4.5. BL_22_10 (Bilecik-Bayırköy) Örneği Sonuçları	55
4.6. A4_6 (Bilecik-Bayırköy) Örneği Sonuçları	57
4.7. C2_2 (Bilecik-Bayırköy) Örneği Sonuçları	59
4.8. Bilecik Şişecam (Bilecik-Bayırköy) Örneği Sonuçları	60
4.9. K-232 (Karbonatlı Kayaç) Örneği Sonuçları	62

4.10. K-570 (Karbonatlı Kayaç) Örneği Sonuçları	64
4.11. K-711 (Karbonatlı Kayaç) Örneği Sonuçları	65
4.12. K-859 (Karbonatlı Kayaç) Örneği Sonuçları	67
4.13. K-502 (Karbonatlı Kayaç) Örneği Sonuçları	69
4.14. Binagadi Örneği Sonuçları	71
4.15. Sonuçların Değerlendirilmesi ve Literatür Değerleri ile Karşılaştırılması	73
5. SONUÇLAR	77
6. ÖNERİLER	78
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	83

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1 Cannon Fenske Akmazlık Ölçerinin Akmazlık Aralıkları.	30
Tablo 3.2 Islatım Sıvılarının Yoğunluk ve Akmazlık Değerleri.	33
Tablo 3.3 Islatım Sıvılarının Yüzey ve Ara Yüzey Gerilimi Değerleri.	34
Tablo 3.4 BL-22-10 Bilecik Örneğinin Mineralojik Kompozisyonu..	42
Tablo 3.5 BL-22-10 Örneğinin farklı ıslatım sıvılarına göre temas açısı değerleri.	46
Tablo 3.6 BL-22-10 Örneğinin sıvı-sıvı-katı sistemine göre hesaplanan temas açısı değerleri.	47
Tablo 4.1 Kuvars Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	48
Tablo 4.2 Kuvars Örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	49
Tablo 4.3 Kalsit Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	50
Tablo 4.4 Kalsit Örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	51
Tablo 4.5 Bentheim Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Temas Açısı Değerleri.	52
Tablo 4.6 Bentheim Örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	52
Tablo 4.7 Berea Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	54
Tablo 4.8 Berea Örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	55
Tablo 4.9 BL_22_10 Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	55
Tablo 4.10 BL_22_10 Örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	56
Tablo 4.11 A4_6 Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	57
Tablo 4.12 A4_6 Örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	58

Tablo 4.13	C2_2 Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	59
Tablo 4.14	C2_2 Örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	60
Tablo 4.15	Bilecik_Şişecam Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	61
Tablo 4.16	Bilecik_Şişecam Örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	62
Tablo 4.17	K-232 Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	63
Tablo 4.18	K-232 Örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	63
Tablo 4.19	K-570 Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	65
Tablo 4.20	K-570 Örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	65
Tablo 4.21	K-711 Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	66
Tablo 4.22	K-711 Örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	67
Tablo 4.23	K-859 Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	68
Tablo 4.24	K-859 Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	69
Tablo 4.25	K-502 Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	70
Tablo 4.26	K-502 Örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	71
Tablo 4.27	Binagadi Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	72
Tablo 4.28	Binagadi Örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.	73
Tablo 4.29	Kuvars ve Kalsit Numuneleri için Literatürdeki Mevcut Temas Açısı Değerleri.	73
Tablo 4.30	Öztorun'un çalışmasında elde edilen Sıvı-Sıvı-Katı sistemi temas açısı değerleri (2006).	75

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Islatımlılık Derecelendirmesi (Morrow, 1990).	2
Şekil 1.2 : Su ıslatımlı ve petrol ıslatımlı kayacın şematik gösterimi (Cuiec,1991) .	3
Şekil 2.1 : Su ıslatımlı ve petrol ıslatımlı yüzeylerin iki karışmaz akışkan varlığındaki davranışları.	7
Şekil 2.2 : Katı-sıvı-buhar ara yüzeyi için temas açısı.	9
Şekil 2.3 : Su/petrol/kayaç üçlüsünün doğrudan temas açısı yöntemi kullanılarak elde edilen çeşitli ıslatımlılık durumları.	11
Şekil 2.4 : İki karışmaz akışkanın ara yüzeyinin eğrisellik yarıçapının yüzey alanı artışı ile değişimi.	13
Şekil 2.5 : Su ıslatımlı kılcal tüp içerisinde suyun kılcal yükselimi.	15
Şekil 2.6 : Farklı ıslatımlılık davranışına sahip kılcal tüplerin iki karışmaz akışkan varlığında temas açıları.	17
Şekil 2.7 : AMOTT ıslatımlılık indeksi grafiği.	22
Şekil 2.8 : USBM ıslatımlılık indeksi grafiği.	24
Şekil 3.1 : Ayrıştırma İşlemi için Kullanılan Cam Sokslet.	28
Şekil 3.2 : Cannon Fenske Akmazlık Ölçeri.	29
Şekil 3.3 : Du Nouy Halkası.	31
Şekil 3.4 : Du Nouy Halkası Yöntemi ile Yüzey Gerilimi Ölçüm İşlemi.	32
Şekil 3.5 : Kılcal Tüp Mekanizması.	35
Şekil 3.6 : Toz ıslatımlılığı Ölçüm Aleti.	36
Şekil 3.7 : Kılcal Tüpün Hazırlanması.	38
Şekil 3.8 : SGSERVER Yazılımı.	40
Şekil 3.9 : Hava-Gazyağı-Kayaç Sisteminde BL-22-10 Numunesi için Temas Açısının Saptanması.	44
Şekil 3.10 : BL-22-10 Numunesinin Farklı ıslatım Sıvıları ile Kılcal Tüp Yükselim Grafikleri.	45
Şekil 4.1 : Kuvars Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.	49
Şekil 4.2 : Kalsit Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.	51
Şekil 4.3 : Bentheim Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.	53
Şekil 4.4 : Berea Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.	54

Şekil 4.5	: BL_22_10 Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.	56
Şekil 4.6	: A4_6 Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.	58
Şekil 4.7	: C2_2 Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.	59
Şekil 4.8	: Bilecik_Şişecam Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları. .	61
Şekil 4.9	: K-232 Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.	62
Şekil 4.10	: K-570 Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları	64
Şekil 4.11	: K-711 Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.	66
Şekil 4.12	: K-859 Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.	68
Şekil 4.13	: K-502 Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.	70
Şekil 4.14	: Binagadi Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.	72
Şekil 4.15	: Çalışmadan Elde Edilen Kuvars (a) ve Kalsit (b) Örnekleri Verilerinin Literatür Değerleri ile Kıyaslanması.	74
Şekil 4.16	: Gazyağı (a) ve Mineral Yağ (b) için çalışmadan elde edilen sıvı-sıvı- katı sistemi ıslatımlılık bantlarının Özturun, 2006 değerleri ile kıyaslanması.	75

SEMBOL LİSTESİ

A_1	: Grafiğin yer değiştirme eğrisi altında kalan alanı
A_2	: Grafiğin drenaj eğrisi altında kalan alanı
B	: Sıvının kaldırma kuvvetinden kaynaklanan kuvvet, $g \text{ cm/s}^2$
C	: Kayaca göre değişen materyal sabiti
F_Z	: Ara yüzey geriliminin dikey bileşeni, $g \text{ cm/s}^2$
h	: Kılcal yükseklik, cm
I_w	: Suya göre Amott ıslatımlılık indeksi
K	: Kılcal yatağın tortozite faktörü
l	: Toz yüzeydeki sıvı yüksekliği, cm
m	: Partikül yatağı tarafından emilen sıvı kütlesi, g
M_w	: Islatan fazın aşağıya doğru etkiyen ağırlığı, gr
N_{USBM}	: USBM ıslatımlılık indeks değeri
l_1, l_2	: Kılcal eğrinin kenarları, cm
P_c	: Kılcal basınç, dyn/cm^2
P_c^{wo}	: Su ve petrol fazları arasındaki kılcal basınç, dyn/cm^2
P_{nw}	: Islatmayan fazın basıncı, dyn/cm^2
P_w	: Islatan fazın basıncı, dyn/cm^2
r_c	: Kılcal tüpün yarıçapı, cm
r_h	: Etkin kılcal yarıçap, cm
r^*	: Etkin gözenek yarıçapı, cm
R_1	: Merkezden kılcal eğri l_1 kenarına olan uzaklık, cm
R_2	: Merkezden kılcal eğri l_2 kenarına olan uzaklık, cm
R_{ka}	: Küresel ara yüzeyin yarıçapı, cm
R_s	: Ara yüzeyin yarıçapı, cm
S_v	: Özgül yüzey alanı, cm^2
S_{wi}	: İlk su doymuşluğu değeri
u	: Partikül yatağında meydana gelen akış hızı, cm/s
V_{osp}	: Kılcal emme ile yer değiştirmiş petrol miktarı, cm^3
V_{wsp}	: Kılcal emme ile yer değiştirmiş su miktarı, cm^3
V_{ot}	: Yer değiştirmiş olan toplam petrol miktarı, cm^3

V_{wt}	: Yer değiştirmiş olan toplam su miktarı, cm^3
dV	: Sıvının nüfuz veya ilerleme hızı, cm/s
W	: İzotermal durumda yapılması gereken iş, Nm
dz	: Kılcal genişleme miktarı, cm
ΔP	: Basınç değişimi, dyn/cm^2
ϕ	: Partikül yatağı gözenekliliği
δ_o	: Petrolle yer değiştirme oranı
δ_w	: Su ile yer değiştirme oranı
γ	: Yüzey gerilimi, dyn/cm
γ_{os}	: Petrol ile kayaç arasındaki yüzey gerilimi, dyn/cm
γ_{ws}	: Su ve kayaç arasındaki yüzey gerilimi, dyn/cm
γ_{wo}	: Su ve petrol arasındaki ara yüzey gerilimi, dyn/cm
γ_A	: Adhezyon gerilimi, dyn/cm
γ_{LV}	: Sıvı-hava arasındaki yüzey gerilimi, dyn/cm
γ_{SL}	: Katı ile sıvı arasındaki ara yüzey gerilimi, dyn/cm
γ_{SV}	: Katı ile hava arasındaki yüzey gerilimi, dyn/cm
$\gamma_{L_2L_1}$: İki karışmaz akışkan arasındaki ara yüzey gerilimi, dyn/cm
$\gamma_{SL_1}, \gamma_{SL_2}$: İki karışmaz akışkanın katı yüzey ile olan ara yüzey gerilimleri, dyn/cm
μ	: Akmaçlık, cp
ρ	: Sıvının yoğunluğu, g/cm^3
$(\rho g)_w$: Suyun birim hacimdeki ağırlığı, g/cm^2s^2
$(\rho g)_o$: Petrolün birim hacimdeki ağırlığı, g/cm^2s^2
θ	: Temas açısı, $^\circ$
θ_1, θ_2	: Hava-sıvı-kayaç sisteminde sıvının temas açısı, $^\circ$
θ_{12}	: İki karışmaz akışkan arasındaki temas açısı, $^\circ$

KAYAÇ ISLATIMLILIĞININ KILCAL TÜP YÜKSELİM YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ

ÖZET

Bu yüksek lisans laboratuvar çalışmasında amaç, heterojen yapıdaki kayaların ıslatımlılıklarının kılcal tüp yükselim yöntemi kullanılarak temas açısı cinsinden saptanmasıdır. Ayrıca, çalışmada dinamik temas açısı ölçümünde kullanılan Washburn denklemi ve bu denklemin kılcal tüp yükselim yöntemine uygunluğu incelenmiştir.

Heterojen mineralojik yapıya sahip kayaç örneklerinin ıslatımlılık karakterlerinin analizini esas alan bu çalışmada, katı malzeme olarak, öğütülerek toz haline getirilmiş çeşitli kumtaşı ve kireçtaşı kayaç örnekleri ve bu örnekleri oluşturan temel saf maddeler olan kuvars ve kalsit mineralleri kullanılmıştır. Bununla birlikte, kılcal tüpte yükselme sıvısı olarak su fazını temsil eden saf su, %2'lik NaCl, KCl, CaCl₂, AlCl₃ tuzlu su çözeltileri ile petrol fazını temsil eden gazyağı ve mineral yağ sıvıları kullanılarak, bu sıvıların numunelerin katı yüzeylerinde oluşturdukları temas açıları hesaplanmıştır. Ayrıca; bu çalışmada, kılcal yükselim yönteminin toz haline getirilmiş saf mineraller ile heterojen yapıdaki kayaç örneklerine uygulanabilirliği ve bu örneklerin ıslatımlılıkları ile temas açıları arasındaki ilişki araştırılmıştır.

Elde edilen temas açısı değerleri, literatürde daha önce yapılmış olan goniometrik ve ince tabaka kılcal yükselim yöntemlerinin temas açısı değerleri ile uyum içerisindedir. Kılcal Tüp Yükselim Yöntemi, sıvı-sıvı-katı sistemlerinin temas açısı değerlerinin saptanmasında kullanılacak alternatif bir yöntemdir.

DETERMINATION OF ROCK WETTABILITY BY USING CAPILLARY RISE METHOD

SUMMARY

This study is an attempt to investigate the possibility of contact angle determination of wettability of heterogeneous rock matrix by capillary rise method applying the principle of contact angle. Application of the Washburn equation for dynamic measurement of contact angle and the method of Capillary Rise is revisited.

The powdered samples of different sandstone and limestone rock samples and also their representative pure minerals such as quartz and calcite were used in this experimental work that was based on characterizing the wettability index of rocks with having heterogeneous mineralogical composition. Beside this, distilled water, 2% NaCl, KCl, CaCl₂ and AlCl₃ brines were used as a water phase, kerosene and mineral oil are used as an oil phase of wicking liquids, and contact angles of these liquids with respect to the solid sample surfaces were determined. Moreover, applicability of the Capillary rise method for contact angle determination of the heterogeneous rock samples and the relationship between wettability and the contact angle of these samples were discussed.

The obtained contact angle values represent very good correlations with the literature values using goniometric and Thin Layer Wicking methods. The Capillary Rise Method can be considered as an alternative method to estimate the contact angle values of liquid-liquid-solid systems.

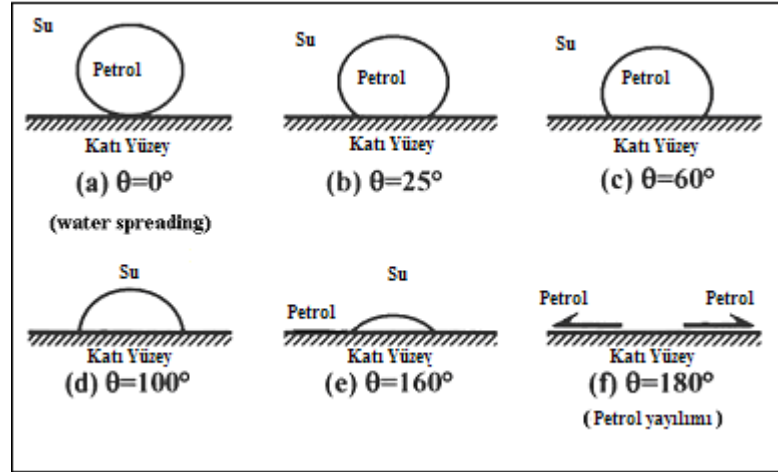
1. GİRİŞ

Gözenekli ortamdan petrol üretimi, çift faz durumunda petrolün rezervuarda mevcut olan diğer akışkanlar ile yer değiştirmesi sonucunda gerçekleşir. Gözenekli kayaçlarda iki karışmaz akışkanın sınır parametresi olan ara yüzey kavramı, süpürülen bölgeden üretim kuyusuna doğru taşınan petrol miktarını ve dolayısı ile üretimini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Gözenekli ortamda yer değiştirme ile üretim arttırma üzerine yapılan ayrıntılı çalışmalar yaklaşık 90 yıl kadar önce mikroskobik öteleme performansı kavramının incelenmesi ile başlamıştır. Mikroskobik öteleme performansı, kayaç gözenek geometrisi ile arayüzey sınır koşullarının ilişkileri ile tanımlanır. Bu ilişkiler rezervuar ıslatımlılığı kavramını oluşturur (Morrow, 1991).

Gözenekli ortamda akışkan dağılımı sadece akışkanların arayüzeyleri arasındaki kuvvetlerden değil, akışkan/katı arasındaki yüzey kuvvetlerinden de etkilenir. Islatımlılık, rezervuarda akışkan dağılımını, akışkanın konumunu ve akışını etkileyen önemli bir faktördür. Ayrıca ıslatımlılık enjeksiyon sonrası rezervuarda akışkanın yayılması, kılcal basınç, su öteleme davranışı, görelî geçirgenlik, üçüncül üretim performansı, indirgenemez su ve petrol doymuşlukları ve elektriksel özellikler gibi karot analizlerinde güçlü bir etkiye sahiptir (Anderson, 1986a). Bir kayacın ıslatımlılığı, kayaç yüzeyinin su ve petrole olan ilgisine bağlıdır. Daha genel bir deyişle, ıslatımlılık katı yüzeyin sistemdeki akışkanlardan birini diğerine kendi yüzeyini kaplayabilmesi için tercih etmesidir (Craig, 1971). Rezervuar kayaçları karmaşık gözenek ve mineral yapısına sahip olduğundan dolayı ölçülen ıslatımlılık kayaç yüzeyini oluşturan minerallerin ortalama ıslatımlılığı olarak tanımlanır.

Geçmişte, petrol rezervuarlarının genel olarak kuvvetli su ıslatımlı olduğu varsayılıyordu. Bunun sebebi, petrolün rezervuara göç etmeden önce gözenekli ortamın formasyon suyu ile dolu olduğunun düşünülmesiydi. Ancak, 1940'lı yılların başında petrolün de kumtaşı (Bartell ve Miller, 1928) ve silis (Benner ve Bartell, 1942) yüzeyini

ıslatabildiği görüldü. Islatımlılık ölçümlerinde kullanılan farklı yöntemler olmakla birlikte, bunların petrol endüstrisi tarafından en çok tercih edilenleri Amott, USBM (United States Bureau of Mines) ve kontak açısı yöntemleridir. Amott ve USBM yöntemleri düzgün kesilmiş karotlar haline getirilmiş kayacın ortalama ıslatımlılığının ölçülebilmesine olanak tanır. Bununla birlikte, saf sıvılar ve düz, pürüzsüz ve cilalanmış karotlar söz konusu olduğunda doğrudan temas açısı yöntemi en iyi ıslatımlılık ölçüm yöntemidir (Anderson, 1986b). Temas açısı ölçümü bir sıvının başka bir karışmaz akışkan varlığında katı yüzeyi ıslatma eğilimini belirlemeye yarar. Eğer bir sıvı damlacığı tamamen düz katı bir yüzey ile temas halinde ise, temas açısı üç farklı durumda gözlenebilir. Eğer kontak açısı 90° den küçük ise; sıvı, katı yüzeyi ıslatır, 90° den büyük olduğu durumda ise, damla yuvarlak bir hal alarak yüzeyi ıslatmaz. Bununla birlikte, temas açısının 90° civarında olması katının nötral yada ara ıslatımlı olduğu anlamına gelir. Şekil 1.1'de verilen su/petrol/kayaç sistemi göz önüne alındığında, sistemin temas açısı, θ , 0° ile 60° - 75° arasında ise sistem su ıslatımlı, eğer θ , 105° ile 120° değerleri ile 180° arasında ise petrol ıslatımlı olarak tanımlanır (Anderson, 1986b).



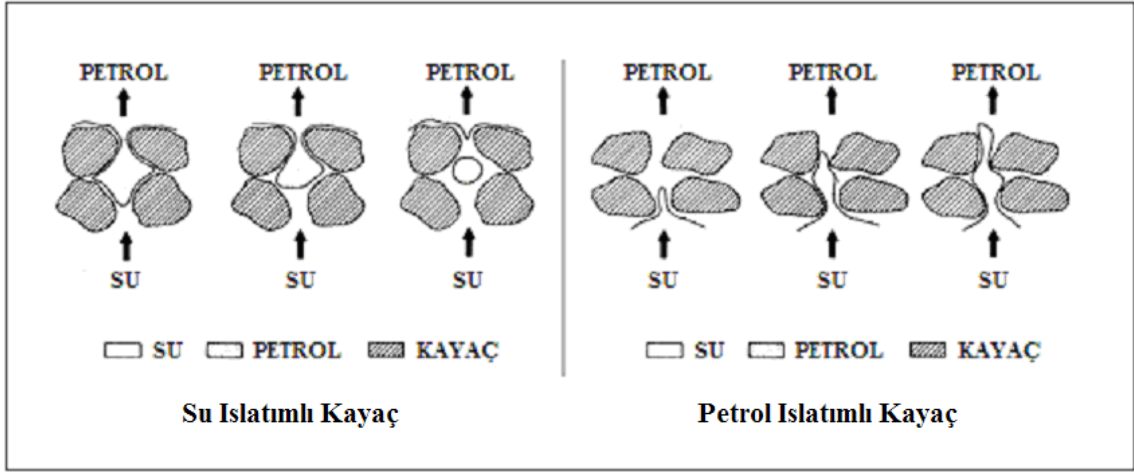
Şekil 1.1 : Islatımlılık Derecelendirmesi (Morrow, 1990)

- a) Tamamen Su Islatımlı b) Kuvvetli Su ıslatımlı c) Su Islatımlı
d) Petrol Islatımlı e) Kuvvetli Petrol Islatımlı f) Tamamen Petrol Islatımlı

Bazı araştırmacılar ıslatımlılık tiplerinin ayrımı için kesin sınırlar koymuşlardır. Örneğin, Treiber ve diğ. (1972) kesim noktalarını 75° ve 105° olarak kullanırken,

Morrow (1976) 62° ile 133°, Chilingar ve Yen (1983) ise 80° ile 100° arasında kullanmışlardır (Cuiec, 1991).

Ara ıslatımlılık (Marsden ve Nikias, 1962), kesirsel ıslatımlılık (Fatt ve Klikoff, 1959; Iwankow, 1960) ya da heterojen ıslatımlılık (Brown ve Fatt, 1956), karışık ıslatımlılık (Salathiel, 1973) ve benekli ıslatımlılık (Morrow ve diğ., 1986) terimleri kuvvetli su ıslatımlı ya da petrol ıslatımlı terimleri kadar sade kavramlar olmamakla birlikte ıslatım koşullarını tanımlamak için kullanılmışlardır (Jadhunandan, 1990; Gökmen, 2003). Eğer kayaç kuvvetli hidrofilik (suyu seven) bir yapıya sahipse, su katı yüzeyi ıslatarak küçük gözenekleri işgal edecektir. Eğer kayaç kuvvetli oleofilik (petrolü seven) yapıda ise, petrol kayaç yüzeyini ıslatacağından, su, Şekil 1.2’de görüldüğü gibi büyük gözeneklerin orta kısımlarında toplanacaktır (Cuiec, 1991).



Şekil 1.2 : Su ıslatımlı ve Petrol ıslatımlı Kayaçın Şematik Gösterimi (Cuiec, 1991)

Temas açısı, katının ıslatım davranışını tanımlar, başka bir deyişle yüzeyin suyu sevip sevmediğinin bir ölçüsüdür. Temas açısı arttıkça katı yüzeyin daha hidrofobik (suyu sevmeyen) bir yapıda olduğu anlaşılır.

Bazı durumlarda doğrudan temas açısı ölçümleri ile temas açısını saptayabilmek kolay değildir. Örneğin, gaz fazından gelen herhangi ufak bir kir yada pisliğin damlacık ile temas haline geçtiği durumlarda temas açısı değerlerinde azalmalar gözlenebilir. Bunun yanında yüzeyin pürüzlülüğü temas açısını değiştirebilir. θ değeri 90° den küçük olduğu zaman pürüzlülük temas açısında azalmaya yol açarken, 90° den büyük olduğu

durumlarda temas açısının artmasına neden olduğu görülür. Bununla birlikte kontak açısı ölçümlerinde, ilerlemeli ve geriye doğru ölçülen temas açısı değerlerindeki farktan kaynaklanan bir histeresis görülebilir (Morrow, 1990).

Büyük katı örnekler söz konusu olduğunda veya düz ve cilalanmış bir yüzeyin elde edilemeyeceği numunelerde doğrudan temas açısı yöntemi kullanılabilirliğini yitirir. Gözenek geometrisi, yüzey pürüzlülüğü ve gözenekli yüzeyin adsorbsiyon kapasitesi temas açısının doğrudan ölçümünü engelleyen parametrelerdir. Ayrıca, katı yüzeyi cilalamak, yüzeyde atomsal değişikliklere neden olacak ve atomik boyutta yeni yüzeylerin oluşmasını sağlayacaktır. Bunun yanı sıra, temas açısının saf ve tek bir mineral üzerinde saptanması rezervuarlardaki gibi minerolojik olarak heterojen kompozisyona sahip kayaç sistemlerinin ıslatımlılıklarının araştırılmasını sınırlandıracaktır (Wolfram ve diğ., 2002; Morrow, 1990). Başka bir anlatımla, düz, pürüzsüz ve cilalanmış yüzeyler tam anlamı ile birkaç farklı mineralden oluşmuş kayaçların doğal gözenekli yüzeylerini temsil edemezler (Yıldız, 1998; Green ve Willhite, 1998). Bu durumda, temas açıları doğrudan ölçülemediğinde katı yüzeylerin ıslatımlılık karakterini kılcal tüp yükselim yöntemi ile saptamak doğrudan temas açısı ölçüm yöntemine göre daha iyi ve tutarlı bir yaklaşımdır. Sonuç olarak, toz haline getirilmiş tek bir mineral kristali ya da farklı bileşenlerden oluşmuş bir kayaç söz konusu olduğunda, kılcal tüp yükselim yöntemi temas açısı saptamasında uygulanabilecek kullanışlı alternatif bir yöntemdir.

Herhangi bir sıvı kılcal kuvvetler yardımı ile doğal olarak gözenekli ortama nüfuz edebilir. Sıvının gözenekli ortam ya da toz materyale nüfuz etme hızı Washburn tarafından formüle edilmiştir. Washburn (1921)'e göre, gözenekli bir kayaç sıvı ile temas ettiğinde sıvının gözenekler içerisindeki yükselimi aşağıdaki bağıntı ile açıklanabilir.

$$t = \frac{\mu}{C \cdot \rho^2 \gamma \cos \theta} \cdot m^2 \quad (1.1)$$

Burada, t , temas sonrası ölçülen zaman, μ , sıvının akma viskozitesi, C , katı numunenin karakteristiğine bağlı sabit, ρ , sıvının yoğunluğu, γ , sıvının yüzey gerilimi, θ , temas açısı, m , katı örnek tarafından adsorbe edilmiş sıvı kütlesi olarak verilmiştir. θ ve C

sabiti eşitliğin bilinmeyenleridir. Bu bilinmeyenleri bulabilmek için, yüzeyi tamamen ıslatabilen düşük enerjili bir sıvının referans alınmasına ihtiyaç vardır. Bu referans sıvı kullanıldığında, θ değeri 0° olur ve C sabiti kolaylıkla hesaplanabilir. Çalışılan diğer ıslatım sıvılarının katı yüzey ile olan temas açıları da, bu referans sıvı baz alınarak yapılan ölçümler sonrasında hesaplanarak bulunur (Van Oss, 1994).

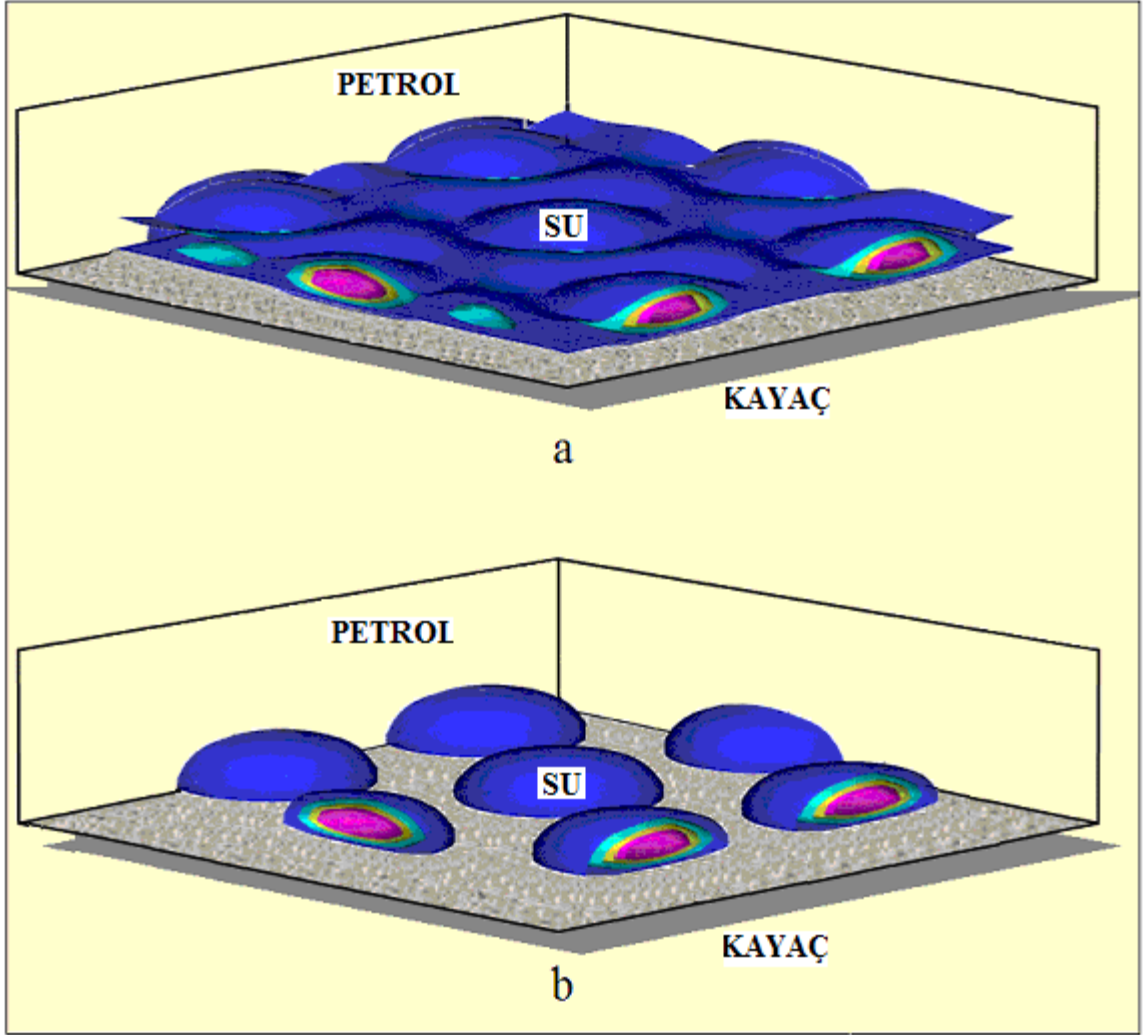
Amott ve USBM ölçüm yöntemleri petrol/tuzlu su/kayaç sisteminde öteleme davranışını baz alarak ıslatımlılık tanımlamasının yapıldığı en yaygın kullanılan tekniklerdir (Cuiec, 1991). Her ikisi de kılcal basınç ve mikroskobik öteleme verimine bağlı çalışan yöntemlerdir (Morrow, 1990). USBM yönteminin en zayıf noktası, bu testin doğal emme ile kalıcı petrol doymuşluğunun elde edildiği sistemleri tanınamasıdır (Ma ve diğ., 1994). Başka bir deyişle, bu metot çok kuvvetli su ıslatımlı ya da çok kuvvetli petrol ıslatımlı sistemleri su ve petrol ıslatımlı sistemlerden ayırt edecek kadar hassas değildir. Öte yandan, Amott testi kılcal ve viskoz kuvvetlerin toplam etkisinin yanında, su veya petrol emmesi sonucunda gerçekleşen ve yalnız kılcal kuvvetler etkisi ile olan ötelemeyi de ayırt edebilmektedir (Yıldız ve Gökmen, 2001). Amott testinin zayıf noktası da, kuvvetli su ve kuvvetli petrol ıslatımlılık derecelerini birbirinden ayırt edememesidir (Morrow, 1990). Bu yüzden ki, temas açısının saptanmasında Washburn eşitliğini temel alan ve dinamik bir ölçüm yöntemi olan Kılcal Tüp Yükselim Yönteminin kumtaşı ve karbonatlı kayaçlar gibi heterojen mineralojik yapıya sahip kayaç örneklerinin ıslatımlılık karakterinin belirlenmesinde uygulanması büyük bir önem arz etmektedir.

Bu çalışmanın ana amacı, Kılcal Tüp Yükselim Tekniğini uygulayarak farklı ıslatım sıvıları ile muamele edilmiş farklı mineral içeriğe sahip olan kayaç örneklerinin ıslatımlılık özelliklerinin saptanmasıdır. Bilindiği gibi kayaç ıslatımlılığının değiştirilmesi üretimi arttırabilmektedir. Bu çalışmada aynı zamanda diğer ıslatımlılık ölçüm yöntemlerine göre zaman, maliyet ve yöntemin duyarlılığı yönünden kazanç sağlanması amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 İslatımlılık

İslatımlılık; katı bir yüzey ile temas halinde bulunan iki karışmayan akışkandan birinin diğerine göre katı yüzey üzerine yayılabilme kabiliyeti olarak tanımlanabilir. İslatımlılık akışkanın kimyasal birleşimi ile katı yüzeyin cinsine bağlıdır (Morrow, 1990). Başka bir deyişle; katı yüzeyin sistemdeki akışkana olan adhezyon eğiliminin ve herhangi bir tuzlu su/kayaç/petrol sisteminde kayacın hangi akışkanı ne kadar tercih ettiğinin bir ölçüsüdür. Rezervuarda ise ıslatımlılık; akışkan dağılımını, akışkanın konumunu ve akışını, etkileyen önemli bir faktördür. Bununla birlikte ıslatımlılığın kılcal basınç, görel geçirgenlik, başlangıç su ve petrol doymuşlukları ile petrol üretimi üzerine etkisi vardır. Rezervuar kayaçları su ıslatımlı, petrol ıslatımlı ve nötral ıslatımlı olarak üç ayrı sınıfta incelenirler. Eğer kayaç su ıslatımlı ise, suyun küçük gözenekleri doldurma eğiliminde olduğu ve dolayısı ile kayaç gözenek yüzeyinin büyük bir kısmı ile temas halinde olduğu gözlenir. Benzer bir şekilde, petrol ıslatımlı bir sistemde kayaç petrol ile temas halinde olmayı tercih edeceğinden akışkanlar su ıslatımlı durumun tam tersi davranış gösterir ve petrol küçük gözenekleri doldururken su büyük gözeneklerde bulunur. Sistemin ıslatımlılığı, kuvvetli su ıslatımlı ile kuvvetli petrol ıslatımlı aralığında tuzlu su/kayaç/petrol üçlüsünün arasındaki etkileşime bağlı olarak değişim gösterir. (Anderson, 1986a). Su/petrol/kayaç sisteminde tanımladığımız “su ıslatımlı yüzey” ve “petrol ıslatımlı yüzey” kavramları, genel olarak “suyu seven (hydrophilic) yüzey” ve “suyu sevmeyen (hydrophobic) yüzey” olarak tanımlanmaktadır. Aşağıda suyu seven ve sevmeyen iki farklı yüzeyin davranışları görülmektedir. Suyu seven (su ıslatımlı) yüzey olarak tanımlanan kısımda su yüzeye yayılarak bir film şeklinde yüzeyi kaplama eğilimi gösterirken (Şekil 2.1a), suyu sevmeyen (petrol ıslatımlı) yüzeyde su damlacıklar halinde kalmayı tercih eder (Şekil 2.1b).



Şekil 2.1 : Su ıslatımlı (a) ve petrol ıslatımlı (b) yüzeylerin iki karışmaz akışkan varlığındaki davranışları.

2.2 Ara Yüzey Gerilimi

İki karışmayan akışkan temas halinde olduğu zaman, bu iki akışkan arasında arayüzey adı verilen bir bölge oluşur. Ara yüzeyler temas halinde bulunan bu iki karışmaz akışkanın durumuna göre (katı, sıvı ya da gaz) sınıflandırılırlar. Eğer, fazlardan birisi gaz veya katı fazı ise, ölçüm “yüzey gerilimi”, ortamda iki karışmayan sıvı bulunuyor ise yapılan ölçüm “ara yüzey gerilimi” adını alır. Yüzey ve ara yüzey gerilimleri birim uzunluk başına etkiyen ortalama kuvvet olarak tanımlanır (kuvvet/birim uzunluk, mN/m). Tipik bir petrol/su/kayaç sisteminde sistemin yüzey enerjileri Young eşitliğine bağlı olarak,

$$\gamma_{ow} \cos \theta = \gamma_{os} - \gamma_{ws} \quad (2.1)$$

şeklinde verilmiştir. Burada; γ_{ow} , petrol ile su arasındaki ara yüzey gerilimi, γ_{os} , petrol ile kayaç arasındaki yüzey gerilimi, γ_{ws} , su ve kayaç arasındaki yüzey gerilimi, θ , su/petrol/kayaç temas bölgesindeki açı (temas açısı) olarak tanımlanır. Bazen, $\gamma_{os} - \gamma_{ws}$ terimi adhezyon gerilimi, γ_A , olarakta tanımlanabilir. Adhezyon gerilimi, ıslatımlı ve ıslatımlı olmayan akışkanların ara yüzey gerilimleri ile bu akışkanların katı ile olan ara yüzey gerilimleri arasındaki fark olarak da tanımlanabilir. Başka bir deyişle adhezyon gerilimi serbest enerjideki değişimin bir ölçüsüdür.

$$\gamma_A = \gamma_{os} - \gamma_{ws} = \gamma_{ow} \cos \theta \quad (2.2)$$

Sistemin su ıslatımlı olduğu durumlarda, γ_A pozitif değer alırken, petrol ıslatımlı sistemlerde negatif ve nötral ıslatımlı sistemlerde sifıra yakın değerler alır (Anderson, 1986b).

2.3 Temas Açısı

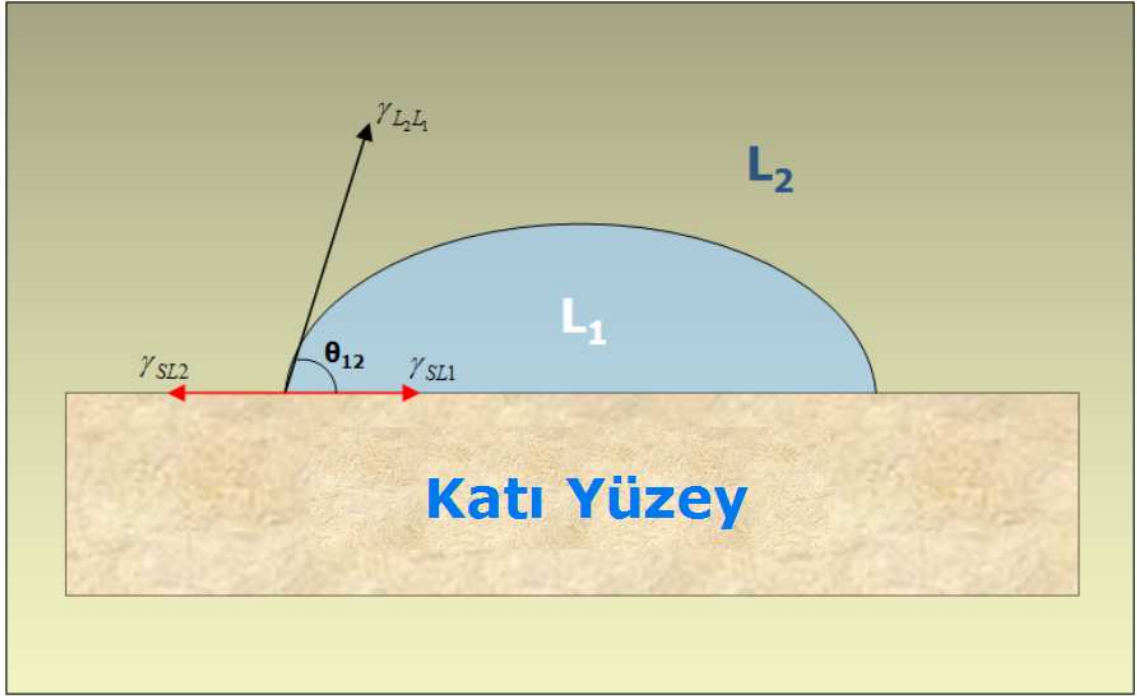
Katı-sıvı, katı-akışkan ve sıvı-akışkan fazların kesişme bölgesi temas açısının oluştuğu temas bölgesi olarak adlandırılır. Temas açısı, sıvı-akışkan arayüzeyinin teğeti ile katı arayüzeyi arasındaki açı olarak tanımlanmaktadır. 1805 yılında Thomas Young katı düz bir yüzey ile temas halinde bulunan ve mekanik olarak dengede olan bir damlacığı ve bu damlacığı etkileyen üç farklı yüzey gerilimini inceleyerek temas açısını tanımlamıştır. Yaptığı tanımlamada; γ_{LV} , sıvı-hava arasındaki yüzey gerilimini, γ_{SL} , katı ile sıvı arasındaki ara yüzey gerilimini ve γ_{SV} , katı ile hava arasındaki yüzey gerilimini temsil etmektedir (Zisman, 1944).

2.3.1 Hava-Sıvı-Katı Sistemi için Temas Açısı Belirlenmesi

Temas açısı gerçek ve görünür temas açısı olmak üzere iki farklı durumda incelenir. Gerçek temas açısı, katı yüzeyden birkaç molekül kadar uzaklıktaki kısa mesafelerde ölçülmüş temas açısı olarak tanımlanırken, görünür kontak açısı makroskobik boyuttaki açı ölçümleri için kullanılan terimlerdir (Marmur, 1992). Bir buhar fazının varlığında,

sıvı eğer herhangi bir kimyasal reaksiyona girmemiş, yüzeyi tümü ile kaplamamış, düzgün, biçimi bozulmamış ve kimyasal anlamda homojen ise, sıvı yüzeyi, temas halinde bulunduğu katı yüzey ile temas açısı, θ , oluşturarak kesişecektir. Temel Young eşitliği temas açısını Şekil 2.2 deki biçimde tanımlar,

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (2.3)$$



Şekil 2.2 : Katı-sıvı-buhar ara yüzeyi için temas açısı.

2.3.1 Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi için Temas Açısı Belirlenmesi

Bir hava-sıvı-katı sisteminin arayüzeyindeki temas açısı, katı ve sıvının arayüzey enerjileri arasındaki ilişkiye bağlıdır. Denklem 2.3'ten hareketle bir katı yüzey ile temas halinde olan iki sıvı için temel Young eşitliğini aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\gamma_{SL_2} - \gamma_{SL_1} = \gamma_{L_2L_1} \cos \theta_{12} \quad (2.4)$$

Burada, γ_{SL_1} ve γ_{SL_2} iki farklı sıvının katı yüzey ile olan yüzey gerilimleri, $\gamma_{L_2L_1}$ ise iki karışmaz akışkan arasındaki ara yüzey gerilimi, $\cos \theta_{12}$ ise iki karışmaz akışkan

arasındaki temas açısı olarak tanımlanmıştır (Van Oss, 1994; Adamson, 1990). Eğer iki karışmayan akışkanın adhezyon gerilimleri biliniyorsa, buradan hareketle sıvı-sıvı-katı sisteminin ara yüzeyinin temas açısı;

$$\cos \theta_{12} = \frac{(\gamma_{SV} - \gamma_{SL_1}) - (\gamma_{SV} - \gamma_{SL_2})}{\gamma_{L_1L_2}} = \frac{(\gamma_{L_1} \cos \theta_1) - (\gamma_{L_2} \cos \theta_2)}{\gamma_{L_1L_2}} \quad (2.5)$$

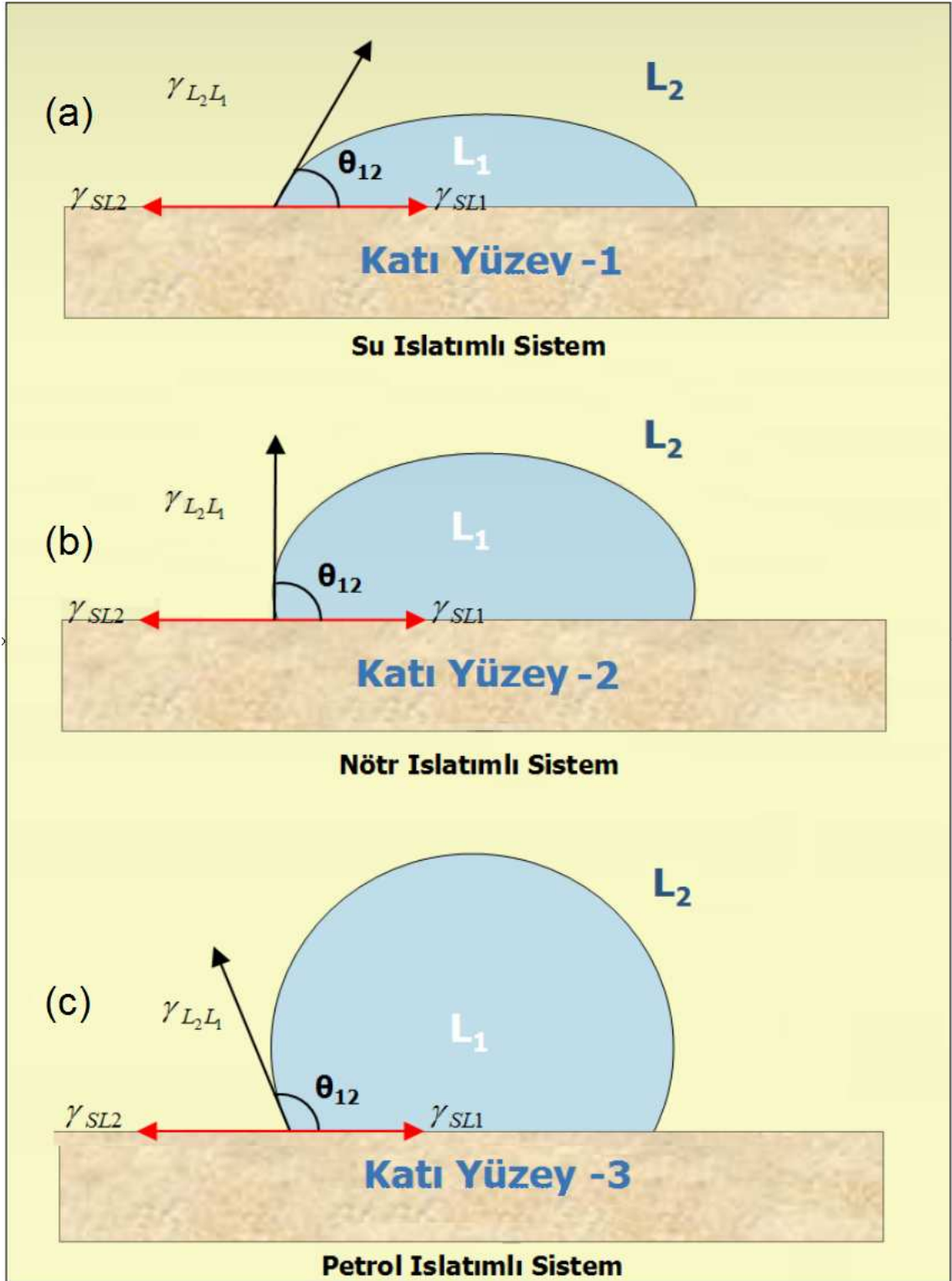
olarak hesaplanır.

2.4 Kılcal Basınç

Kılcal basınç, birbiriyle özdeşleşmeyen ve bir eğrisel yüzey boyunca birbiri ile dengede olan iki akışkanın bu eğrisel yüzey boyunca olan mevcut basınç farkına verilen addır. Eğriselliğin derecesi katı fazın akışkanlardan hangisine eğilimli olduğunu gösteren önemli bir faktördür. Şekil 2.3'te çeşitli ıslatımlılık davranışları görülmektedir. Şekil 2.3a'da su damlacığının ıslatan faz, petrolün ise ıslatmayan faz olduğu su ıslatımlı durum, Şekil 2.3b'de kayacın akışkanlar arasında herhangi bir seçim yapamadığı nötral ıslatımlı durum ve Şekil 2.3c'de ise petrolün ıslatan suyun ise ıslatmayan faz konumunda olduğu petrol ıslatımlı durum gösterilmiştir. ıslatmayan fazın iç basıncı ıslatan fazın iç basıncından her zaman büyüktür. Kılcal basınç ıslatmayan ve ıslatan fazlar arasındaki basınç farkı olarak tanımlanmıştır.

$$P_c = P_{nw} - P_w \quad (2.6)$$

Buradaki damlacığın yarıçapı, dolayısı ile ıslatımlılık, kayaç gözeneklerinin içinde bulunan su/petrol/kayaç üçlüsünün temas halinde bulunduğu durumlarda, su ve petrol doymuşlukları, gözenek geometrisi ve gözenek duvarının mineralojisi gibi parametrelere bağlı olarak değişir (Donaldson ve Tiab, 1996).



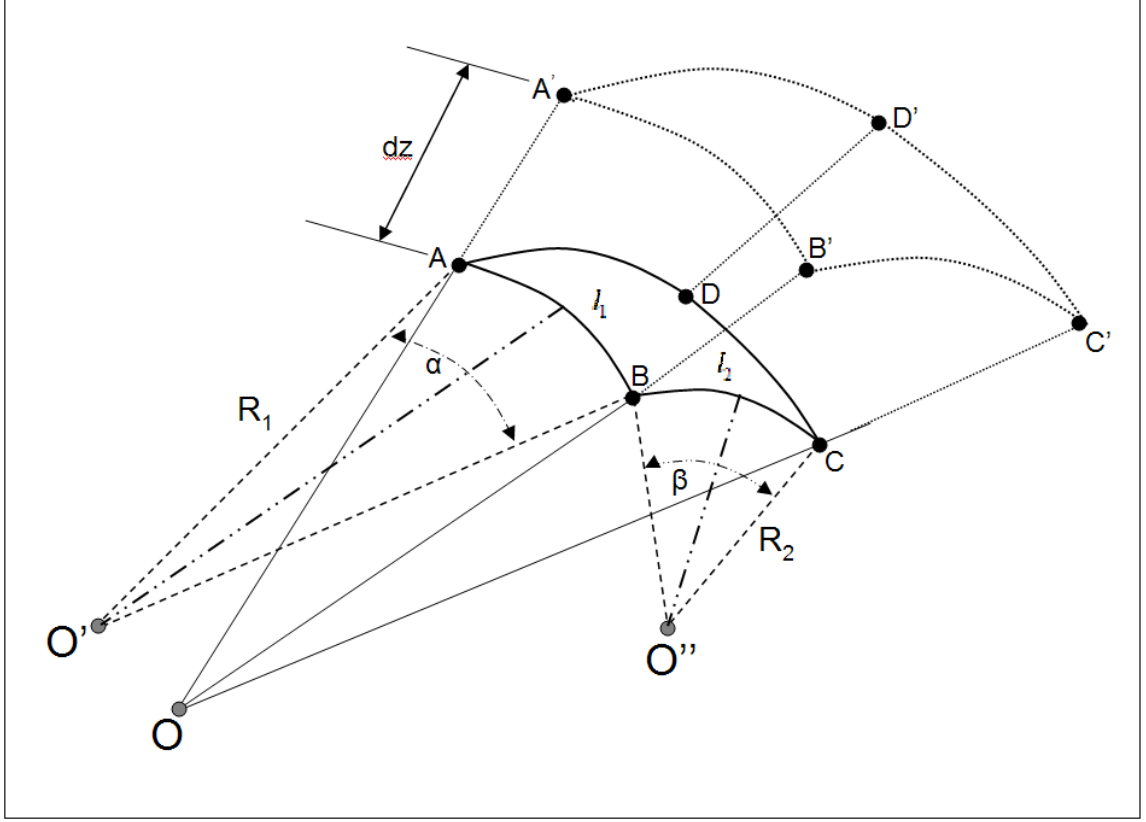
Şekil 2.3 : Su/petrol/kayaç üçlüsünün doğrudan temas açısı yöntemi kullanılarak elde edilen çeşitli ıslatımlılık durumları.

2.4.1 Plateau Eşitliği

Küresel olarak yerleşmiş olan küçük sıvı damlacıklarının ulaşabilecekleri en küçük yüzey alanında denge durumuna gelene kadar ki davranışlarının belirlenebilmesi önemli bir fiziksel özelliktir. Sıvı yüzeyindeki moleküler çekim kuvvetlerinin dengesiz halden dengeli hale gelmesi olayı fiziksel değişimlerin ve kavramların irdelenip formüle edilmesi ile açıklanabilir.

Gaz fazı ile temas halinde olan bir sıvı damlacığını inceleyecek olursak; iç kısımdaki her bir molekülün özdeş diğer moleküller tarafından çevrelenerek, her yönde düzgün moleküler çekim kuvvetleri etkisinde dengede olduğu görülür. Sıvının gaz fazı ile temas halinde bulunduğu yüzeyi incelersek, iç kısımda özdeş sıvı molekülleri ile temas halinde olan her bir molekül, dış kısımda gaz fazın molekülleri ile etkileşim durumunda olacağından iç çekimi dengeleyecek yeterli dış çekim yaratılamaz. Dolayısı ile iç kısım moleküllerinin çekimi dış kısma göre çok daha büyük olacağından, damlacık ulaşabileceği en küçük yüzey alanında dengeye gelmeye çalışır ve yüzey gerilimi oluşturur. Yüzeyin genişletilebilmesi için yüzey gerilimine karşı iş yapılması gerekir (Donaldson ve Tiab, 1996).

İç yüzeyleri arasında basınç farkı olan ve birbirleri ile temas halinde bulunan iki karışmaz akışkanın, bir ara yüzey oluşturmak için gerekli en küçük yüzey alanına ulaşmaya çalıştığını farzedelim (Şekil 2.4). Bu durumda, yüzey alanını genişletmek için yüzey gerilimine karşı yapılması gereken iş, dışbükey tarafın basıncını arttırmakla mümkün olabilir.



Şekil 2.4 : İki karışmaz akışkanın ara yüzeyinin eğrisellik yarıçapının yüzey alanı artışı ile değişimi.

$$ALAN ABCD = l_1 \times l_2 \quad (2.7)$$

$$ALAN A'B'C'D' = \left[l_1 + \left(\frac{l_1}{R_1} \right) dz \right] \times \left[l_2 + \left(\frac{l_2}{R_2} \right) dz \right]$$

$$= l_1 l_2 \left[1 + \left(\frac{dz}{R_1} \right) + \left(\frac{dz}{R_2} \right) + \left(\frac{(dz)^2}{R_1 R_2} \right) \right] \quad (2.8)$$

$(dz)^2 / R_1 R_2$, diğer terimlere göre çok küçük olduğundan ihmal edilebilir. Bu durumda, alansal artış miktarı,

$$A'B'C'D' - ABCD = l_1 l_2 \times dz \times \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.9)$$

Yüzey alanını genişletebilmek için yüzey gerilimine karşı izotermal durumda yapılması gereken iş $\left((N / m) \times m^2 = Nm \right)$,

$$W(1) = \gamma (l_1 l_2 \times dz) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.10)$$

Yüzeyi dz kadar ilerleten basınç artışının sağlanması için izotermal durumda yapılması gereken iş,

$$W(2) = P (l_1 l_2 \times dz) \quad (2.11)$$

Yapılan bu iki izotermal işi eşitleyerek gerekli sadeleştirmeler gerçekleştirildikten sonra eğrisellik yarıçapı ve ara yüzey geriliminin bir fonksiyonu olan kılcal basınç elde edilir.

$$P_c = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.12)$$

Eğer iki farklı durum için eğrisellik yarıçapları kılcal tüp örneğinde olduğu gibi eşit olarak alınırsa kılcal basınç,

$$P_c = \frac{2\gamma}{R} \quad (2.13)$$

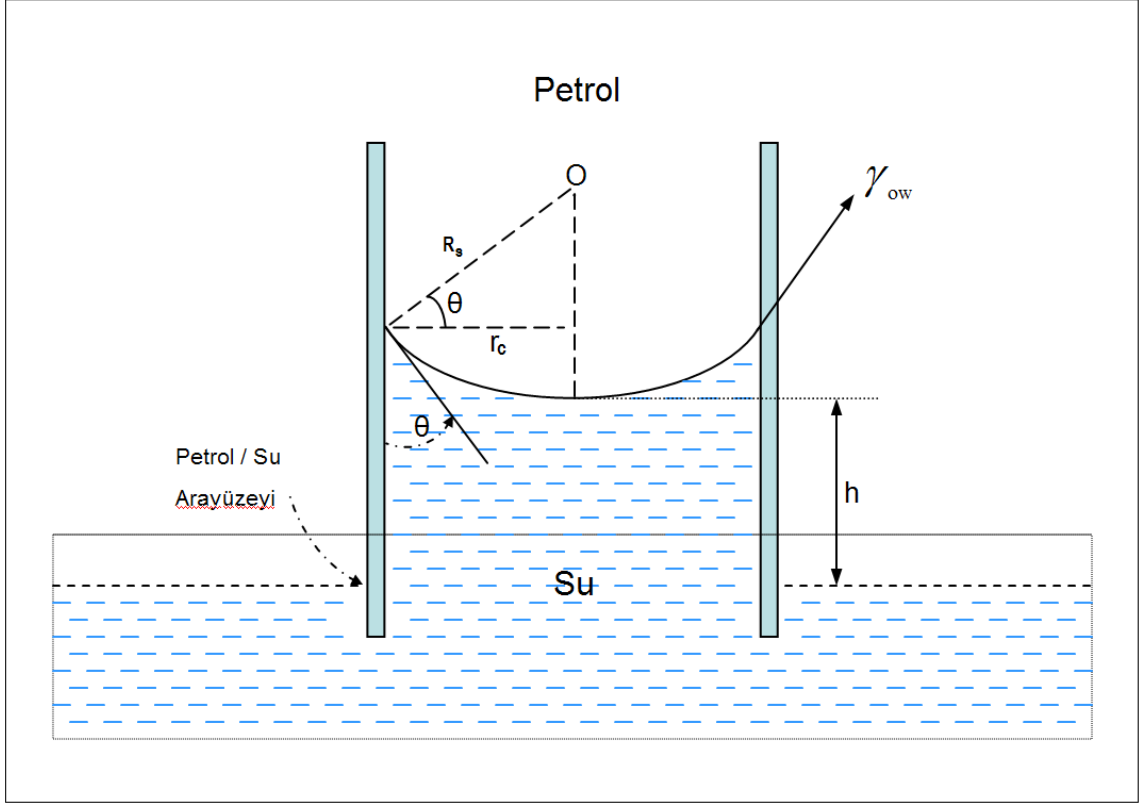
durumuna gelir (Plateau, 1863). Bu eşitlik, ara yüzey geometrisinden hareketle kılcal tüp içerisindeki ıslatan sıvının kılcal basınç ilişkisini türetmek için de kullanılabilir.

$$\cos \theta = \frac{r_c}{R_{ka}} \quad (2.14)$$

Burada, r_c , kılcal tüpün yarıçapı, R_{ka} , küresel ara yüzeyin yarıçapı'nı ifade eder. R_{ka} , R değeriyle aynı olduğundan dolayı, Denklem 2.13,

$$P_c = \frac{2\gamma \cos \theta}{r_c} \quad (2.15)$$

şeklini alır.



Şekil 2.5 : Su ıslatımlı kılcal tüp içerisinde suyun kılcal yükselimi.

2.4.2 Leverett Yaklaşımı

Gözenekli ortam göz önüne alındığında Denklem 2.9 negatif sonuç verebilir (Leverett, 1941). Bunun sonucunda kılcal basınç için daha genel bir eşitlik,

$$P_c = \gamma \left(\frac{1}{R_1} \pm \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.16)$$

şeklinde yazılabilir.

2.5 Kılcal Yükselim ve Washburn Eşitliği

Şekil 2.5' te verilen r_c yarıçaplı tüp içerisinde, iki karışmaz akışkanın temas halinde bulunduğu R_s yarıçaplı bir ara yüzey sınırı olduğunu farz edelim. Bu durumda,

$\cos \theta = r_c / R_s$ olur ve 2.15 eşitliği elde edilir. Kılcal tüp içerisindeki ıslatan fazın aşağıya doğru etkiyen ağırlığı ise, M_w ,

$$M_w = \pi \cdot r_c^2 \cdot h \cdot (\rho g)_w \quad (2.17)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, h , kılcalın ara yüzey sınırının iki akışkanın ara yüzey sınırından olan yüksekliği ve $(\rho g)_w$, suyun birim hacimdeki ağırlığını göstermektedir. Silindirik kolon içerisinde sıvının kaldırma kuvvetinden kaynaklanan kuvveti yazacak olursak,

$$B = \pi \cdot r_c^2 \cdot h \cdot (\rho g)_o \quad (2.18)$$

Ara yüzey geriliminin dikey bileşeni olan ve yukarı yönde etkiyen F_z kuvveti ise;

$$F_z = 2\pi \cdot r_c \cdot \gamma_{wo} \cos \theta_{wo} \quad (2.19)$$

olarak tanımlanır. Bu üç farklı kuvveti birleştirecek, h yüksekliği,

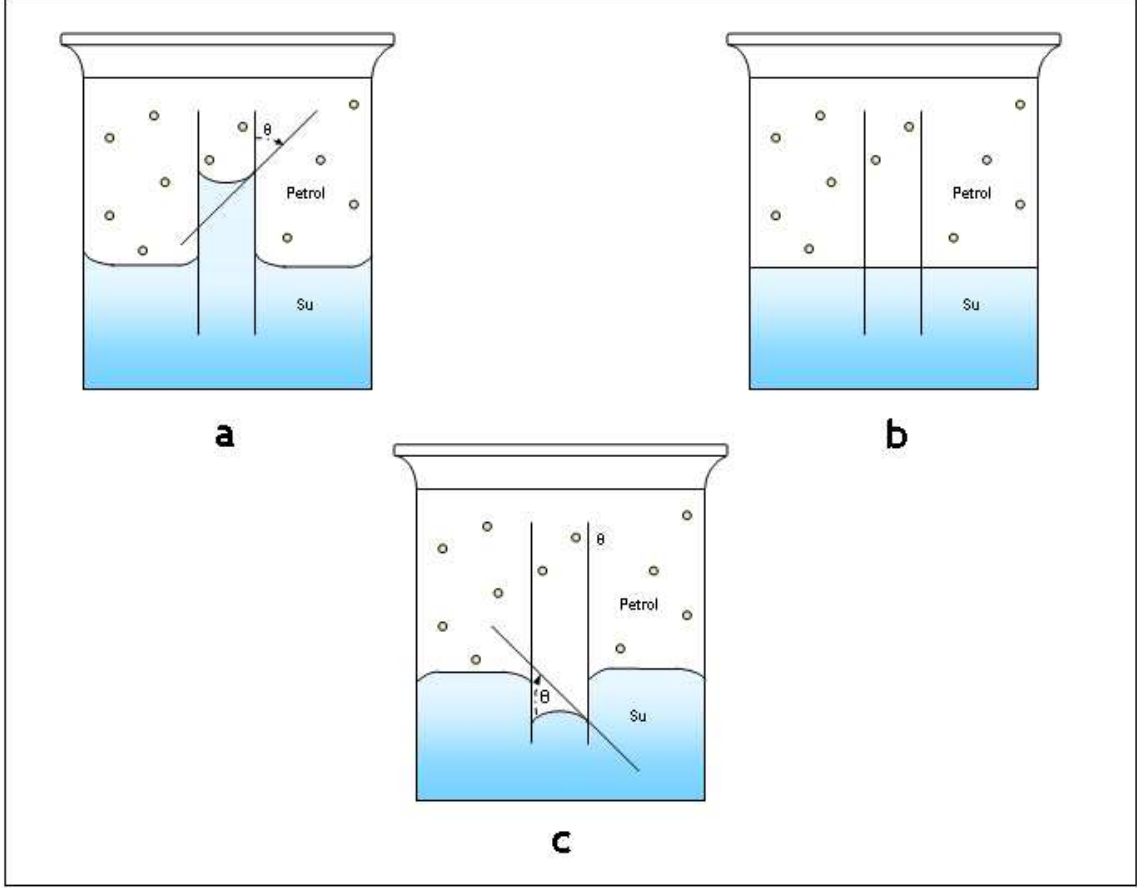
$$h = \frac{2\gamma_{wo} \cos \theta}{r_c \cdot [(\rho g)_w - (\rho g)_o]} = \frac{P_c^{wo}}{\Delta(\rho g)} \quad (2.20)$$

olarak elde edilir (Donaldson ve Tiab, 1996).

İki karışmayan akışkan içeren bir sistemin ara yüzeyinin alt kısmına kadar kılcal bir tüp yerleştirilecek olursa, kılcalın içerisindeki ara yüzey sınırı iki akışkanın ara yüzeyinin üst kısmında yer alarak yoğun faza doğru içbükey yapabilir, kılcalın ara yüzey sınırı iki akışkanın ara yüzey sınırı ile aynı seviyede kalarak düz bir şekilde kalabilir ya da kılcalın ara yüzey sınırı akışkanların arayüzeyinin altında kalır ve yoğun faza doğru dışbükey oluşturabilir (Şekil 2.6).

Ara yüzey sınırının şekli ve yüksekliği moleküler kohezyon kuvvetleri ve kılcal tüp duvarı ve sıvılar arasındaki mevcut moleküler adhezyon kuvvetlerinin göreceli büyüklüklerinin bir fonksiyonudur. Başka bir deyişle, temas açısının 90° den küçük olduğu durumlarda yoğun sıvı katı yüzeyini ıslatırken (Şekil 2.6a), temas açısının 0°

olduğu durumda moleküler kuvvetler dengede ve iki karışmayan akışkan katı yüzeyi eşit ölçüde ıslatmakta (Şekil 2.6b) ve temas açısının 90° den büyük olduğu durumlarda yoğun olan sıvı yoğunluğu düşük olana göre yüzeyi daha az derecede ıslatmaktadır (Şekil 2.6 c).



Şekil 2.6 : Farklı ıslatımlılık davranışına sahip kılcal tüplerin iki karışmaz akışkan varlığında temas açıları.

1921 yılında E.W. Washburn kılcal boru içerisinde olan yükselim olayını, doğadaki örneklerden (tahtanın suyu emmesi, kayaçların yapıları gibi...) esinlenerek gözenekli ortam için incelemiş ve geliştirmiş olduğu zamansal olarak kütle değişimini içinde barındıran eşitlik daha sonra ıslatımlılık konusunda yapılan pekçok çalışmaya ilham kaynağı olmuştur (Washburn, 1921). Poiseuille eşitliğine göre, kararlı akış olduğu varsayılarak kılcal, viskoz ve hidrostatik kuvvetler (durağan kuvvetler ihmal edilerek) arasındaki denge açıklanmaya çalışılırsa, sıvının nüfuz hızı;

$$dV = \frac{r^4 \cdot \Delta P \cdot \pi}{8 \cdot \mu \cdot h} \cdot dt \quad (2.21)$$

şeklinde ifade edilebilir. Sıvı hacmi ve yüksekliği arasındaki ilişki ise,

$$dV = r^2 \cdot \pi \cdot dh \quad (2.22)$$

eşitliği ile açıklanır. Kılcal basınç, P_c (Denklem 2.23) ve hidrostatik basınç, P_h (Denklem 2.24) kullanılarak basınç düşümü, ΔP hesaplanabilir (Denklem 2.25).

$$P_c = \frac{2\gamma}{r} \cos \theta \quad (2.23)$$

$$P_h = g \cdot \rho \cdot h \quad (2.24)$$

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r} \cos \theta - (g \cdot \rho \cdot h) \quad (2.25)$$

Eğer, Denklem 2.22 ve Denklem 2.25, Denklem 2.21 de yerine konulacak olursa, sıvının nüfuz hızı;

$$\frac{dh}{dt} = \frac{r^2}{8\mu h} \left[\frac{2\gamma}{r} \cos \theta - (g \cdot \rho \cdot h) \right] \quad (2.26)$$

olarak elde edilir. Kılcal basınç altında bir akış söz konusu ise hidrostatik basıncın ihmal edilebileceği varsayımından hareketle, Denklem 2.26;

$$h \cdot \frac{dh}{dt} = \frac{r \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{4\mu} \quad (2.27)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklem 2.27'nin anlık koşullara ($t=0$ ve $h=0$) uygulanması ile Washburn eşitliği elde edilir (Washburn, 1921).

$$h^2 = \frac{r\gamma \cos \theta}{2\mu} \cdot t \quad (2.28)$$

Daha önce de belirtildiği üzere sıvı-gaz ara yüzeyinde meydana gelen basınç düşümü,

$$\Delta P = 2(\gamma_{SV} - \gamma_{SL})/r \quad (2.29)$$

ve sıvının katı üzerindeki temas açısı ($\theta > 0$ durumunda) Young eşitliğine dayanılarak,

$$\cos \theta = (\gamma_{SV} - \gamma_{SL})/\gamma_{LV} \quad (2.30)$$

şeklinde verilmişti. Bu durum sadece,

$$\gamma_{SV} - \gamma_{SL} \leq \gamma_{LV} \quad (2.31)$$

koşulunda geçerlidir. Bunun dışındaki durumlarda doğal ıslatım söz konusu olacağından dolayı, sabit bir katı-sıvı-gaz ara yüzeyinden söz edilemez (Harkins ve Feldman, 1922). Toz partikül yatağının etkin kılcık yarıçapı aynı zamanda ortalama hidrolik yarıçap olarak adlandırılır. Toz partikül yatağı için etkin kılcık yarıçap;

$$r_h = \frac{2 \times \text{Ara kesit alanı}}{\text{ıslanan çevre}}$$

$$r_h = \frac{2}{S_v} \left(\frac{\phi}{1-\phi} \right) \quad (2.32)$$

olarak tanımlanır. ϕ , partikül yatağı gözenekliliğini ve S_v , özgül yüzey alanını temsil etmektedir (White, 1982). Partikül yatağında meydana gelen akış hızı, gözenekli ortamda akışı tanımlayan Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak hesaplanabilir (Wolfson ve diğ., 2002).

$$u = \frac{K\phi^3 \Delta P}{(1-\phi)^2 \mu h S_v^2} \quad (2.33)$$

Burada, μ , sıvının akma viskozitesi, h , toz partikül yatağındaki sıvı kolonunun yüksekliği ve K , kılcık yatağın tortozite faktörü olarak tanımlanır. Denklem (2.29), (2.32) ve (2.33) birleştirildiğinde, paketlenmiş toz yatağında sıvı nüfuz hızını ifade eden Washburn (1921) Eşitliği elde edilir.

$$m^2 = \frac{C \cdot \rho^2 \cdot \gamma_{LV}}{\mu} \left(\frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \right) t \quad (2.34)$$

m , partikül yatağı tarafından t zamanında emilen sıvı kütlesini temsil ederken, C , tortozite, Ara kesit alanı, gözeneklilik ve hacme özgü yüzey alanının bir fonksiyonu olan kayacın cinsine göre değişiklik gösteren geometrik faktör olarak tanımlanır. Eğer temas açısı sınırlı değerlerde ($\theta > 0$) ise, (2.27) eşitliği (2.31)'de yerine konulacak olursa,

$$m^2 = \frac{C \cdot \rho^2 \cdot \gamma_{LV} \cdot \cos \theta}{\mu} \cdot t \quad (2.35)$$

Washburn eşitliğinin kütlelerin zamana göre olan değişimine göre uyarlanmış eşitliği elde edilir (Wolfrom ve diğ., 2002).

2.6. İslatımlılık Ölçüm Yöntemleri

2.6.1. Doğrudan Temas Açısı Ölçüm Yöntemi

Doğrudan temas açısı ölçüm yöntemi, temiz, cilalanmış ve pürüzsüz bir yüzey üzerindeki sıvı damlacığının temas açısının goniometrik ölçümler sonucunda saptanması esasına dayanır. Başka bir deyişle, katı yüzey ve iki karışmaz akışkanın ara yüzeyleri arasındaki karşılıklı etkileşimin bir sonucu olarak temas açısı saptanır.

Sıvı damlacığın cilalı katı yüzey ile etkileşim halinde olduğu klasik durumda, temas açısı genellikle görsel olarak doğrudan ölçüm yolu ile elde edilebilir. Sıvı-sıvı-katı sistemi olarak tabir edilen bu durumda, temas açısı, katı yüzey, S , ve iki karışmaz akışkan, L_1 ve L_2 arasındaki açı olarak tanımlanır (Şekil 2.3). Eğer L_1 akışkanının ıslatımlılığı L_2 akışkanından fazla ise; L_1 akışkanı L_2 'yi öteleyerek katı yüzeye yayılma eğilimi gösterecek ve bunun sonucunda temas açısı 90° den küçük olacaktır (Şekil 2.3a). Bunun aksine L_2 'nin ıslatımlılığı L_1 ıslatımlılığından büyük olacak olursa; L_2 akışkanı L_1 'i katı yüzeyinden ötelemeye çalışacak ve temas açısı L_1 yönünde 90° den büyük olacaktır (Şekil 2.3c). Temas açısı 90° ye eşit olduğunda ise, L_1 ve L_2 akışkanı eşit ıslatımlılığa sahiptir. Ayrıca, sıvının tamamen yüzeye yayıldığı ya da hiçbir yayılmanın

gözlenmediği sıradışı sistemler olabilmektedir. Eğer tamamen yüzeye yayılma söz konusu ise, temas açısı 0° olurken, hiçbir yayılmanın gözlemlenmediği durumda ise 180° olmaktadır. Petrol-Su-Kayaç sistemi içinde temas açısı ve ıslatımlılık ilişkisi tahmini yapılabilmektedir. Temas açısı 0° ile 60° - 75° arasında ise su ıslatımlı, 180° ile 105° - 120° arasında ise petrol ıslatımlı olarak tanımlanır. 60° - 75° derece aralığından 105° - 120° derece aralığına kadar olan bölge ara ıslatımlı olarak tanımlanabilir (Anderson, 1986a).

Petrol endüstrisinde en çok kullanılan doğrudan temas açısı ölçüm yöntemi, MSD (Modified Sessile Drop) yöntemidir. Arası tuzlu su ile doldurulmuş, birbirine paralel, cilalanmış, temiz ve pürüzsüz iki kristal yüzeye bu yüzeyler ve tuzlu su ile temas halinde olacak olan bir petrol damlacığı yerleştirilir. Tabakalardan biri diğerine paralel olacak şekilde hareket ettirilir ve hareket halindeki tabaka yer değiştirirken, petrol damlacığı da harekete başlayarak daha önce bulunduğu ortamı tuzlu suya bırakır. Tabakaların birbirine paralel olarak yer değiştirmesi sırasında temas açısı ölçülür. Bu temas açısı “Su ilerlemeli temas açısı” olarak adlandırılır. Kumtaşı yapısında en çok kuvars ve kireçtaşı yapısında en çok kalsit bulundurduğundan, rezervuar kayacındaki gözenekli yüzeyler için bu yöntem bu iki saf kristal için hata payı yüksek de olsa bir fikir vermesi açısından uygulanabilir.

2.6.2. AMOTT Islatımlılık İndeksi

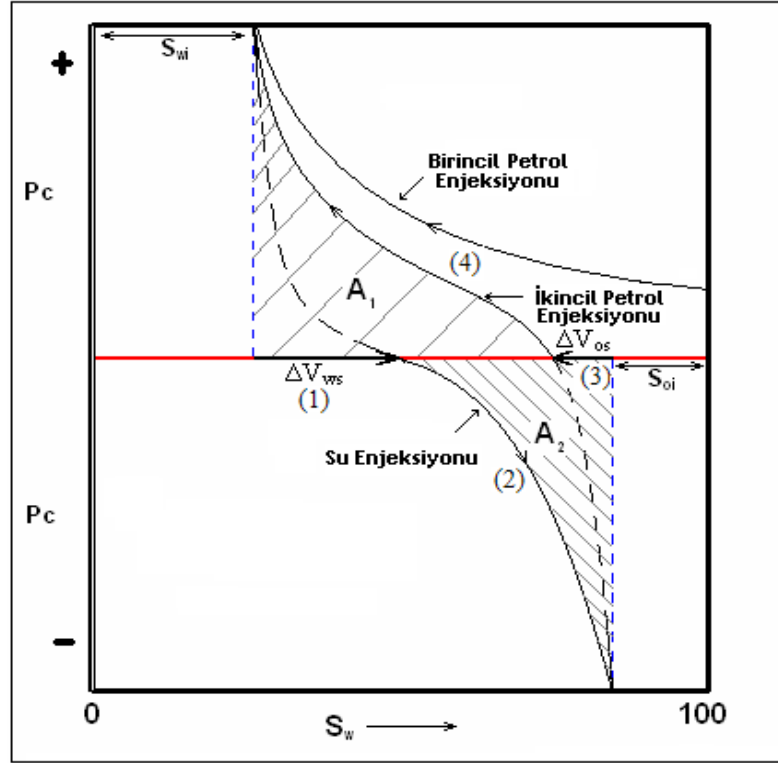
1959 yılında Amott tarafından geliştirilen test, gözenekli kayacın ıslatımlılığını petrol/su/kayaç sisteminin yerdeğiştirme özelliklerinin bir fonksiyonu olarak ölçerek tanımlayabilmek amacı ile yapılmıştır. Amott testi dört ana çalışma mekanizmasını içinde barındırır (Şekil 2.7). Bunlar, (1) suyun petrol ile kılcal kuvvetler etkisinde (kılcal imbibisyon) yer değiştirmesi, (2) aynı sistem üzerinden suyun bir santrifüj prosedürü kullanılarak viskoz kuvvetler etkisinde (enjeksiyon) yer değiştirmesi, (3), petrolün su ile kılcal kuvvetler etkisinde yer değiştirmesi ve (4) petrolün su ile viskoz kuvvetler etkisinde yer değiştirmesi mekanizmalarıdır. Buradan hareketle, kılcal yer değiştirme hacminin toplam yerdeğiştirmeye oranı kullanılarak ıslatımlılık indeksi tanımlanır.

Kuvvetli su ıslatımlı olan kayalarda su ile yerdeğiştirme oranı 1.00'e yaklaşırken, petrol ile yer değiştirme oranının sıfıra yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Kuvvetli petrol

ıslatımlı özellik gösteren kayalarda ise bunun tam tersi sonuçlar elde edilir. Nötr ıslatımlı kayalarda ise her iki oranda da sıfır ya da sıfıra yakın değerler görülür (Amott, 1959). Ayrıca Amott ıslatımlılık indeksi, petrolle yerdeğiştirme oranı ($V_{osp} / V_{ot} = \delta_o$) ve su ile yer değiştirme oranının ($V_{wsp} / V_{wt} = \delta_w$) farkı alınarak da tanımlanabilir. Yani Amott indeksi,

$$I_w = (V_{wsp} / V_{wt}) - (V_{osp} / V_{ot}) = \delta_w - \delta_o \quad (2.36)$$

şeklinde de tanımlanabilmektedir (Donaldson ve Tiab, 1996).



Şekil 2.7 : AMOTT ıslatımlılık indeksi grafiği.

2.6.3. USBM İslatımlılık İndeksi

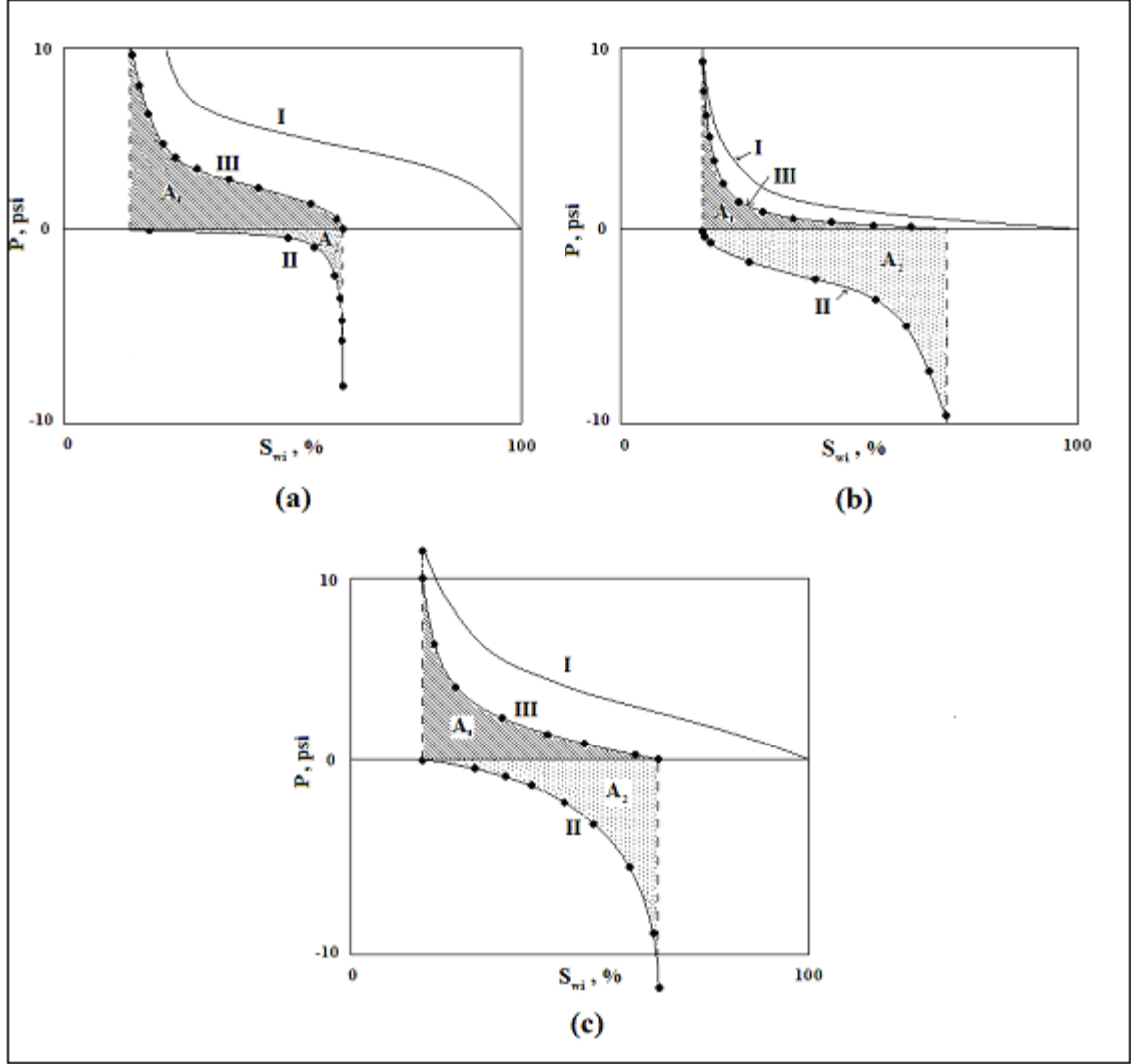
USBM (United States Bureau of Mines) yöntemi, kılcal basınç eğrileri yardımı ile tuzlu su ve petrol içeren gözenekli ortamın ıslatımlılığını ölçmeye yarayan nicel bir yöntemdir. İslatımlılık tahmininde, görel geçirgenlik verilerinin kullanımı, kılcal emme, yerdeğiştirme basıncı, kılcal basınç ve kılcal emme ile yerdeğiştirmenin kombinasyonu

olan Amott indeksi gibi nitel yöntemler kullanılabilir. Bu tahmin yöntemleri kayaçların su ya da petrol ıslatımlı olup olmadıklarını belirleyebilmekte fakat bu ikisinin arasındaki ara ıslatımlı bölgede tatmin edici sonuçlar verememektedir. Bu noktada USBM'in geliştirdiği ıslatımlılık tahmin yöntemi kuvvetli su ıslatımlı ve kuvvetli petrol ıslatımlı sistemlerin haricinde tatmin edici bir numerik ıslatımlılık analizi yapabilmeyi mümkün kılmaktadır (Donaldson ve diğ. 1969). USBM testinde, öncelikle S_{wi} , ilk su doymuşluğu değerinden başlanarak belirli aralıklarla hızı arttırılan bir santrifüj mekanizması ile yapılan petrolün su ile kuvvet uygulanarak ötelenmesi bölümü sistemin birinci aşamasını oluşturur. Daha sonra elde edilen santrifüj verisinden kılcal basınç eğrileri çıkarılarak kuvvet uygulanarak yerdeğiştirme eğrisinin altında kalan alan, A_2 , belirlenir. Bu aşamadan sonra karot örneği, bu kez santrifüj yöntemi kullanılarak suyun petrol ile ötelenmesi mekanizmasını tanımlayan drenaj eğrisi elde edilen verilerden yararlanarak çizdirilir. Drenaj eğrisinin altında kalan alan, A_1 , saptanarak USBM ıslatımlılık indeksi aşağıdaki formül ile tanımlanır (Anderson, 1986b).

$$N_{USBM} = \log\left(\frac{A_1}{A_2}\right) \quad (2.37)$$

Islatmayan fazın ıslatan fazı ötelemesi her zaman ıslatan fazın ıslatmayan fazı ötelemesinden daha fazla enerji gerektirir. Bu yüzden kılcal basınç eğrilerinin altındaki alanların oranı ıslatımlılık derecesini gösteren önemli bir parametredir (Donaldson ve Tiab, 1996).

Su ıslatımlı durumda (Şekil 2.8a) A_1 taralı alanı A_2 taralı alanından büyük iken, petrol ıslatımlı durumda (Şekil 2.8b) A_2 alanı A_1 'den büyüktür. Nötür ıslatımlı durumda (Şekil 2.8c) ise, iki alan yaklaşık olarak birbirlerine eşittir.



Şekil 2.8 : USBM İslatımlılık indeksi grafiği.

2.6.4. İnce Tabaka Yükselim (Thin Layer Wicking) Yöntemi

1994 yılında Van Oss tarafından toz halindeki katıların temas açılarını saptayabilmek amacı ile kılcal yükselim yöntemine alternatif olarak geliştirilen yöntemdir (Van Oss, 1994; Yıldırım, 2001). İnce Tabaka Yükselim tekniği ilk olarak Chaudhury tarafından ortaya atılmış olup temeli Washburn eşitliğine dayanmaktadır (Giese ve Van Oss, 2002). Yöntem, 2005 yılında Karagüzel ve diğ. tarafından da uygulanarak toz haline getirilmiş minerallerin yüzeylerini karakterize etmek için kullanılabilecek uygun bir yöntem olduğu anlaşılmıştır. Bu teknikte, toz parçacıklı sıvı süspansiyonu ince cam yüzeye sürme yöntemi kullanılarak yayılır. Yapılan sürme işlemi sırasında mikroskobik boyutta

farklı yarıçaplara sahip toz parçacıkları için sabit bir yarıçap belirlemek gereklidir. Bu yüzden Washburn eşitliğindeki r yarıçapının yerine ortalama tanecik yarıçapı olarak tanımlanan r^* getirilir. Belirli bir süre kurutulan örnek daha sonra deney sıvısına dikey olarak batırılır ve toz yüzeydeki sıvı yükselmesine göre l uzunluklarındaki t zamanları kaydedilir (Öztorun, 2006). Washburn eşitliğinin İnce Tabaka Yükselim yöntemine uyarlanmış hali;

$$\frac{l^2}{t} = \frac{r^* \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{2\mu} \quad (2.38)$$

şeklinde yazılabilir. Buradan hareketle, hesaplanan hız değeri Washburn eşitliğinde yerine koyarak temas açısı belirlenir.

2.6.5. Kılcal Tüp Yükselim Yöntemi

Rezervuar kayaçlarını tek bir mineralle temsil ederek kayaç ıslatımlılığını belirlemek kesin sonuç elde edilmesini önleyeceğinden, kayaçları heterojen yapılarıyla ele alarak ölçüm ve hesaplamaları bu heterojen yapılara göre uygulayabilen alternatif yaklaşımların varlığı büyük önem arz etmektedir (Wolfrom ve diğ., 2002). Edward Washburn kılcal akışın dinamiğini incelemiş ve laminer akış durumunda bir sıvının kılcal boruya giriş hızını araştırmıştır. Washburn tarafından formüle edilmiş olan sıvının kılcal borudaki ilerleme hızı, hareket eden menisküslerle oluşturulan temas açısı hesaplamasında kullanılır (Washburn, 1921). Toz partikül yatağı, değişen yarıçaplara sahip kılcal boru demetine benzetilmek sureti ile öğütülerek toz haline getirilmiş numuneler için kılcal boru yarıçapı, partikül yatağının efektif gözenek yarıçapı olarak kabul edilebilir. Bu bağlamda, Kılcal Tüp Yükselim Yöntemi Washburn eşitliğini temel alarak kılcal bir tüp içerisindeki paketlenmiş toz numunelerinin ıslatımlılık karakterinin belirlenmesine olanak tanır.

Yöntem, temas açıları doğrudan ölçülemeyen heterojen ve pürüzlü yüzeye sahip rezervuar kayaçlarının partikül yatağındaki kılcal yükselmesinin ölçülmesi yaklaşımı ile kayacın ıslatımlılığını tanımlar. Silindirik kolon içerisine konularak paketlenen kayaç örneklerine çeşitli ıslatım sıvılarının nüfuz etmesi ile oluşacak olan zamana göre kütleli

değişim değerleri ölçülür ve buradan temas açısı hesaplanır. Hesaplanan temas açısı, o rezervuar kayacının ıslatımlılık karakterini bize tanımlar. 2006 yılında Özturun tarafından yapılan çalışma ile iki boyutlu partikül yatağında kılcal yükselmeyi esas alan İnce Tabaka Kılcal Yükselim yönteminin, heterojen yapıdaki kayaç sistemlerinin ortalama ıslatımlılıklarını güvenilir bir biçimde saptayabilen alternatif bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır. Dolayısı ile Washburn eşitliğini baz alan ince tabaka kılcal yükselim yönteminin 3 boyutlu bir durumu olan Kılcal Tüp Yükselim yöntemi kullanılarak öğütülmüş ve paketlenmiş toz kayaç örneklerinin temas açıları ile rezervuar kayacının ortalama ıslatımlılığı bulunabilir.

$$\frac{m^2}{t} = \frac{C \cdot \rho^2 \cdot \gamma_{LV} \cdot \cos \theta}{\mu} \quad (2.39)$$

Kılcal Tüp Yükselim Yöntemi, Washburn eşitliğinin kütlelenin değişimi için modifiye edilmiş halini (Denklem 2.39) kullanmaktadır. Paketlenmiş toz numunenin zamana göre emdiği ıslatım sıvısı kütlelenin değişiminden yola çıkarak elde edilen ölçüm veri grafiğinin eğimi kullanılmak sureti ile temas açısı hesaplanmaktadır. Elde edilen temas açısı değerleri literatürde verilen ıslatımlılık aralıklarında (Cuiec, 1991) uygun geldikleri yerlere göre sınıflandırılarak kayaçların çeşitli ıslatım sıvılarına göre ıslatımlılık indekslerini çıkartmak mümkündür.

3. DENEYSEL YÖNTEM

Çalışmanın bu bölümünde; farklı özelliklere sahip kayaç örneklerinin kılcal tüp yükselim yöntemi ile ıslatımlılık karakterini saptamak için yapılan deneysel çalışmaya ait yöntem anlatılacaktır. Yapılan çalışmanın aşamaları, sıvı ve katı numunelerin özellikleri, örneklerin deney için hazırlanması, deneysel çalışmada kullanılan donanımlar ve deneysel işleyiş hakkında detaylı bilgi verilerek incelenmiştir.

3.1. Ön Çalışmalar

3.1.1. Toz Numunelerin Hazırlanması

Yapılan çalışmada kullanılan kayaç örnekleri çeşitli aşamalardan geçerek ölçüm için gereken toz boyutuna indirgenirler. Bunun için yüzey ve rezervuar kayaçlarından alınmış olan örneklerle bir dizi işlem uygulanır.

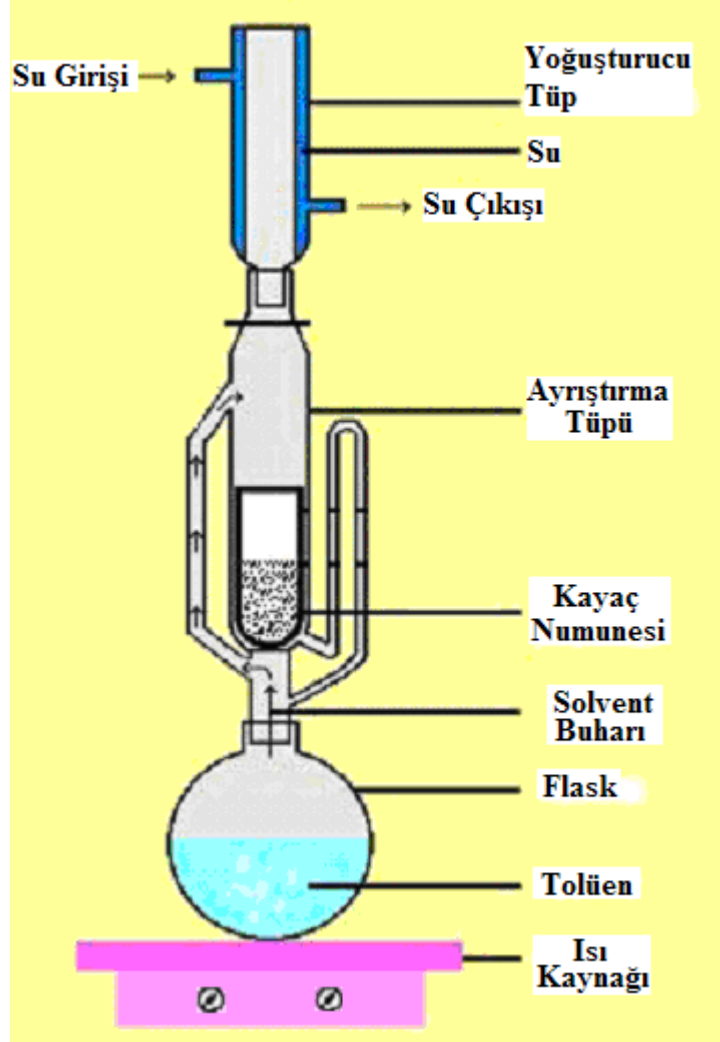
3.1.1.1 Yüzey kayaçlarının hazırlanması

Kılcal tüp yükselim deneylerinde kullanılmak üzere yüzey kayaçlarından alınan katı numuneler bir çekiç yardımı ile kırılarak ufak boyutlara indirgindikten sonra mekanik agat öğütücü yardımı ile parçalanır ve kum boyutuna indirgenir. Numuneler toz haline gelene kadar öğütme işlemi uygulanarak, sonrasında 38 µm boyutundaki ağ elekten geçirilirler. Elek üstünde kalan parçalar öğütücüye tekrar konularak bütün numune istenilen toz boyutuna ulaşana kadar işlem devam eder.

3.1.1.2 Rezervuar kayaçlarının hazırlanması

Yapılan çalışmada Binagadi/Bakü petrol şirketine ait 600 metre derinlikteki 247071 no'lu kuyudan alınmış olan örneklerin ıslatımlılık karakterleri incelenmiştir. Rezervuardan alınmış olan bu örnekler yüzey kayaçlarından alınan örneklerden farklı olarak petrol bileşenleri ihtiva etmektedir. Bu yüzden öncelikle kum haline getirilen bu

örnekler soksetler (Şekil 3.1) yardımı ile damıtılarak petrol ve kum ayrıştırılmıştır. Damıtma işlemi kumun tümüyle temizlenerek renginin normal kum rengine dönmesine kadar devam etmiş ve daha sonra temizlenen kum numunesi diğer numuneler gibi toz boyutuna indirgenerek ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 3.1 : Ayrıştırma İşlemi için Kullanılan Cam Sokset.

3.1.2. Viskozite Ölçümleri

Yapılan çalışmada ıslatım sıvısı olarak kullanılan saydam akışkanların viskozite ölçümleri Cannon Fenske Routine tipi viskozimetre (Şekil 3.2) ile yapılmıştır. Cannon cam tipi viskozimetreler ASTM test yöntemini kullanarak viskozite değerinin saptanmasına olanak verir. Viskozimetreler Tablo 3.1’de gösterildiği gibi önerilen viskozite aralıklarına göre seçilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Buna göre, viskozite ölçüm deneyleri, saf su, gazyağı, dodekan ve %2’lik tuzlu su çözeltileri için, 50, mineral yağı için ise 100’lük boyutta viskozimetre kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.2 : Cannon Fenske Viskozimetresi.

Viskozite ölçüm deneyleri yapılmadan önce bütün cam materyaller su ile yıkanmış ve saf su ile durulanmış ve daha sonra biriken organik bileşenlerin ve atıkların tam anlamı ile cam yüzeyden sökülebilmesi için 2 gün boyunca kromik asit doldurularak bekletilmiştir. Bu işlemde sonra cam yüzeyde kalan nemi tamamı ile almak amacı ile viskozimetreler fırında bekletilmişlerdir. Her bir sıvı numunenin farklı sıcaklıklarda ölçümlerinin yapılabilmesi amacı ile viskozimetre sabit sıcaklık ayarı yapılabilen bir su banyosunun içine yerleştirilmiştir.

Sıvı numune ile doldurulan ölçüm aleti su banyosuna konular ve sistemin termodinamik olarak dengeye gelmesi amacı ile yaklaşık olarak 15 dakikalık bir bekleme süresi ardından ölçümler gerçekleştirilir.

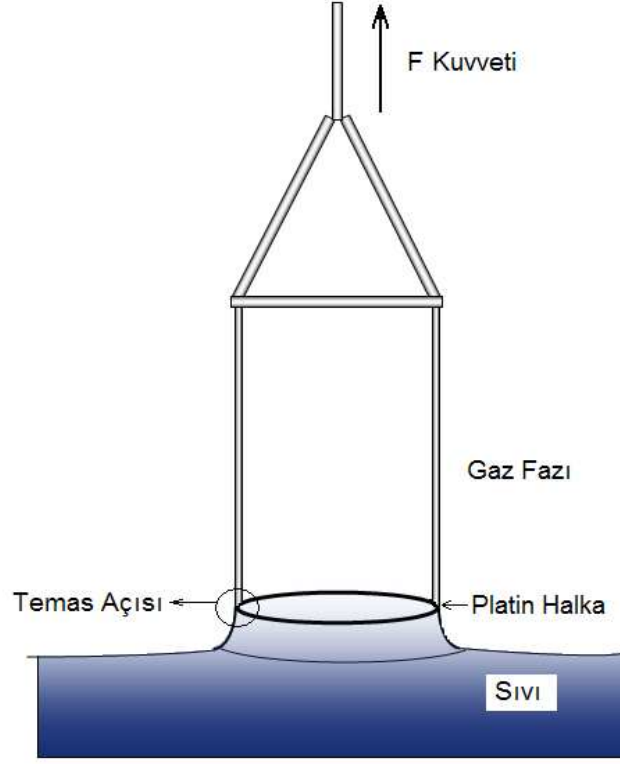
Tablo 3.1 : Cannon Fenske Viskozimetresinin Viskozite Aralıkları.

Boyut	Viskozimetre Sabiti, cSt/s	Aralık, cSt
25	0.002	0.5 - 2
50	0.004	0.8 - 4
75	0.008	1.6 - 8
100	0.015	3 - 15
150	0.035	7 - 35
200	0.1	20 - 100

Kinematik viskozite hesabının mm^2/s cinsinden yapılabilmesi için viskozimetrede kronometre ile ölçülen akış zamanı değeri viskozimetre sabiti ile çarpılır. 40°C ve 100°C 'deki viskozite sabiti değerleri kullanılarak ölçüm sıcaklığındaki değerler interpolasyon yardımı ile belirlenir. Her bir ıslatım sıvısı için viskozite değerleri, elde edilen kinematik viskozite değerlerinin bu sıvıların yoğunluk değerleri (g/ml) ile çarpımı sonucunda $\text{mPa}\cdot\text{s}$ (cP) cinsinden bulunur.

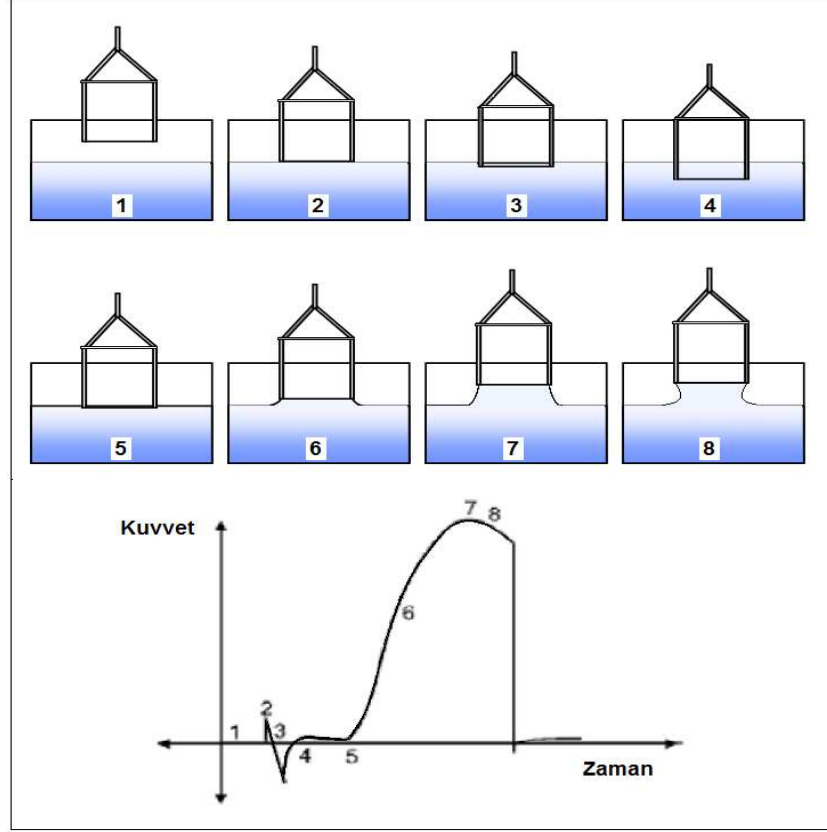
3.1.3 Yüzey ve Ara Yüzey Gerilimi Ölçümleri

Yüzey Gerilimi ölçümleri bir PC yardımı ile kontrol edilen KSV firmasının üretmiş olduğu yüksek performanslı yüzey gerilimi ölçüm aleti ile gerçekleştirilmiştir. Windows tabanlı çalışan bir yazılımla desteklenen cihaz, ıslatım sıvısının içinde bulunduğu cam kabı hareket ettirmeye yarayan yüksek hassasiyette bir elektronik kaldırma ve bir ucu silindirik ölçüm aparatın bağlı olduğu denge kontrollü tel kancadan oluşur. Silindirik tel aparat yatay olarak ıslatım sıvısı ile temas ettirilerek dengeye getirilir. Silindirik telin üst kısmı hassas terazinin kancasına bağlanır. Genel olarak SIGMA 701 ölçüm aleti yüzey ve ara yüzey gerilimi ölçümlerinde Du Nouy halkası ve Wilhelmy levhası adı verilen iki çeşit ölçüm aparatı kullanır. Bu çalışmada kullanılan ıslatım sıvılarının yüzey-ara yüzey gerilimi ölçümleri du Nouy halkası kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 : Du Nouy Halkası.

Ölçümlerde Du Nouy halkası seçilen akışkanın (sıvı-sıvı, gaz-sıvı) yüzey/ara yüzey alt sınırına kadar otomatik olarak batırılır. Islatım sıvısı kabının bulunduğu tablanın aşağı doğru hassas hareketi ile halka yukarı doğru sabit hızda yükselir ve daha sonra halka orijinal pozisyonuna geri getirilerek ölçüm tamamlanır. Bu işlem sırasında meydana gelen itme ve çekme kuvvetlerinden hareketle, yüzey ve ara yüzey gerilim değerleri elde edilir. İstenilen zaman aralığında istenilen sayıda ölçüm yapılarak bu ölçümlerin ortalaması alınır. Bir işlemin başlangıç ve tamamlanma aşamaları ve uygulanan kuvvetin zamana göre değişimi Şekil 3.4'te verilmiştir. Bununla birlikte, ara yüzey gerilimi ölçümleri yapılırken, iki karışmayan sıvıdan yoğun olanı örnek kabına boşaltılır. Öncelikle daha az yoğunluklu sıvıya batırılan Du Nouy halkası, karışmaz sıvıların ara yüzeyinin birkaç mm altına kadar indirilir.



Şekil 3.4 : Du Nouy Halkası Yöntemi ile Yüzey/Arayüzey Gerilimi Ölçüm İşlemi.

Ölçümlerin başlaması ile birlikte halka hafif olan sıvıya doğru sabit hızda yükseltilir ve yüzey gerilimi saptanması işlemindeki aynı aşamalar gerçekleştirilerek ara yüzey gerilimi hesaplanır.

3.2 Malzemeler

3.2.1 Katı Örnekler

Bu çalışmada İstanbul Teknik Üniversitesi Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü tarafından temin edilen saf kuvars ve kalsit numuneleri, Berea ve Bentheim formasyonlarından elde edilmiş kumtaşı numuneleri, Şişecam tarafından temin edilen çeşitli Bilecik kumtaşı numuneleri, Türkiye'nin Güneydoğu bölgesi petrol sahalarından elde edilen çeşitli karbonatlı kayalar ve Binagadi petrol şirketi tarafından temin edilen Bakü/Binagadi sahası kuyularından alınan numuneler kullanılmıştır. Kuvars ve kalsit numuneleri farklı bileşenlerde sırası ile kumtaşı ve karbonatlı kayalar gibi rezervuar

kayaçlarının içinde hakim olarak bulunan saf minerallerdir. Örneğin, Bilecik Bayırköy formasyonundan alınan kumtaşı örneklerinin kimyasal analizine bakıldığında yaklaşık olarak %93.25 oranında kuvars içerdiği görülmektedir. Bunun dışında kalsit ve karbonatlı kayaçlarda kimyasal çökeltme sonucunda oluşmuş tortul kayaçlardır. Kalsit, karbonatlı kayaçlarda en kararlı şekilde bulunan mineraldir (Kumbasar ve Aykol, 1993). İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği laboratuvarlarında yapılan karot analiz sonuçlarına göre Berea ve Bentheim kumtaşı numunelerinin gözenekliliği %21 ile %23 aralığında iken Bilecik Bayırköy formasyonundan gelen kumtaşı örneklerinin gözenekliliği %10 ile %22 arasında değişiklik göstermektedir.

3.2.2 Islatım Sıvıları

Bu çalışmada, saf su, gazyağı, mineral yağı ve %2'lik solüsyonlar halinde NaCl, KCl, CaCl₂ ve AlCl₃ çözeltileri ıslatım sıvıları olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte standart sıvı olarak dodekan, dekan, oktan ve heptan arasında en düşük yüzey enerjisine sahip olan ve katı yüzeye tam olarak yayılarak temas açısı 0° elde edilen dodekan (C₁₂H₂₆) kullanılmıştır (Öztorun 2006). Yapılan ölçümlerde saf su ve %2'lik tuzlu su solüsyonları su fazını, gaz yağı ve mineral yağı ise petrol fazını temsil etmektedir. Yüksek derecede rafine edilmiş, renksiz, şeffaf özellikteki mineral yağı Millers Oils Ltd. Brighthouse, İngiltere'den ve gazyağı İzmit Tüpraş rafinerisinden temin edilmiştir. Standart sıvı olarak kullanılan dodekan ile %2'lik çözeltilerde kullanılan sodyum, potasyum, kalsiyum ve alüminyum tuzları ise Merck firmasının ürünleridir. Yapılan ölçümlerde kullanılan sıvıların yoğunluk ve akmaçlık değerleri Tablo 3.2 de verilmiştir.

Tablo 3.2 : Islatım Sıvılarının Yoğunluk ve Akmaçlık Değerleri.

Faz	Islatım Sıvısı	ρ , g/cm ³ (20°C)	μ , cp (20°C)
Petrol Fazı	Gazyağı	0.804	1.353
	Mineral Yağı	0.860	22.310
Su Fazı	Saf Su	1.000	1.014
	%2 NaCl	1.024	1.070
	%2 KCl	1.017	1.100
	%2 CaCl ₂	1.033	1.041
	%2 AlCl ₃	1.008	1.163

%2'lik tuzlu su çözeltileri ağırlık/ağırlık oranına göre hazırlanmıştır (Ucko, 1982). Bu başka bir deyişle, kütlece çözünen madde miktarının çözelti kütlesine oranı olarak da açıklanabilir. 980 gr saf su için 20 gr seçilen tuzdan karıştırılarak %2'lik tuzlu su çözeltisi elde edilir.

$$\text{Ağırlık/Ağırlık} = \text{Kütlece Katı Miktarı} / (100 \text{ gr çözelti için}) \quad (3.1)$$

Deneysel çalışmada kullanılan bütün ıslatım sıvıları cam kaplarda, karanlık ve serin ortamda saklanmışlardır. Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen, sıvıların yüzey ve ara yüzey gerilim değerleri Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3 : Islatım Sıvılarının Yüzey ve Ara Yüzey Gerilimi Değerleri.

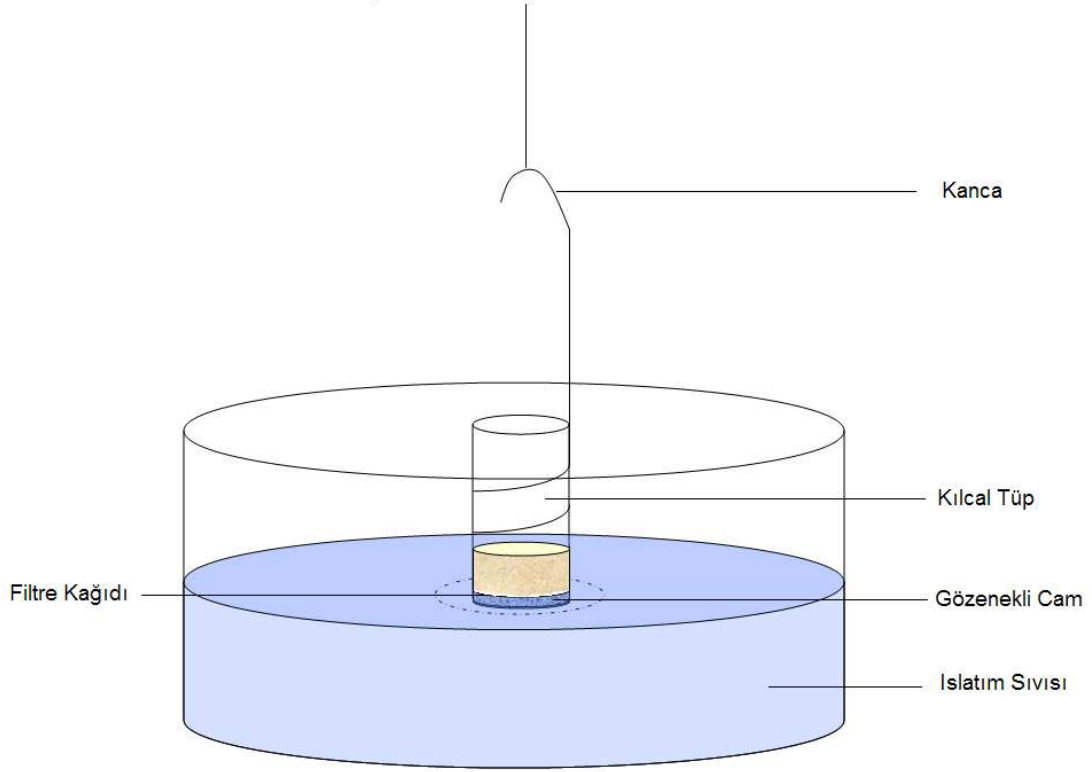
Islatım Sıvısı	γ , dyn/cm (20°C)
Gazyağı	29.90
Mineral Yağı	33.91
Saf Su	72.30
%2 NaCl	72.60
%2 KCl	72.80
%2 CaCl ₂	72.50
%2 AlCl ₃	73.10
Gazyağı-Saf Su	43.50
Gazyağı-%2 NaCl	36.61
Gazyağı-%2 KCl	25.84
Gazyağı-%2 CaCl ₂	32.80
Gazyağı-%2 AlCl ₃	36.86
Mineral Yağı-Saf Su	34.27
Mineral Yağı-%2 NaCl	28.83
Mineral Yağı-%2 KCl	20.36
Mineral Yağı-%2 CaCl ₂	25.72
Mineral Yağı-%2 AlCl ₃	29.04

3.3 Kullanılan Donanımlar

Bu bölümde, paketlenmiş toz numunenin ıslatımlılık karakterinin belirlenmesi esasına dayanan kılcal tüp yükselim yöntemi deneylerinde kullanılan ana donanımlar maddeler halinde gösterilecektir.

3.3.1 Kılcal Tüp

Kılcal tüp, kılcal yükselim deneyinin gerçekleştiği, katı toz numunenin içine yerleştirilerek paketlenildiği ortamdır. KSV firması tarafından üretilen kılcal tüpün standart olarak, iç çapı 1cm, dış çapı 1,2 cm ve yüksekliği 2.5 cm dir. Alt kısmında gözenekli ve sıvıyı tamamı ile iletebilen cam malzemedan yapılmış 0.2 cm kalınlığında geçirgen bir plaka bulunur (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 : Kılcal Tüp Mekanizması.

Bu kısım alt tarafından temas halinde olduğu ıslatım sıvısını üst kısımdaki paketlenmiş toz numuneye iletme görevi görür. Dolayısı ile gözenekli cam kısmın kesinlikle temiz ve homojen olması gerekmektedir. Bu yüzden, toz örneğin bu gözenekli cam kısım ile temas ederek zaman içerisinde gözeneklere yerleşmesini önlemek için Baroid firmasının ürettiği özel sertleştirilmiş oldukça geçirgen filtre kâğıtları kullanılır. Filtre kâğıdı, kılcal tüp ile birlikte Sigma 701 gerilim ölçerine tanıtılır. Cam malzemedan

yapılmış olan kılcal tüpün temizliği de test sonuçlarını etkileyebilen önemli bir faktördür. Cam yüzey üzerinde oluşacak herhangi bir kir, pislik ya da bir önceki ölçümden kalmış olan malzeme diğer toz tabakanın itme çekme kuvvetlerini etkileyerek kılcal yükselimin yanlış sonuç vermesine neden olabilir. Bu yüzden, her ölçüm sonrasında ıslatım sıvısının özelliğine göre bir dizi temizlik prosedürü uygulanır. Daha sonra tüm cam yüzeyin tam anlamı ile kuruması için 110-115°C sıcaklıktaki etüvde 60 dakika süre ile bekletilir. Kuruma sağlandıktan sonra yeni toz numunenin paketleme işlemi yapılarak bir sonraki ölçüme geçilir.

3.3.2 Toz Islatımlılığı Ölçüm Aleti (Sigma 701)

Seçilen kayaç numunelerinin ıslatımlılık indeksi, KSV firması tarafından üretilen Sigma 701 model gerilim ölçerin toz ıslatımlılığı ölçüm özelliği kullanılarak saptanmıştır. Sigma 701, Edward Washburn'n kütlenin zamana göre değişimini temel alan eşitliğine göre toz ve gözenekli katıların temas açılarını saptamak üzere dizayn edilmiş çok hassas bir ölçüm aletidir (şekil 3.6).



şekil 3.6 : Toz Islatımlılığı Ölçüm Aleti.

Yüzey gerilimi ölçülerinde de bahsedildiği üzere Windows tabanlı bir program yardımı ile çalışan Sigma 701 aleti, ıslatım sıvısının içinde bulunduğu cam kabı hareket ettirmeye yarayan yüksek hassasiyette bir elektronik kaldıraç mekanizmasına sahiptir. Üst kısımda ise toz ıslatımlılığı deneyinin gerçekleşeceği ortam olan kılcal tüp bulunur. Sigma 701'in sahip olduğu yazılım sayesinde yapılacak ölçümde kullanılacak olan ıslatım sıvıları ve kayaç numuneleri sahip oldukları özellikleri ile birlikte kayıt altına alınabilmektedir. Ayrıca, kullanılan kılcal tüpün, ve ıslatım sıvısı kabının özellikleri ile basınç, sıcaklık gibi ortam özellikleri de benzer şekilde deney öncesinde kayıt edilebilmektedir.

Washburn eşitliğini kullanan alet ölçüm sonrasında elde edilen kütle-zaman grafiğinin eğimi, referans sıvı ölçüm sonuçları ile ıslatım sıvısının yoğunluğu, akma hızı ve yüzey gerilimi değerlerini kullanarak $C \cdot \cos(\theta)$ değeri elde edilir. Burada, C , katı numunenin cinsine göre değişen ve referans sıvı temel alınarak hesaplanan materyal sabitidir. Referans sıvı tanımlanarak C değeri otomatik olarak ölçüm sonucuna yansıtılır ve $\cos(\theta)$ değeri elde edilir.

3.3.3 Hassas Teraziler

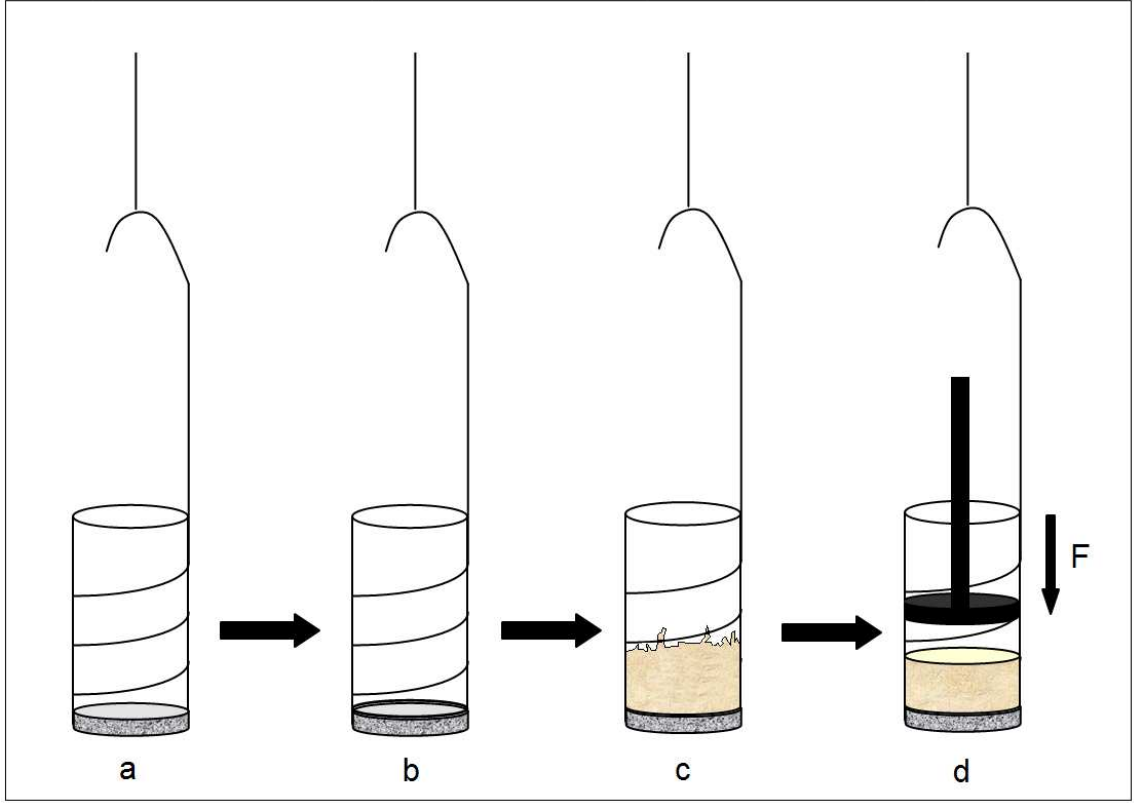
Kılcal tüp yükselme deneylerinde kullanılan Sigma 701 aleti hassas ölçümler yapan ve maksimum 5 gr ağırlık kaldırabilen bir alettir. Dolayısıyla konulacak olan toz numunenin kütlelerinin en hassas şekilde ve bütün numunelerde aynı kütle değerinde alınması gerekmektedir. Bunun için 0.1 mg hassasiyetli terazi kullanılmıştır.

3.4 Yöntem

Bu bölümde yapılan deneysel çalışmanın uygulanma yöntemi aşamalar halinde anlatılacaktır.

3.4.1 Deney Öncesi Kılcal Tüpün Hazırlanması

Kılcal tüp, rezervuar kayaçlarının farklı ıslatım sıvılarına karşı davranışlarını ve ıslatımlılık karakterlerini belirlemek amacıyla yapılan toz ıslatımlılığı ölçümlerinin gerçekleştirildiği ortamdır (Şekil 3.7a). Aşağıda, ölçümlere başlamadan önce kılcal tüpe uygulanan işlemler sırası ile açıklanmıştır.



Şekil 3.7 : Kılcal Tüpün Hazırlanması.

3.4.1.1 Kılcal tüpün temizlenmesi

Temiz ve yabancı malzemeden arıtılmış bir ortamda ölçümlerin gerçekleştirilmesi çok büyük önem arz etmektedir. Bunun için 2006 yılında Öztörün tarafından geliştirilen ve kullanılan temizlik prosedürleri uygulanmış, hidrokarbon içeren ölçümlerden sonra sırası ile etanol, tolüen, saf aseton, deterjan, su ve saf su kullanılırken, hidrokarbon içermeyen, tuzlu su ve saf suyun ıslatım sıvısı olarak kullanıldığı ölçümlerde sırası ile saf aseton, deterjan, su ve saf su temizleme malzemesi olarak kullanılmıştır. Kılcal tüp üzerinde kalan su, deney esnasında ıslatım sıvısı ile temas ederek sıvının yüzey gerilimi ve akma özelliğini değiştirir ve bu numunenin kılcal yükselme davranışının değişmesine yol açabilir (Karagüzel ve diğ., 2005). Bu yüzden, temizleme işleminin ardından kılcal tüp, yüzeyinde ve gözenekli cam kısımda kalan su parçacıklarının ve nemin tamamı ile yüzeyden alınabilmesi amacı ile 1 saat boyunca 110°C sıcaklıkta etüvde bekletilmiştir.

3.4.1.2 Filtre kâğıdının tüp içerisine yerleştirilmesi

Kılcal tüpün etüvde bekletilmesi işlemi tamamlandıktan sonra, filtre kâğıdının yerleştirilmesi işlemine geçilir. Kurumuş ve temiz durumda olan tüpün alt kısmında bulunan gözenekli cam bölümün üst noktasına, ıslatım sıvısının düzgün ve homojen bir şekilde toz numuneye yayılabilmesi ve gözeneklerin içine toz numunenin kaçmasını engellemek amacı ile özel sertleştirilmiş geçirgen bir filtre kâğıdı yerleştirilir. Filtre kâğıtları kılcal tüpün iç çapı ile (1cm) aynı boyutta düzgün şekilde kesilir ve kılcal tüp tabanını tam olarak kaplar (Şekil 3.7b).

3.4.1.3 Toz örneklerin kılcal tüpe yerleştirilmesi

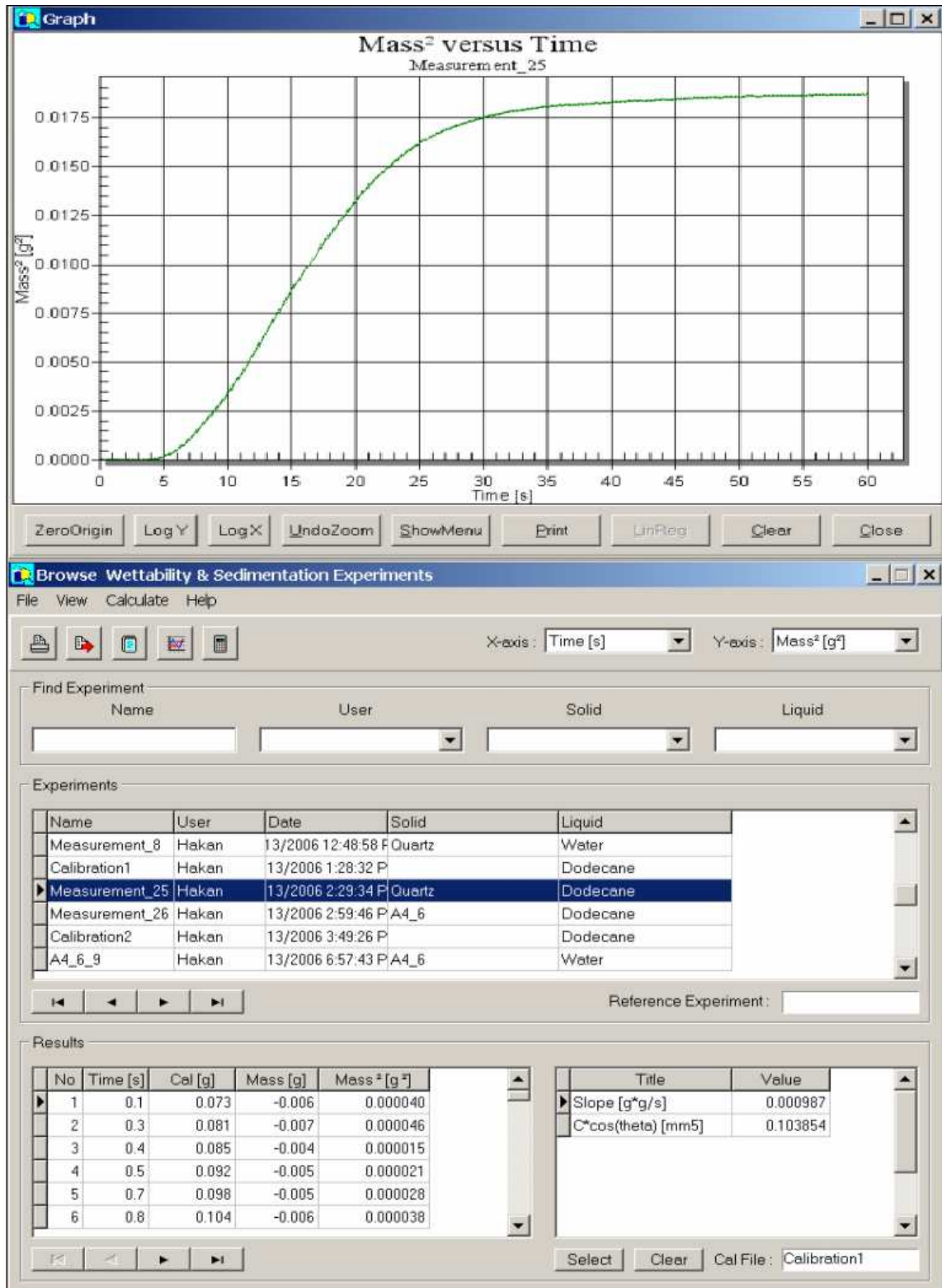
Ölçümü yapılacak olan toz haline getirilmiş numuneler hassas terazi yardımı ile tartıldıktan sonra kılcal tüp içerisine yerleştirilirler (Şekil 3.7c). Sigma 701 ölçüm aletinin toplam ölçüm ağırlığı maksimum 5 gr ve kılcal tüpün ağırlığı da yaklaşık olarak 2.5 gr olduğundan ölçümlerde kullanılan tüm numunelerin ağırlığı 2 gr alınmıştır.

3.4.1.4 Paketleme işlemi

Belirlenen kütlede hazırlanmış olan toz numuneler kılcal tüpe yerleştirildikten sonra tüpün iç çapı ile aynı boyuta sahip bir piston yardımı ile paketlenir. Paketleme işlemi sonrasında serbest halde eşit boyutta taneciklere sahip, hacimsel olarak ölçüleri belirli bir yükselim deneyi ortamı oluşturulmuş olur (Şekil 3.7d).

3.4.2 Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü

Paketlenen numune kılcal tüpün üst kısmındaki kanca yardımı ile kılcal tüp yere tam anlamıyla paralel olacak şekilde tutturulur. Sigma 701 aleti ıslatım sıvısı kabı olarak küçük (55ml) ve standart (110 ml) kap olmak üzere 2 farklı kap kullanılmaktadır. Yapılan bütün ölçümler standart kap kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Islatım sıvısı kabı ve kılcal tüpün hareketsiz halde dengeye gelmesi sağlandıktan sonra PC bağlantısı kontrol edilerek KSV araştırma laboratuvarları tarafından geliştirilen “sgserver” yazılımı çalıştırılır.



Şekil 3.8 : SGSERVER Yazılımı

Sgsrserver, kılcal tüp ve ıslatım sıvısının konumunu aldığı referans noktasına göre belirleyen, tüpün ıslatım sıvısı/hava ara yüzeyine temas anı, kılcal tüpün temas ettikten sonra sabitleneceği nokta, saniyede alınacak ölçüm sayısı gibi parametrelerin önceden belirlenerek mümkün olabilecek en hassas ölçümü yapmaya olanak tanıyan bir programdır (Şekil 3.8). Gerekli parametreler ile birlikte ıslatım sıvısı ve kayaç numunesinin fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirten parametreler belirlenen ölçüm numarası ile birlikte veri olarak kaydedilerek ölçüm işlemine başlanır.

3.4.2.1 C sabitinin belirlenmesi

C sabiti, referans sıvısını temel alan ve katı malzemenin cinsine bağlı olarak değişen bir materyal sabitidir. Yapılan çalışmada katı yüzeye en fazla yayılma kabiliyeti gösterdiği saptanan dodekan referans sıvı olarak kullanılmıştır. Kılcal tüp yükselim deneyi ile referans sıvı ve istenilen katı malzemenin zamana göre kütle değişim verileri elde edildikten sonra, sgsrserver yazılımı $C \cdot \cos(\theta)$ değerini hesaplar. Düşük yüzey enerjisine sahip dodekan sıvısı yüzeye tam olarak yayılarak temas açısını sıfırlayacağından dolayı $\cos(\theta)$ değeri 1'e eşit olur ve materyal sabiti, C , elde edilir. Elde edilen materyal sabiti aynı katı malzeme için Washburn eşitliğinde yerine konularak katı malzemenin istenilen ıslatım sıvıları ile olan temas açıları belirlenir.

3.4.2.2 Temas açısı saptanması

Yüzey gerilimi, akma ve yoğunluk değerleri ile birlikte standart sıvı ile yapılan ölçümler sonucunda materyal sabiti de saptandıktan sonra, kayaç numunelerinin farklı ıslatım sıvıları ile olan toz ıslatımlılığı ölçümlerine geçilir. C sabiti ölçümündeki prosedür aynen uygulanarak $C \cdot \cos(\theta)$ değeri istenilen ıslatım sıvısı ve toz numune için elde edilir. Toz numunenin materyal sabiti, C , bilindiğinden dolayı $\cos(\theta)$ değeri ve dolayısı ile de temas açısı, θ , hesaplanır. İşlemler her bir toz numune ve ıslatım sıvısı için 3'er kez tekrarlanarak elde edilen temas açısı değerlerinin ortalaması alınarak kayaçların ıslatımlılık indeksi çıkartılır. Elde edilen temas açısı değerleri, kayacın ıslatımlılık indeksini belirlememize ve diğer kayaçlar ile arasında bir kıyaslama yapmamıza olanak tanır.

3.5 Hesaplamalar

Çalışmanın bu bölümünde kütlenin zamana göre değişim verilerinden hareketle numunenin ıslatımlılık karakterinin saptanması için gereken hesaplamalar anlatılacaktır.

3.5.1 Temas Açısının Hesaplanması

DeneySEL çalışmada kullanılan toz ıslatımlılığı ölçüm aleti, Sigma 701 bağlı olduğu PC'deki yazılım sayesinde kütlenin karesinin zamanla değişim verileri doğrudan grafiksel olarak elde edilebilmektedir (Şekil 3.9a). Bu grafiğin doğrusal olduğu bölgenin eğimi (m^2/t) Denklem 2.35'de belirtildiği üzere Washburn eşitliğinin içinde bulunmaktadır. Bu grafik yardımı ile temas açısı hesaplanır. Örnek hesaplama, Tablo 3.4'de mineralojik kompozisyonu belirtilen ve Bilecik yöresinden alınan BL-22-10 kodlu toz numune için yapılmıştır.

Tablo 3.4 : BL-22-10 Bilecik Numunesinin Mineralojik Kompozisyonu.

Element	Bileşim, %
SiO ₂	93.25
Al ₂ O ₃	4.24
Fe ₂ O ₃	0.4
TiO ₂	0.16
CaO	0.19
MgO	0.08
Na ₂ O	0.02
K ₂ O	0.27
ZrO ₂	0.022
K.K.	1.39

3.5.1.1 Hava-Sıvı-Katı Ara Yüzeyi için Hesaplamalar

Toz numuneler ve ıslatım sıvıları kullanılarak gerçekleştirilen kılcal tüp yükselim deneyinde hava-sıvı-katı ara yüzeyinin temas açısını saptamak amacı ile her bir numune ve ıslatım sıvısı için iki ölçüm yapılmıştır. Bu ölçümlerden ilki yüzeye tamamen yayılarak temas açısını sıfırlayarak *C* sabitini saptamamıza olanak veren referans sıvı (dodekan) ile yapılmıştır. Aynı toz numunenin diğer ıslatım sıvıları ile ölçümü yapıldıktan sonra her ölçüme *C* sabiti tanıtılmak sureti ile standart sıvıya göre diğer sıvıların temas açıları belirlenir.

Öncelikle belirlenen toz numune ve referans sıvı ile kılcal tüp yükselim ölçümü gerçekleştirilir. İstenilen saniye aralıklarında ve istenilen toplam sürede yapılan ölçüm sonucunda elde edilen grafik (Şekil 3.9a) sgserver programı tarafından kaydedilir ve daha sonra aynı programın hesaplama işlemlerinin yapıldığı bölümden kaydedilen grafik açılır. Grafiğin doğrusal olduğu bölgede iki ayrı nokta seçilerek doğrunun eğimi hesaplanır (Şekil 3.9b). Hesaplanan eğim değeri (m^2/t) Washburn eşitliğinde yerine konularak C sabiti aşağıdaki şekilde sgserver programı tarafından otomatik olarak hesaplanır. Aşağıda BL-22-10 kodlu Bilecik/Bayırköy formasyonundan alınmış yüzey kayacı için referans sıvısı (Dodekan) ile hesaplanmış C sabiti değeri görülmektedir.

$$C = \frac{\mu}{\rho^2 \gamma \cos \theta} \frac{m^2}{t} = \frac{1.4930}{0.748^2 \times 25.35} \times 0.00673 = 7.1 \times 10^{-4} \quad (3.1)$$

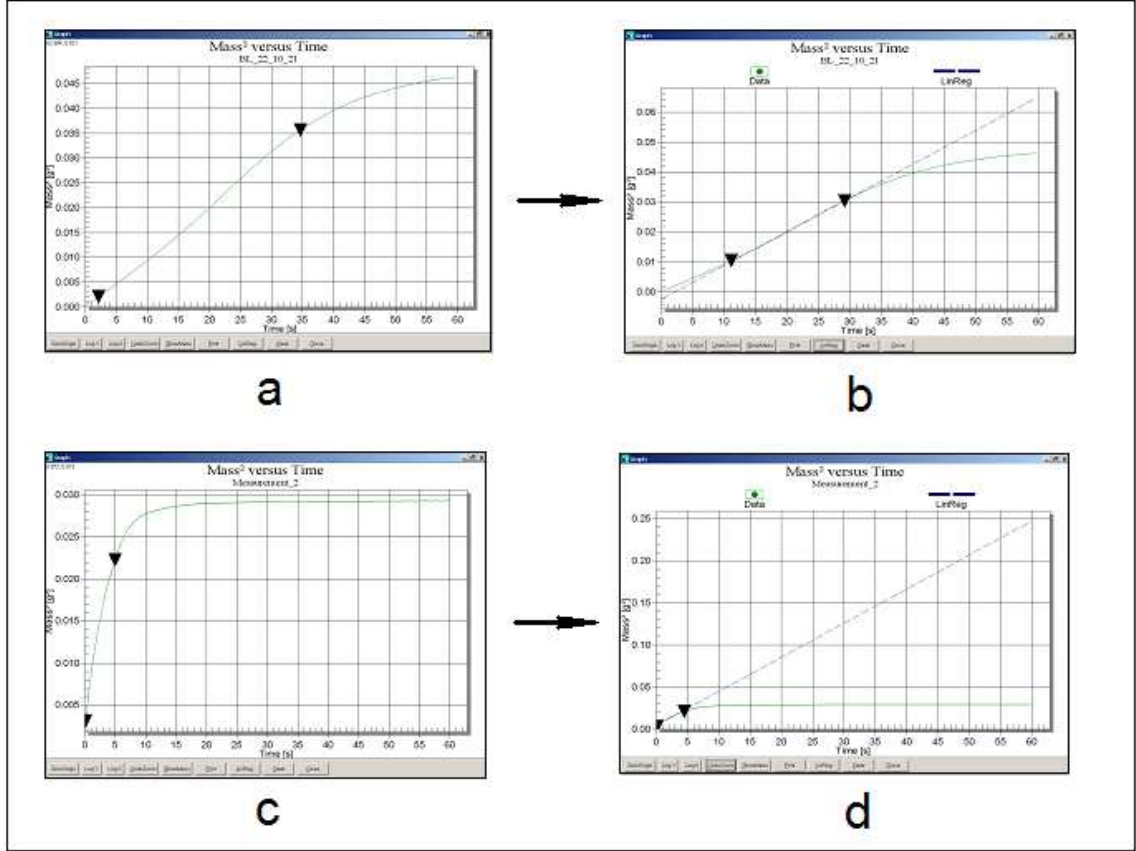
Belirlenen C materyal sabiti artık kullanılan kayacı temsil etmektedir. Aynı kayaçtan alınarak hazırlanmış olan diğer toz numuneleri önceden belirlenen ıslatım sıvıları ile kılcal tüp yükselim deneyi yapıldıktan sonra, belirlenen C sabiti de Washburn eşitliğinde yerine konularak temas açısı değeri saptanır. Örneğin, ıslatım sıvısı olarak kullanılan saf su ile BL-22-10 numunesinin grafiği elde edildikten sonra (Şekil 3.9c), (m^2/t) değeri çizdirilmiş (Şekil 3.9d) ve kılcal tüp yükselim yöntemi uygulanarak elde edilen temas açısı değeri,

$$C \cos \theta = \frac{\mu}{\rho^2 \gamma} \frac{m^2}{t} = \frac{1.0136}{0.998^2 \times 72.3} \times 0.03137 = 4.41 \cdot 10^{-4}$$

$$\cos \theta = 0.621$$

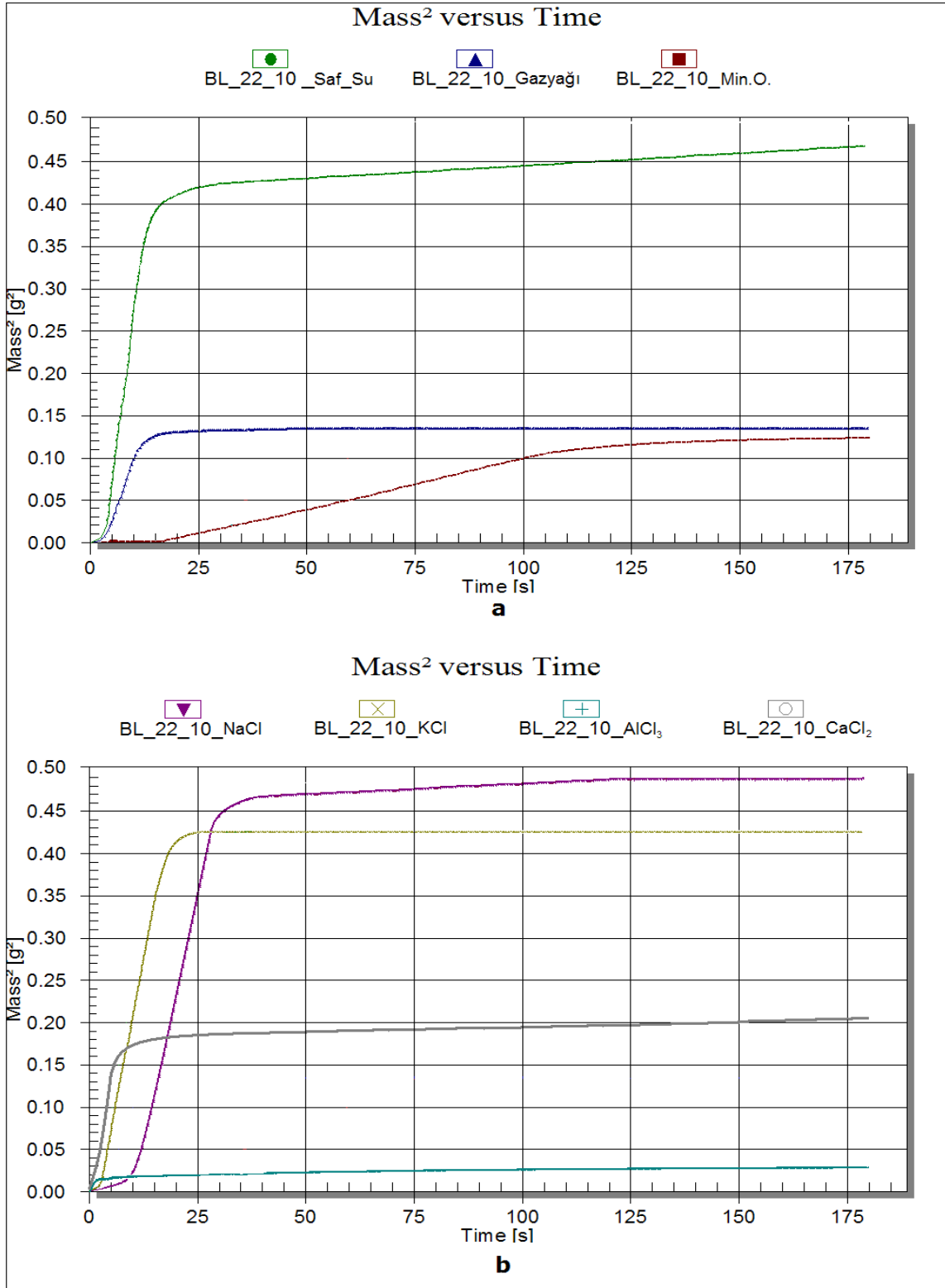
$$\theta = 51.58 \quad (3.2)$$

olarak saptanmıştır.



Şekil 3.9 : Hava-Gazyağı-Kayaç Sisteminde BL-22-10 Numunesi için Temas Açısının Saptanması.

Benzer şekilde, diğer ıslatım sıvıları (gazyağı, mineral yağı, %2'lik NaCl, KCl, CaCl₂ ve AlCl₃ tuzlu su çözeltileri) ile yapılan ölçümler ve sonrasında temas açısı hesaplamaları da aynı katı malzeme için belirlenen *C* sabiti değeri temel alınarak gerçekleştirilmiştir. BL-22-10 numunesi ile kullanılan ıslatım sıvıları için elde edilen grafikler, saf su ve petrol fazını temsil eden gazyağı ile mineral yağı (Şekil 3.10a) ve bunlara ek olarak %2'lik 4 farklı tuzlu su çözeltisi (Şekil 3.10b) sırası ile gösterilmiştir.



Şekil 3.10 : BL-22-10 Numunesinin farklı ıslatım sıvıları ile kılcal tüp yükselim grafikleri.

Bu grafik verilerinden hareketle sgserver programı tarafından ölçülen eğimler ve hesaplanan temas açısı değerleri de Tablo 3.5'te verilmektedir.

Tablo 3.5 : BL-22-10 Numunesinin farklı ıslatım sıvılarına göre temas açısı değerleri.

Islatım sıvısı	BL_22_10 Numunesi
Saf Su	51.58
Gazyağı	8.06
Mineral Yağı	0.00
%2 NaCl	54.41
%2 KCl	51.89
%2 CaCl ₂	46.20
%2 AlCl ₃	43.68

3.5.1.2 Sıvı-Sıvı-Katı Ara Yüzeyi için Hesaplamalar

Sıvı-sıvı-katı ara yüzeyi için temas açısının belirlenmesi, rezervuar kayacı ile temas halinde bulunan iki karışmayan akışkanın, birbirlerine ve o rezervuar kayacına göre nasıl bir davranış gösterdiklerini açıklayabilmek için kullanılabilen önemli bir yardımcı mekanizmadır. Herhangi bir sıvı-sıvı-katı sisteminin temas açısı Denklem 2.4 kullanılarak belirlenebilir. Kılcal tüp yükselim deneyi sonucunda, BL-22-10 numunesinin saf su ve gazyağı ile olan temas açısı değerleri sırası ile 51.58° ve 8.06°, yapılan ölçümler neticesinde saf su ile gazyağının ara yüzey gerilimi 43.5 dyn /cm, saf suyun yüzey gerilimi 72.3 dyn/cm ve gazyağının yüzey gerilimi 29.9 dyn/cm olarak ölçülmüştür. Bu verilerden hareketle, BL-22-10 numunesi ile temas halinde bulunan saf su ve gazyağı sıvıları için temas açısı;

$$\cos \theta_{12} = \frac{(\gamma_{L_1} \cos \theta_1) - (\gamma_{L_2} \cos \theta_2)}{\gamma_{L_1 L_2}} = \frac{72.3 \cos(51.58) - 29.9 \cdot \cos(8.06)}{43.5} = 0.352$$

$$\cos \theta_{12} = \cos^{-1}(0.352) = 69.37^\circ \quad (3.3)$$

olarak hesaplanır. BL-22-10 numunesi için petrol fazını temsil eden gazyağı ve mineral yağı ile su fazını temsil eden saf su ve %2'lik tuz çözeltileri arasındaki tüm temas açısı sonuçları Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6 : BL-22-10 Numunesinin sıvı-sıvı-katı sistemine göre hesaplanan temas açısı değerleri.

	BL_22_10 Numunesi
Saf Su - Gazyağı	69.37
%2 NaCl - Gazyağı	69.79
%2 KCl - Gazyağı	62.29
%2 CaCl ₂ - Gazyağı	51.17
%2 AlCl ₃ - Gazyağı	50.89
Saf Su - Mineral Yağı	73.84
%2 NaCl - Mineral Yağı	76.25
%2 KCl - Mineral Yağı	62.06
%2 CaCl ₂ - Mineral Yağı	57.34
%2 AlCl ₃ - Mineral Yağı	56.94

4. DENEYSEL VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde; kılcal tüp yükselim yöntemi kullanılarak çeşitli ıslatım sıvılarına (su fazı olarak saf su ile %2'lik NaCl, KCl, CaCl₂ ve AlCl₃ tuzlu su kompozisyonları, petrol fazı olarak gazyağı ve mineral yağ) göre kayaç örneklerinden (Kuars, Bentheim, Berea, Bilecik Bayırköy formasyonu örnekleri (BL-22-10, C2-2, A4-6, Bilecik-Şişecam), Kalsit, Çeşitli Karbonatlı kayaç örnekleri (K-232, K-570, K-711, K-859, K-502) ve Binegadi-247071) elde edilen temas açısı değerleri verilmektedir.

4.1 Kuvars Örneği Sonuçları

Kuars örneği için farklı ıslatım sıvıları kullanılarak elde edilen, kütlelerin karesinin zamana göre değişim değerleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Elde edilen eğim değerleri, yoğunluk, akma, yüzey gerilimi ve standart sıvı olarak kullanılan dodekan ölçüm değerleri ile birlikte Washburn eşitliğinde (Denklemler 2.35) yerlerine konularak Kuvars örneği için hava-sıvı-katı (Tablo 4.1) ve sıvı-sıvı-katı (Tablo 4.2) sistemlerinin temas açısı değerleri hesaplanmıştır. Kuvars örneği için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, gazyağı ve mineral yağın tam olarak yüzeye yayılarak temas açısını sıfırladığı görülmektedir.

Tablo 4.1 : Kuvars Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

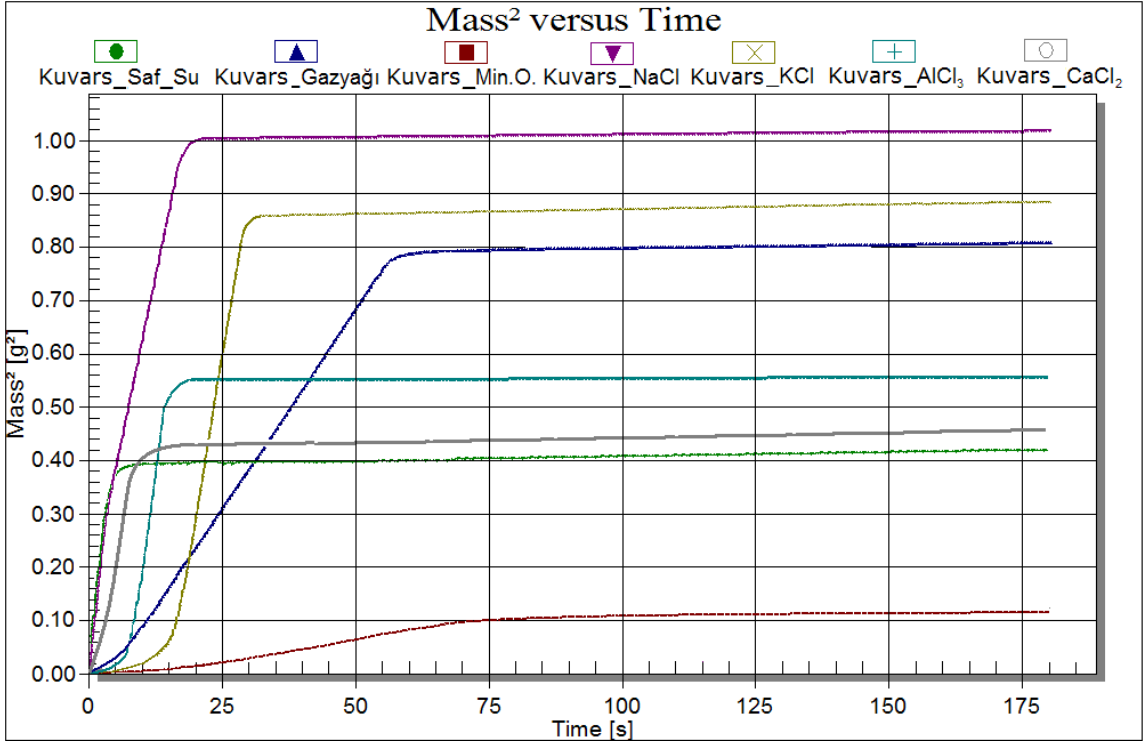
Kayaç	Islatım Sıvısı	θ
Kuars	Dodekan	0.00
Kuars	Saf Su	26.81
Kuars	Gazyağı	0.00
Kuars	Mineral Yağ	0.00
Kuars	%2 NaCl	30.60
Kuars	%2 KCl	32.54
Kuars	%2 CaCl ₂	32.44

Kuvars	%2 AlCl ₃	31.53
--------	----------------------	-------

Tablo 4.2 : Kuvars Örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

Kayaç	Islatım_Sıvısı_1	Islatım_Sıvısı_2	θ_{12}
Kuvars	Gazyağı	Saf Su	39.61
Kuvars	Gazyağı	%2 NaCl	30.69
Kuvars	Gazyağı	%2 KCl	28.02
Kuvars	Gazyağı	%2 CaCl ₂	23.14
Kuvars	Gazyağı	%2 AlCl ₃	31.93
Kuvars	Mineral Yağ	Saf Su	51.30
Kuvars	Mineral Yağ	%2 NaCl	47.75
Kuvars	Mineral Yağ	%2 KCl	53.38
Kuvars	Mineral Yağ	%2 CaCl ₂	45.34
Kuvars	Mineral Yağ	%2 AlCl ₃	48.60

Su fazını temsil eden saf su ve %2'lik tuzlu su çözeltilerinin ise kendi aralarında tutarlı temas açısı değerlerine sahip iken diğer örneklere göre oldukça düşük temas açısı değerleri gösterdiği görülmüştür.



Şekil 4.1 : Kuvars Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.

Bu sonuçlar literatür değerleri ile karşılaştırıldığında, Kuvars örneğinin kuvvetli su ıslatımlı bölgede yer aldığı görülmektedir (Cuiec, 1991).

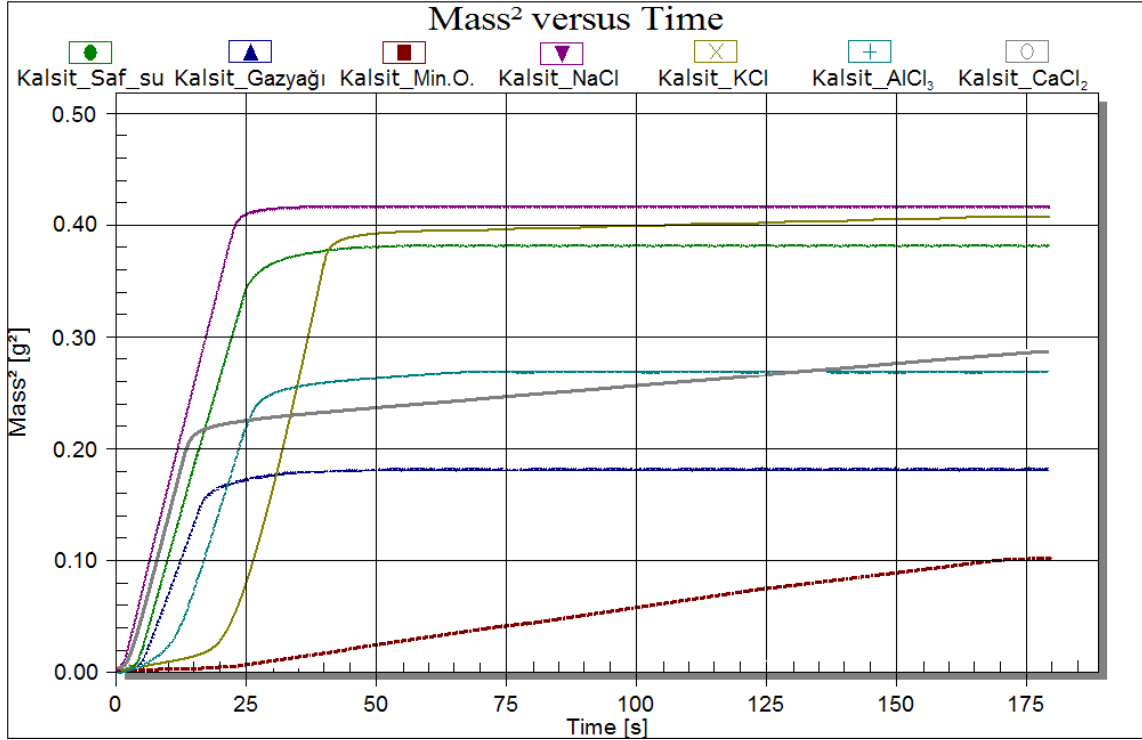
4.2 Kalsit Örneği Sonuçları

Kalsit örneği için farklı ıslatım sıvıları kullanılarak elde edilen, kütlelerin karesinin zamana göre değişim değerleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Elde edilen eğim değerleri, yoğunluk, akma, yüzey gerilimi ve standart sıvı olarak kullanılan dodekan ölçüm değerleri ile birlikte Washburn eşitliğinde (Denklemler 2.35) yerlerine konularak Kalsit örneği için hava-sıvı-katı (Tablo 4.3) ve sıvı-sıvı-katı (Tablo 4.4) sistemlerinin temas açısı değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 4.3 : Kalsit Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

Kayaç	Islatım Sıvısı	θ
Kalsit	Dodekan	0.00
Kalsit	Saf Su	74.61
Kalsit	Gazyağı	0.00
Kalsit	Mineral Yağ	38.86
Kalsit	%2 NaCl	72.00
Kalsit	%2 KCl	69.23
Kalsit	%2 CaCl ₂	74.22
Kalsit	%2 AlCl ₃	70.84

Kalsit örneği için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, gazyağının tam olarak yüzeye yayılarak temas açısını sıfırladığı görülmekte iken mineral yağı da daha yüksek değerler almakla birlikte gazyağı gibi yüzeye yayılma eğilimi göstermiştir. Su fazını temsil eden saf su ve %2’lik tuzlu su çözeltilerinin ise kendi aralarında tutarlı temas açısı değerlerine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.2 : Kalsit Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.

Bu sonuçlar literatür değerleri ile karşılaştırıldığında, Kalsit örneğinin ara petrol ıslatımlı bölgede yer aldığı görülmektedir (Cuiec, 1991).

Tablo 4.4 : Kalsit Örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

Kayaç	Islatım_Sıvısı_1	Islatım_Sıvısı_2	θ_{12}
Kalsit	Gazyağı	Saf Su	104.48
Kalsit	Gazyağı	%2 NaCl	102.03
Kalsit	Gazyağı	%2 KCl	99.46
Kalsit	Gazyağı	%2 CaCl ₂	108.38
Kalsit	Gazyağı	%2 AlCl ₃	99.48
Kalsit	Mineral Yağ	Saf Su	102.15
Kalsit	Mineral Yağ	%2 NaCl	97.91
Kalsit	Mineral Yağ	%2 KCl	91.65
Kalsit	Mineral Yağ	%2 CaCl ₂	105.05
Kalsit	Mineral Yağ	%2 AlCl ₃	94.77

4.3. Bentheim Örneği Sonuçları

Kılcal tüp yükselim ölçümü sonucunda Bentheim örneği için farklı ıslatım sıvıları kullanılarak elde edilen, kütlelerin karesinin zamana göre değişim değerleri Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Elde edilen her bir ıslatım sıvısı grafiğinin eğim değerleri, yoğunluk, akma, yüzey gerilimi, ve standart sıvı olarak kullanılan dodekan ölçüm değerleri ile birlikte Washburn eşitliğinde (Denklem 2.35) yerlerine konularak Bentheim örneği hava-sıvı-katı (Tablo 4.5) ve sıvı-sıvı-katı (Tablo 4.6) sistemleri için temas açısı değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 4.5 : Bentheim Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Temas Açısı Değerleri.

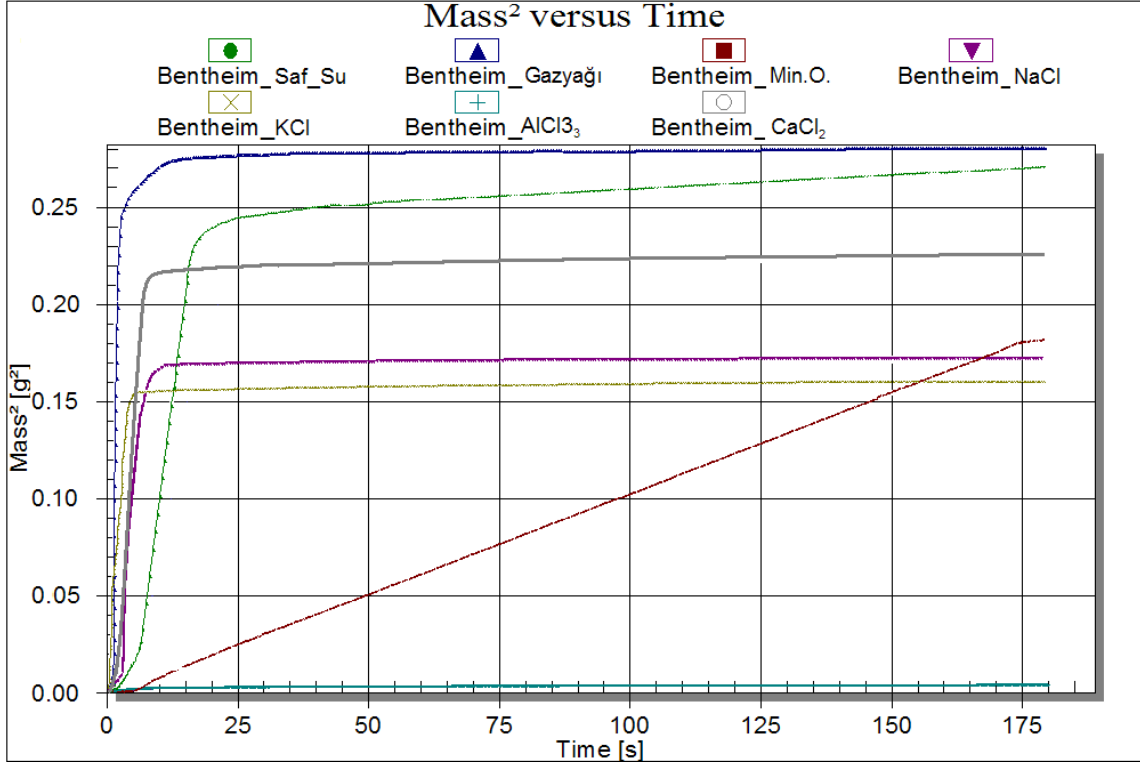
Kayaç	Islatım Sıvısı	θ
Bentheim	Dodekan	0.00
Bentheim	Saf Su	66.03
Bentheim	Gazyağı	25.71
Bentheim	Mineral Yağ	39.51
Bentheim	%2 NaCl	69.27
Bentheim	%2 KCl	69.08
Bentheim	%2 CaCl ₂	67.44
Bentheim	%2 AlCl ₃	65.34

Elde edilen temas açısı değerlerine bakıldığında, gazyağının en düşük açı değerini verdiği, başka bir deyişle ıslatım sıvıları arasında Bentheim örneği yüzeyine yayılma özelliği en fazla olan ıslatım sıvısı olduğu görülmektedir.

Tablo 4.6 : Bentheim Örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

Kayaç	Islatım_Sıvısı_1	Islatım_Sıvısı_2	θ_{12}
Bentheim	Gazyağı	Saf Su	84.84
Bentheim	Gazyağı	%2 NaCl	89.64
Bentheim	Gazyağı	%2 KCl	88.82
Bentheim	Gazyağı	%2 CaCl ₂	85.89
Bentheim	Gazyağı	%2 AlCl ₃	82.15
Bentheim	Mineral Yağ	Saf Su	82.46
Bentheim	Mineral Yağ	%2 NaCl	88.38
Bentheim	Mineral Yağ	%2 KCl	86.86
Bentheim	Mineral Yağ	%2 CaCl ₂	83.45
Bentheim	Mineral Yağ	%2 AlCl ₃	78.84

Bununla birlikte mineral yağının da gazyağı gibi su fazı olarak kullanılan ıslatım sıvılarından daha düşük temas açısı değerine sahip olduğu anlaşılmıştır. Su fazını temsil eden örneklere bakıldığında ise petrol fazına göre daha yüksek temas açısı değerlerinde ve kendi aralarında tutarlı oldukları görülmektedir.



Şekil 4.3 : Bentheim Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.

Bentheim örneği için elde edilen Tablo 4.6'daki sıvı-sıvı-katı sistemi temas açısı sonuçları literatür çalışmalarında verilen aralıklarla karşılaştırıldığında, örneğin ara su ıslatımlı bölgede olduğu görülmektedir (Cuiec, 1991).

4.4. Berea Örneği Sonuçları

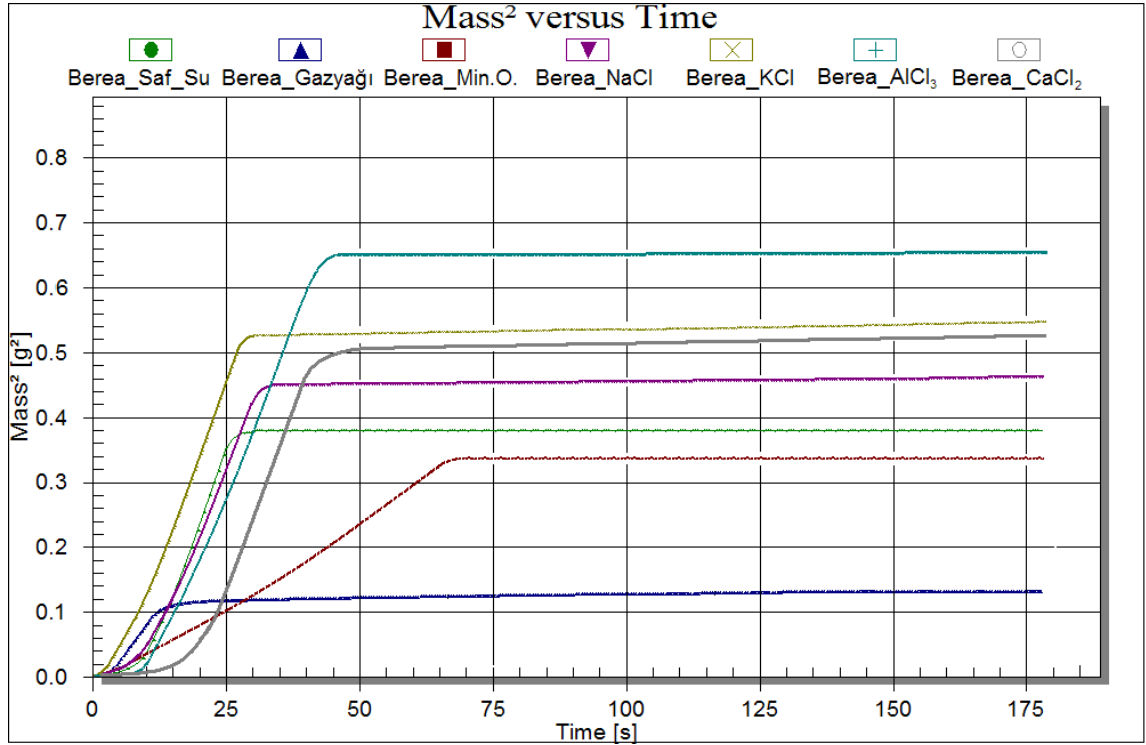
Kılcal tüp yükselim ölçümü sonucunda Berea örneği için farklı ıslatım sıvıları kullanılarak elde edilen, kütle karesinin zamana göre değişim değerleri Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Elde edilen eğim değerleri, yoğunluk, akma, yüzey gerilimi ve standart sıvı olarak kullanılan dodekan ölçüm değerleri ile birlikte Washburn eşitliğinde

(Denklem 2.35) yerlerine konularak Berea örneği için hava-sıvı-katı (Tablo 4.7) ve sıvı-sıvı-katı (Tablo 4.8) sistemlerinin temas açısı değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 4.7 : Berea Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

Kayaç	Islatım Sıvısı	θ
Berea	Dodekan	0.00
Berea	Saf Su	44.58
Berea	Gazyağı	0.00
Berea	Mineral Yağ	0.00
Berea	%2 NaCl	47.48
Berea	%2 KCl	47.84
Berea	%2 CaCl ₂	46.59
Berea	%2 AlCl ₃	43.06

Elde edilen temas açısı değerlerinde, gazyağı ve mineral yağın, Berea örneği yüzeyinde tam bir yayılma gerçekleştirerek temas açısını sıfırladığı görülmektedir.



Şekil 4.4 : Berea Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.

Su fazını temsil eden örneklere bakıldığında ise petrol fazına göre daha yüksek temas açısı değerlerinde ve kendi aralarında tutarlı oldukları görülmektedir. Tablo 4.8'deki sıvı-sıvı-katı sistemlerinin temas açısı sonuçları literatür değerleri ile karşılaştırıldığında, Berea örneğinin su ıslatımlı bölgede yer aldığı görülmektedir (Cuiec, 1991).

Tablo 4.8 : Berea Örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

Kayaç	Islatım_Sıvısı_1	Islatım_Sıvısı_2	θ_{12}
Berea	Gazyağı	Saf Su	61.77
Berea	Gazyağı	%2 NaCl	60.29
Berea	Gazyağı	%2 KCl	46.04
Berea	Gazyağı	%2 CaCl ₂	54.83
Berea	Gazyağı	%2 AlCl ₃	52.42
Berea	Mineral Yağ	Saf Su	66.26
Berea	Mineral Yağ	%2 NaCl	66.80
Berea	Mineral Yağ	%2 KCl	62,78
Berea	Mineral Yağ	%2 CaCl ₂	61.90
Berea	Mineral Yağ	%2 AlCl ₃	57.27

4.5. BL_22_10 (Bilecik-Bayırköy) Örneği Sonuçları

Kılcal tüp yükselim ölçümü sonucunda BL_22_10 örneği için farklı ıslatım sıvıları kullanılarak elde edilen, kütlelerin karesinin zamana göre değişim değerleri Şekil 4.5'de gösterilmiştir.

Tablo 4.9 : BL_22_10 Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

Kayaç	Islatım Sıvısı	θ
Bl_22_10	Dodekan	0.00
Bl_22_10	Saf Su	51.58
Bl_22_10	Gazyağı	8.06
Bl_22_10	Mineral Yağ	0.00
Bl_22_10	%2 NaCl	54.41
Bl_22_10	%2 KCl	51.89
Bl_22_10	%2 CaCl ₂	46.20
Bl_22_10	%2 AlCl ₃	43.68

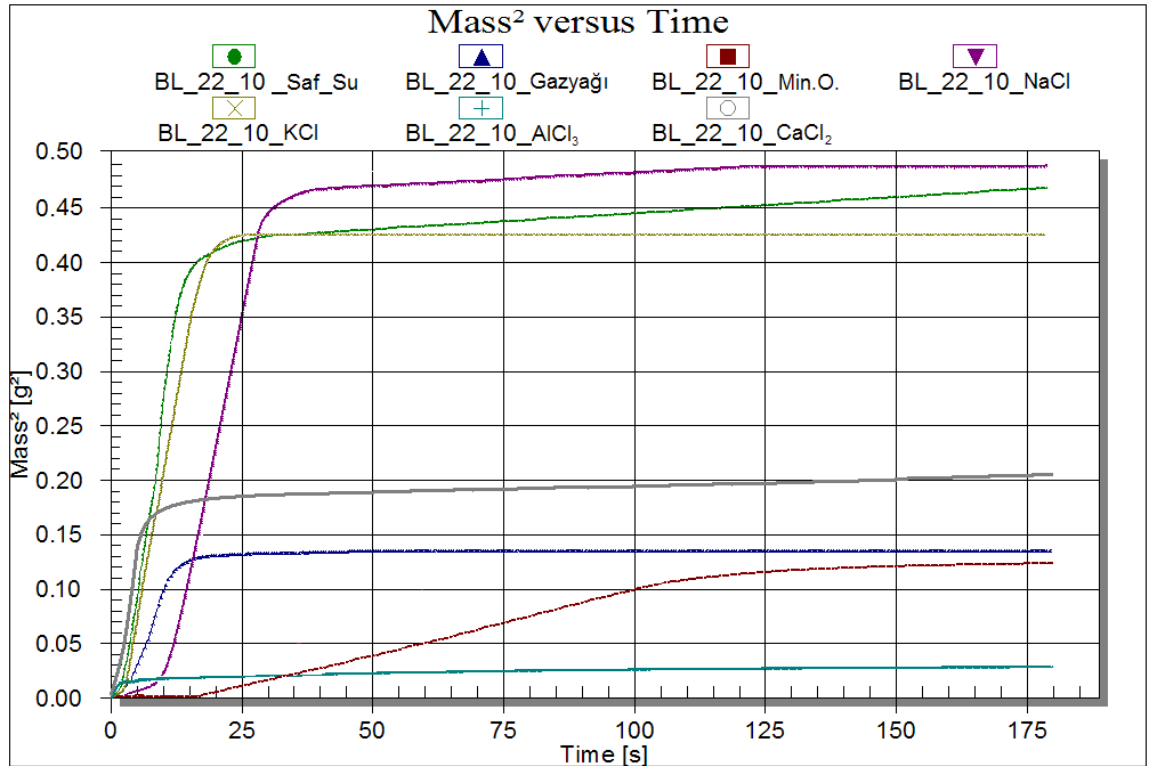
Elde edilen eğim değerleri, yoğunluk, akma, yüzey gerilimi ve standart sıvı olarak kullanılan dodekan ölçüm değerleri ile birlikte Washburn eşitliğinde (Denklem 2.35)

yerlerine konularak BL_22_10 örneği için hava-sıvı-katı (Tablo 4.9) ve sıvı-sıvı-katı (Tablo 4.10) sistemlerinin temas açısı değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 4.10 : BL_22_10 örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

Kayaç	Islatım_Sıvısı_1	Islatım_Sıvısı_2	θ_{12}
Bl_22_10	Gazyağı	Saf Su	69.37
Bl_22_10	Gazyağı	%2 NaCl	69.79
Bl_22_10	Gazyağı	%2 KCl	62.29
Bl_22_10	Gazyağı	%2 CaCl ₂	51.17
Bl_22_10	Gazyağı	%2 AlCl ₃	50.89
Bl_22_10	Mineral Yağ	Saf Su	73.84
Bl_22_10	Mineral Yağ	%2 NaCl	76.25
Bl_22_10	Mineral Yağ	%2 KCl	62.06
Bl_22_10	Mineral Yağ	%2 CaCl ₂	54.93
Bl_22_10	Mineral Yağ	%2 AlCl ₃	53.02

Temas açısı değerlerine bakıldığında, mineral yağın en düşük açı değerini verdiği görülmüştür.



Şekil 4.5 : BL_22_10 Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.

Mineral yağ ıslatım sıvıları arasında BL_22_10 örneği yüzeyine yayılma özelliği en fazla olan ıslatım sıvısıdır. Bununla birlikte gazyağının da mineral yağı gibi su fazı olarak kullanılan ıslatım sıvılarından daha düşük temas açısı değerine sahip olduğu anlaşılmıştır. Su fazını temsil eden örneklere bakıldığında ise petrol fazına göre daha yüksek temas açısı değerlerinde ve kendi aralarında tutarlı oldukları görülmektedir. Sıvı-sıvı-katı sistemi temas açısı sonuçları literatür değerleri ile karşılaştırıldığında, BL_22_10 örneğinin su ıslatımlı bölgede olduğu görülmektedir (Cuiec, 1991).

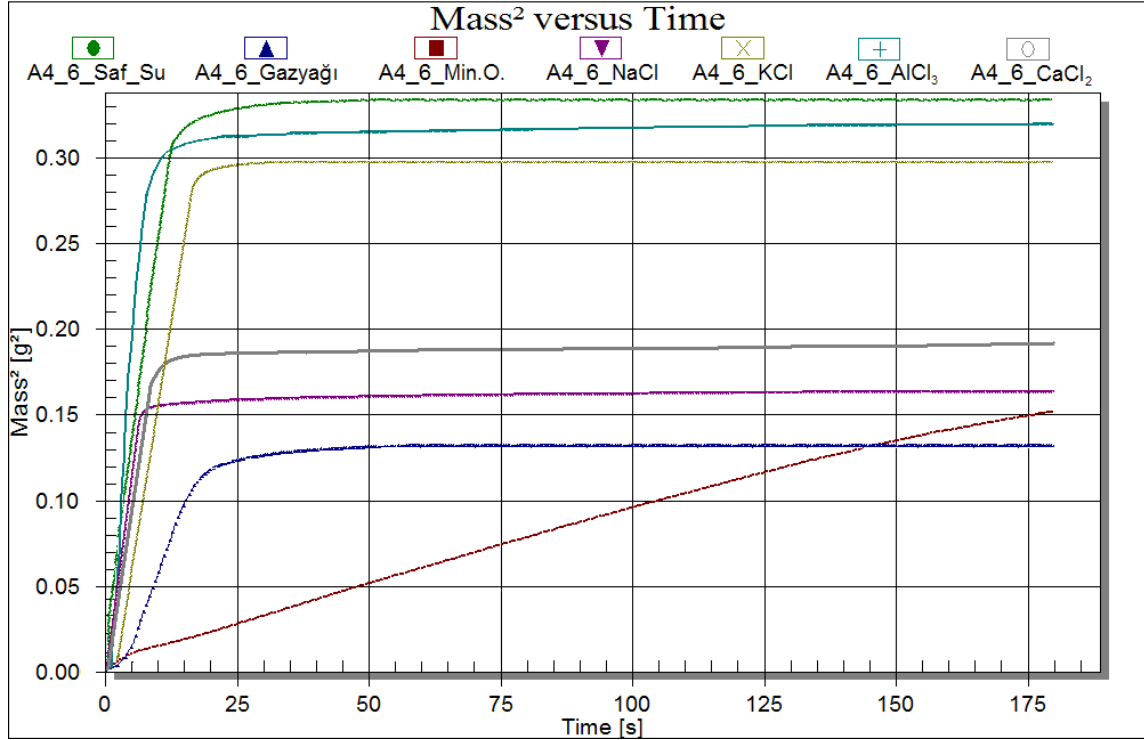
4.6 A4_6 (Bilecik-Bayırköy) Örneği Sonuçları

A4_6 örneği için farklı ıslatım sıvıları kullanılarak elde edilen, kütlelerin karesinin zamana göre değişim değerleri Şekil 4.6'de gösterilmiştir. Elde edilen eğim değerleri, yoğunluk, akma hızı, yüzey gerilimi ve standart sıvı olarak kullanılan dodekan ölçüm değerleri ile birlikte Washburn eşitliğinde (Denklem 2.35) yerlerine konularak A4_6 örneği için hava-sıvı-katı (Tablo 4.11) ve sıvı-sıvı-katı (Tablo 4.12) sistemlerinin temas açısı değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 4.11 : A4_6 Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

Kayaç	Islatım Sıvısı	θ
A4_6	Dodekan	0.00
A4_6	Saf Su	51.76
A4_6	Gazyağı	0.00
A4_6	Mineral Yağ	0.00
A4_6	%2 NaCl	53.90
A4_6	%2 KCl	57.46
A4_6	%2 CaCl ₂	51.57
A4_6	%2 AlCl ₃	47.39

Ölçüm sonuçlarına bakıldığında, gazyağı ve mineral yağın, A4_6 örneği yüzeyinde tam bir yayılma gerçekleştirerek temas açısını sıfırladığı görülmektedir. Su fazını temsil eden örneklerin ise petrol fazına göre daha yüksek temas açısı değerlerinde ve kendi aralarında tutarlı oldukları görülmektedir.



Şekil 4.6 : A4_6 Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.

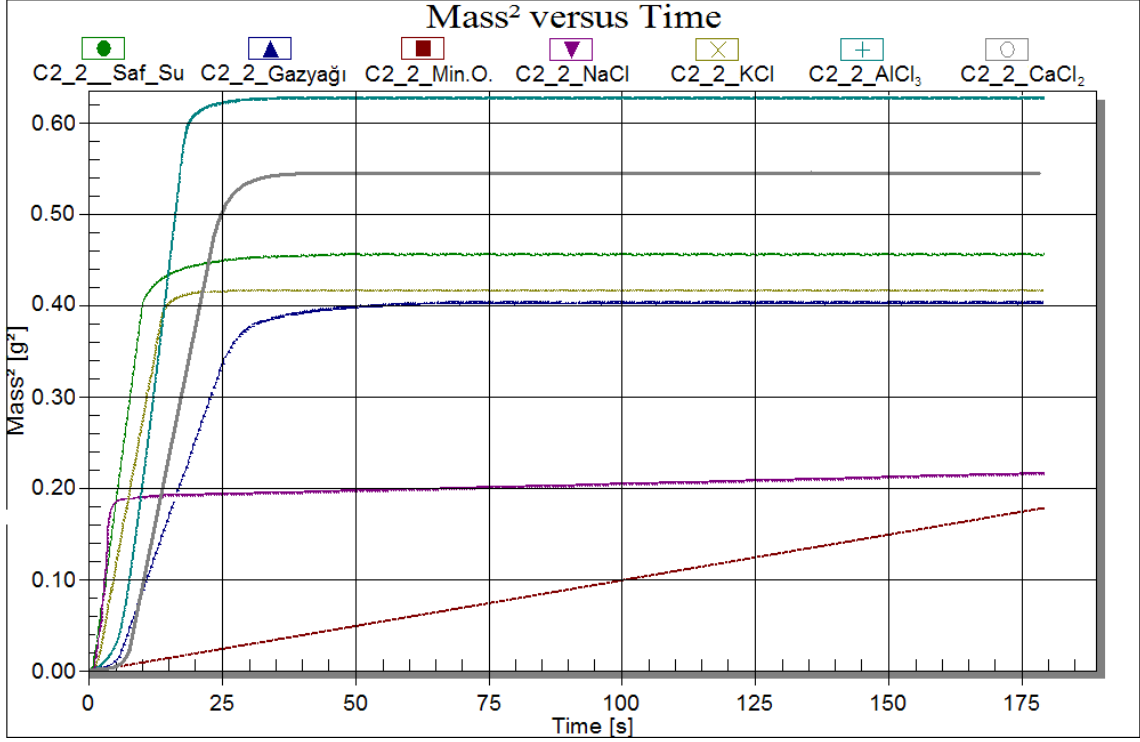
Bu sonuçlar literatür değerleri ile karşılaştırıldığında, A4_6 örneğinin su ıslatımlı bölgede yer aldığı görülmektedir (Cuiec, 1991).

Tablo 4.12 : A4_6 Örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

Kayaç	Islatım_Sıvısı_1	Islatım_Sıvısı_2	θ_{12}
A4_6	Gazyağı	Saf Su	70.61
A4_6	Gazyağı	%2 NaCl	70.08
A4_6	Gazyağı	%2 KCl	69.97
A4_6	Gazyağı	%2 CaCl ₂	63.26
A4_6	Gazyağı	%2 AlCl ₃	58.64
A4_6	Mineral Yağ	Saf Su	73.97
A4_6	Mineral Yağ	%2 NaCl	74.94
A4_6	Mineral Yağ	%2 KCl	79.04
A4_6	Mineral Yağ	%2 CaCl ₂	67.65
A4_6	Mineral Yağ	%2 AlCl ₃	60.71

4.7 C2_2 (Bilecik-Bayırköy) Örneği Sonuçları

C2_2 örneği için farklı ıslatım sıvıları kullanılarak elde edilen m^2-t grafiği Şekil 4.7’te gösterilmiştir.



Şekil 4.7 : C2_2 Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.

Elde edilen temas açısı değerlerine bakıldığında, gazyağının en düşük açı değerini verdiği görülmüştür. Yani, gazyağı ıslatım sıvıları arasında C2_2 örneği yüzeyine yayılma özelliği en fazla olan ıslatım sıvısıdır.

Tablo 4.13 : C2_2 Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

Kayaç	Islatım Sıvısı	θ
C2_2	Dodekan	0.00
C2_2	Saf Su	51.33
C2_2	Gazyağı	0.00
C2_2	Mineral Yağ	18.79
C2_2	%2 NaCl	51.90
C2_2	%2 KCl	52.94
C2_2	%2 CaCl ₂	49.60
C2_2	%2 AlCl ₃	46.87

Elde edilen m^2/t eğim değerleri, yoğunluk, akma hızı, yüzey gerilimi ve standart sıvı olarak kullanılan dodekan ölçüm değerleri ile birlikte Washburn eşitliğinde (Denklem 2.35) yerlerine konularak C2_2 örneği için hava-sıvı-katı (Tablo 4.13) ve sıvı-sıvı-katı (Tablo 4.14) sistemlerinin temas açısı değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 4.14 : C2_2 Örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

Kayaç	Islatım_Sıvısı_1	Islatım_Sıvısı_2	θ_{12}
C2_2	Gazyağı	Saf Su	77.16
C2_2	Gazyağı	%2 NaCl	75.29
C2_2	Gazyağı	%2 KCl	71.11
C2_2	Gazyağı	%2 CaCl ₂	69.51
C2_2	Gazyağı	%2 AlCl ₃	66.89
C2_2	Mineral Yağ	Saf Su	67.58
C2_2	Mineral Yağ	%2 NaCl	63.87
C2_2	Mineral Yağ	%2 KCl	54.69
C2_2	Mineral Yağ	%2 CaCl ₂	54.64
C2_2	Mineral Yağ	%2 AlCl ₃	52.01

Ayrıca, mineral yağının da gazyağı gibi su fazı olarak kullanılan ıslatım sıvılarından daha düşük temas açısı değerine sahiptir. Su fazını temsil eden örneklere bakıldığında ise petrol fazına göre daha yüksek temas açısı değerlerde ve kendi aralarında tutarlı oldukları görülmektedir. Bu sonuçlar literatür değerleri ile karşılaştırıldığında, C2_2 örneğinin su ıslatımlı bölgede yer aldığı görülmektedir (Morrow, 1991).

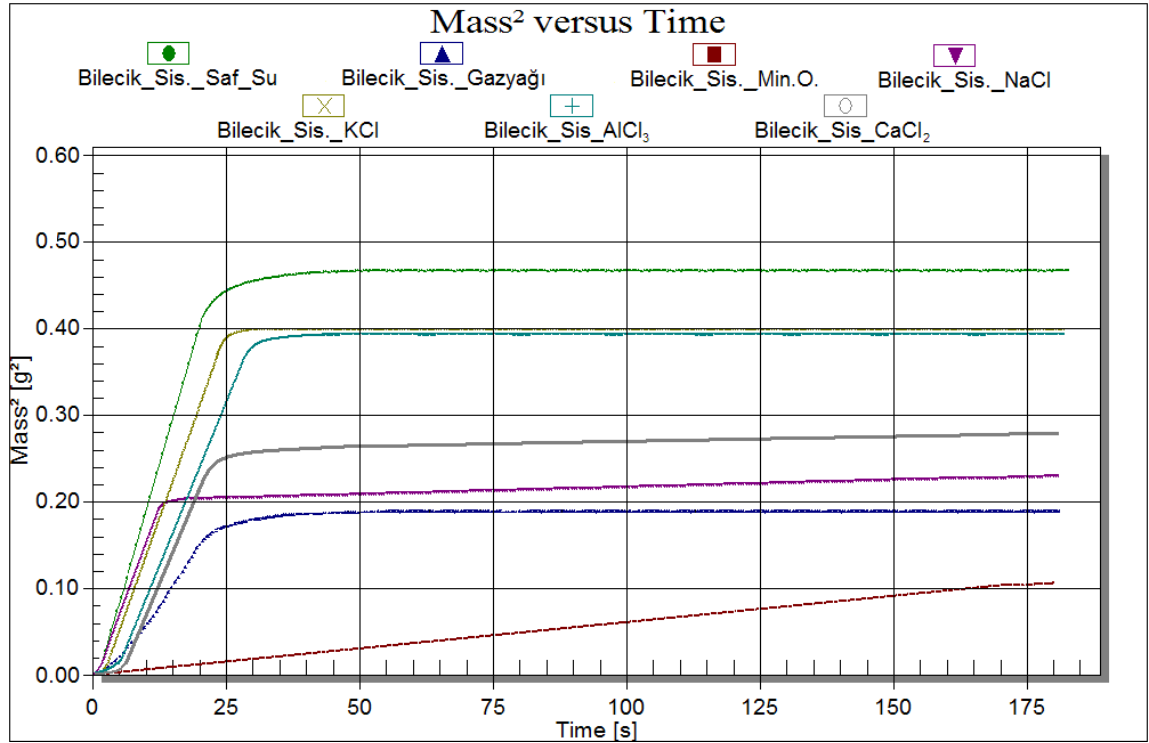
4.8 Bilecik_Şişecam (Bilecik-Bayırköy) Örneği Sonuçları

Bilecik_Şişecam örneği için farklı ıslatım sıvıları kullanılarak elde edilen, kütlelerin karesinin zamana göre değişim değerleri Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Elde edilen eğim değerleri, yoğunluk, akma hızı, yüzey gerilimi ve standart sıvı olarak kullanılan dodekan ölçüm değerleri ile birlikte Washburn eşitliğinde (Denklem 2.35) yerlerine konularak Bilecik_Şişecam örneği için hava-sıvı-katı (Tablo 4.15) ve sıvı-sıvı-katı (Tablo 4.16) sistemlerinin temas açısı değerleri hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçlarına bakıldığında, gazyağı ve mineral yağın, Bilecik_Şişecam örneği yüzeyinde tam bir yayılma gerçekleştirerek temas açısını sıfırladığı görülmektedir.

Tablo 4.15 : Bilecik_Şişecam Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

Kayaç	Islatım Sıvısı	θ
Bilecik_Sisecam	Dodekan	0.00
Bilecik_Sisecam	Saf Su	47.36
Bilecik_Sisecam	Gazyağı	0.00
Bilecik_Sisecam	Mineral Yağ	0.00
Bilecik_Sisecam	%2 NaCl	49.99
Bilecik_Sisecam	%2 KCl	50.90
Bilecik_Sisecam	%2 CaCl ₂	48.78
Bilecik_Sisecam	%2 AlCl ₃	45.90

Su fazını temsil eden Örneklerin ise petrol fazına göre daha yüksek temas açısı değerlerinde ve kendi aralarında tutarlı oldukları görülmektedir.



Şekil 4.8 : Bilecik_Şişecam Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.

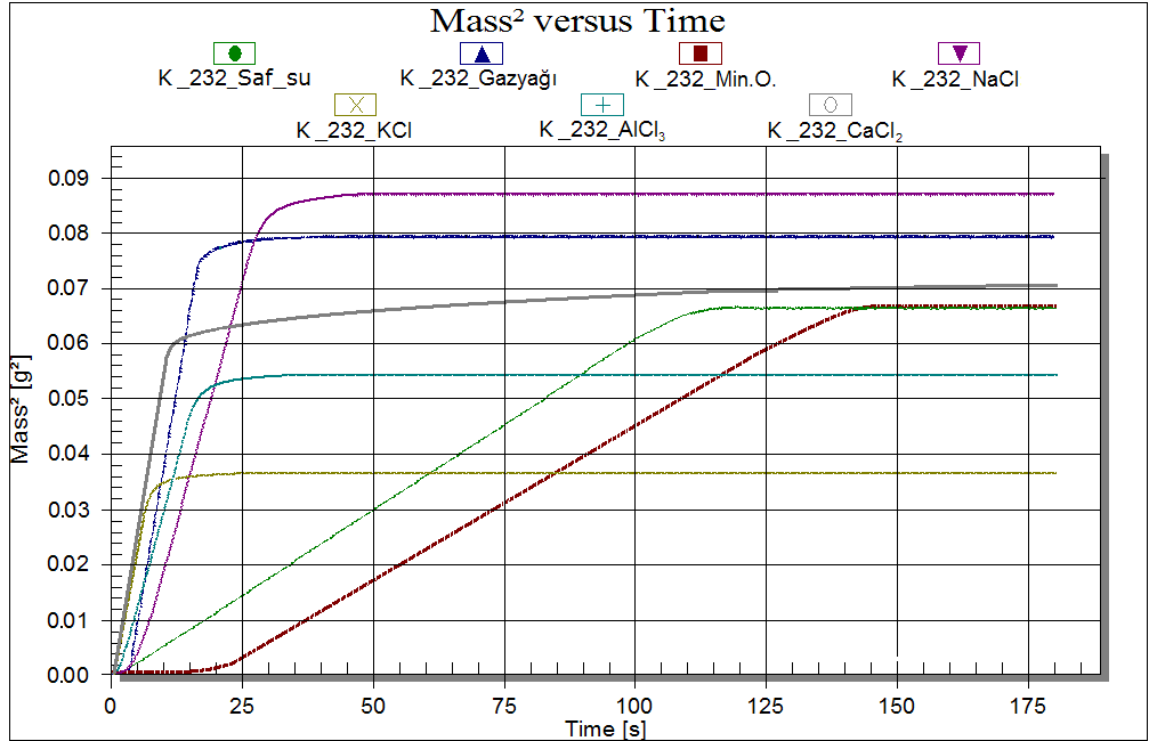
Bu sonuçlar literatür değerleri ile karşılaştırıldığında, Bilecik_Şişecam örneğinin su ıslatımlı bölgede yer aldığı görülmektedir (Cuiec, 1991).

Tablo 4.16 : Bilecik_Şişecam Örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

Kayaç	Islatım_Sıvısı_1	Islatım_Sıvısı_2	θ_{12}
Bilecik_Sisecam	Gazyağı	Saf Su	70.97
Bilecik_Sisecam	Gazyağı	%2 NaCl	71.06
Bilecik_Sisecam	Gazyağı	%2 KCl	64.52
Bilecik_Sisecam	Gazyağı	%2 CaCl ₂	66.68
Bilecik_Sisecam	Gazyağı	%2 AlCl ₃	64.15
Bilecik_Sisecam	Mineral Yağ	Saf Su	76.57
Bilecik_Sisecam	Mineral Yağ	%2 NaCl	78.70
Bilecik_Sisecam	Mineral Yağ	%2 KCl	76.10
Bilecik_Sisecam	Mineral Yağ	%2 CaCl ₂	74.78
Bilecik_Sisecam	Mineral Yağ	%2 AlCl ₃	70.18

4.9 K-232 (Karbonatlı Kayaç) Örneği Sonuçları

K-232 karbonatlı kayaç örneği için farklı ıslatım sıvıları kullanılarak elde edilen, kütlenin karesinin zamana göre değişim değerleri Şekil 4.9'de gösterilmiştir.



Şekil 4.9 : K-232 Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.

Tablo 4.17 : K-232 Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

Kayaç	Islatım Sıvısı	θ
K_232	Dodekan	0.00
K_232	Saf Su	89.03
K_232	Gazyağı	27.07
K_232	Mineral Yağ	0.00
K_232	%2 NaCl	84.19
K_232	%2 KCl	78.64
K_232	%2 CaCl ₂	81.41
K_232	%2 AlCl ₃	82.28

K-232 örneği için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, mineral yağın tam olarak yüzeye yayılarak temas açısını sıfırladığı görülmekte iken gazyağı da daha yüksek değerler almakla birlikte mineral yağı gibi yüzeye yayılma eğilimi göstermiştir.

Tablo 4.18 : K-232 Örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

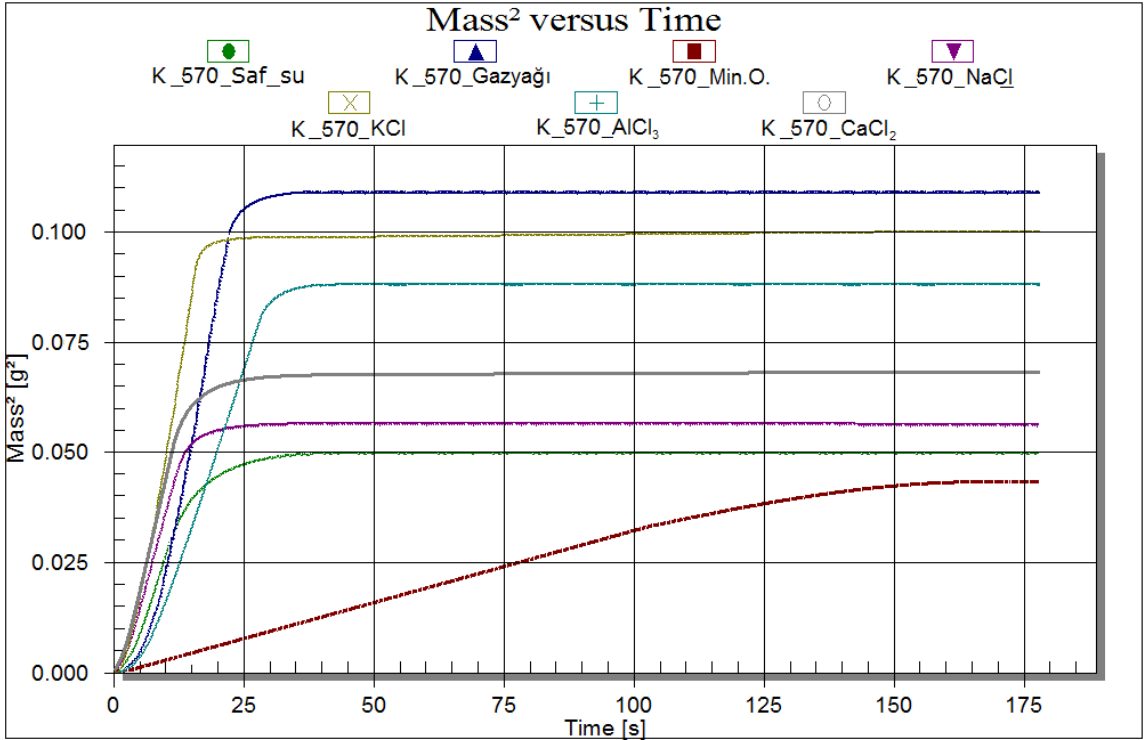
Kayaç	Islatım_Sıvısı_1	Islatım_Sıvısı_2	θ_{12}
K-232	Gazyağı	Saf Su	125.73
K-232	Gazyağı	%2 NaCl	121.78
K-232	Gazyağı	%2 KCl	118.36
K-232	Gazyağı	%2 CaCl ₂	118.77
K-232	Gazyağı	%2 AlCl ₃	117.12
K-232	Mineral Yağ	Saf Su	160.47
K-232	Mineral Yağ	%2 NaCl	155.19
K-232	Mineral Yağ	%2 KCl	160.33
K-232	Mineral Yağ	%2 CaCl ₂	151.86
K-232	Mineral Yağ	%2 AlCl ₃	144.71

Elde edilen eğim değerleri, yoğunluk, akma, yüzey gerilimi, ve standart sıvı olarak kullanılan dodekan ölçüm değerleri ile birlikte Washburn eşitliğinde (Denklem 2.35) yerlerine konularak K-232 örneği için hava-sıvı-katı (Tablo 4.17) ve sıvı-sıvı-katı (Tablo 4.18) sistemleri için temas açısı değerleri hesaplanmıştır. Su fazını temsil eden saf su ve %2'lik tuzlu su çözeltilerinin ise hava-sıvı-katı ve sıvı-sıvı-katı ara yüzeylerinde diğer kumtaşı örneklerine göre daha yüksek değerler alarak kendi aralarında tutarlı temas açısı

değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar literatür değerleri ile karşılaştırıldığında, K-232 örneğinin petrol ıslatımlı bölgede yer aldığı görülmektedir (Cuiec, 1991).

4.10 K-570 (Karbonatlı Kayaç) Örneği Sonuçları

K-570 karbonatlı kayaç örneği için farklı ıslatım sıvıları kullanılarak elde edilen, kütlenin karesinin zamana göre değişim değerleri Şekil 4.10'de gösterilmiştir. Elde edilen eğim değerleri, yoğunluk, akma, yüzey gerilimi ve standart sıvı olarak kullanılan dodekan ölçüm değerleri ile birlikte Washburn eşitliğinde (Denklem 2.35) yerlerine konularak K-570 örneği için hava-sıvı-katı (Tablo 4.19) ve sıvı-sıvı-katı (Tablo 4.20) sistemleri için temas açısı değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 4.10 : K-570 Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.

K-570 örneği için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, mineral yağın ve gazyağının tam olarak yüzeye yayılarak temas açısını sıfırladığı görülmektedir.

Tablo 4.19 : K-570 Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

Kayaç	Islatım Sıvısı	θ
K_570	Dodekan	0.00
K_570	Saf Su	79.66
K_570	Gazyağı	0.00
K_570	Mineral Yağ	0.00
K_570	%2 NaCl	75.71
K_570	%2 KCl	69.02
K_570	%2 CaCl ₂	72.86
K_570	%2 AlCl ₃	75.61

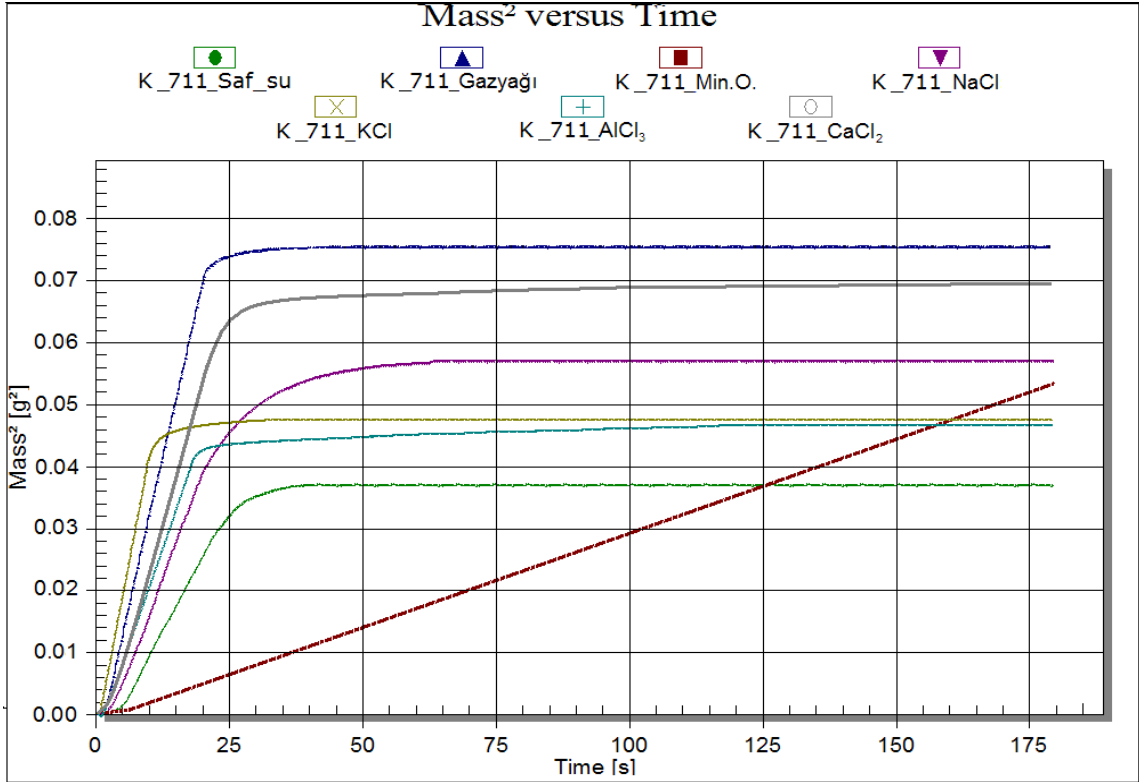
Su fazını temsil eden saf su ve %2'lik tuzlu su çözeltilerinin ise hava-sıvı-katı ve sıvı-sıvı-katı ara yüzeylerinde diğer kumtaşı kayaç örneklerine göre daha yüksek değerler alarak kendi aralarında tutarlı temas açısı değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bunun yanında, K-570 örneği kılcal tüp yükselim ölçümü uygulanan diğer karbonatlı kayaç örnekleri ile benzer sonuçlar içermektedir. Bu sonuçlar literatür değerleri ile karşılaştırıldığında, K-570 örneğinin petrol ıslatımlı bölgede yer aldığı görülmektedir (Cuiec, 1991).

Tablo 4.20 : K-570 Örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

Kayaç	Islatım_Sıvısı_1	Islatım_Sıvısı_2	θ_{12}
K-570	Gazyağı	Saf Su	122.24
K-570	Gazyağı	%2 NaCl	119.91
K-570	Gazyağı	%2 KCl	113.03
K-570	Gazyağı	%2 CaCl ₂	116.84
K-570	Gazyağı	%2 AlCl ₃	119.23
K-570	Mineral Yağ	Saf Su	162.35
K-570	Mineral Yağ	%2 NaCl	163.91
K-570	Mineral Yağ	%2 KCl	163.93
K-570	Mineral Yağ	%2 CaCl ₂	160.61
K-570	Mineral Yağ	%2 AlCl ₃	161.03

4.11 K-711 (Karbonatlı Kayaç) Örneği Sonuçları

K-711 karbonatlı kayaç örneği için farklı ıslatım sıvıları kullanılarak elde edilen, kütlelerin karesinin zamana göre değişim değerleri Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11 : K-711 Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.

Elde edilen eğim değerleri, yoğunluk, akma hızı, yüzey gerilimi ve standart sıvı olarak kullanılan dodekan ölçüm değerleri ile birlikte Washburn eşitliğinde (Denklem 2.35) yerlerine konularak K-711 örneği için hava-sıvı-katı (Tablo 4.21) ve sıvı-sıvı-katı (Tablo 4.22) sistemlerinin temas açısı değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 4.21 : K-711 Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

Kayaç	Islatım Sıvısı	θ
K_711	Dodekan	0.00
K_711	Saf Su	85.14
K_711	Gazyağı	14.77
K_711	Mineral Yağ	0.00
K_711	%2 NaCl	81.71
K_711	%2 KCl	75.40
K_711	%2 CaCl ₂	77.88
K_711	%2 AlCl ₃	79.89

K-711 örneği için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, mineral yağı tam olarak yüzeye yayılarak temas açısını sıfırladığı görülmekte iken gazyağı da biraz daha yüksek değer almakla birlikte mineral yağı gibi yüzeye yayılma eğilimi göstermiştir.

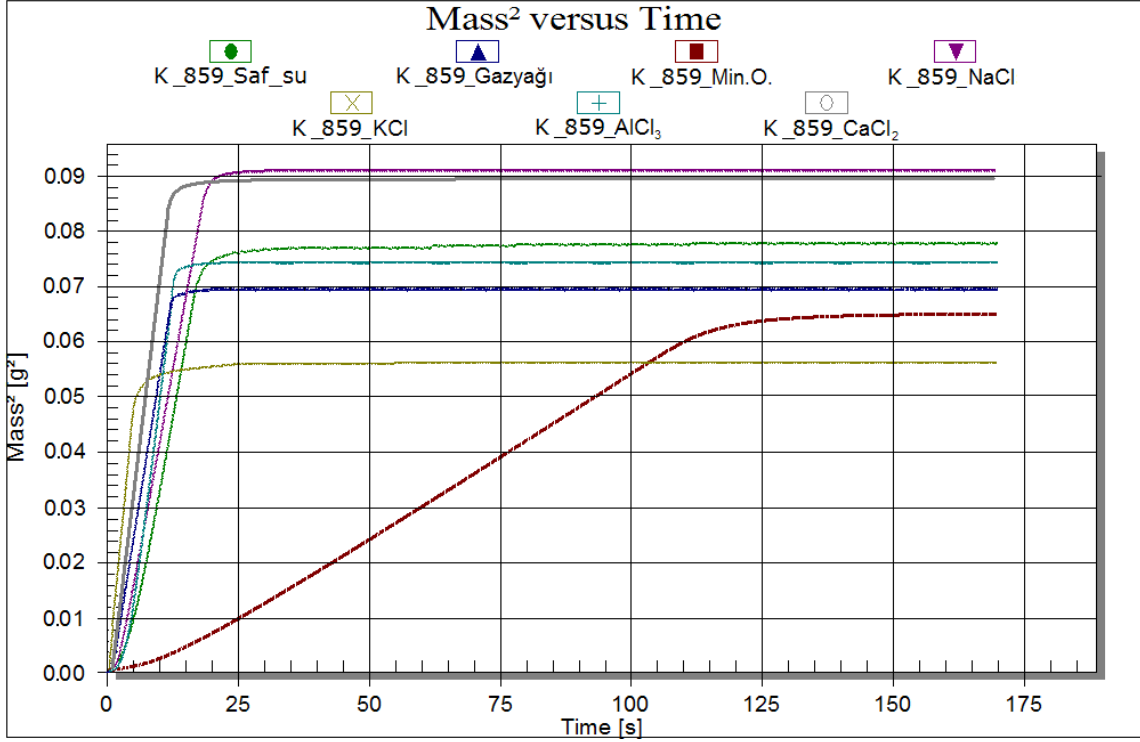
Tablo 4.22 : K-711 Örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

Kayaç	Islatım_Sıvısı_1	Islatım_Sıvısı_2	θ_{12}
K-711	Gazyağı	Saf Su	121.59
K-711	Gazyağı	%2 NaCl	120.26
K-711	Gazyağı	%2 KCl	114.12
K-711	Gazyağı	%2 CaCl ₂	114.67
K-711	Gazyağı	%2 AlCl ₃	115.85
K-711	Mineral Yağ	Saf Su	161.02
K-711	Mineral Yağ	%2 NaCl	166.71
K-711	Mineral Yağ	%2 KCl	172.39
K-711	Mineral Yağ	%2 CaCl ₂	154.98
K-711	Mineral Yağ	%2 AlCl ₃	152.23

Su fazını temsil eden saf su ve %2'lik tuzlu su çözeltilerinin ise hava-sıvı-katı ve sıvı-sıvı-katı ara yüzeylerinde diğer kumtaşı kayaç örneklerine göre daha yüksek değerler alarak kendi aralarında tutarlı temas açısı değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bunun yanında, K-711 örneği kılcal tüp yükselim ölçümü uygulanan diğer karbonatlı kayaç örnekleri ile benzer sonuçlar içermektedir. Bu sonuçlar literatür değerleri ile karşılaştırıldığında, K-711 örneğinin petrol ıslatımlı bölgede yer aldığı görülmektedir (Cuiec, 1991).

4.12 K-859 (Karbonatlı Kayaç) Örneği Sonuçları

K-859 karbonatlı kayaç örneği için farklı ıslatım sıvıları kullanılarak elde edilen, kütlenin karesinin zamana göre değişim değerleri Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Elde edilen eğim değerleri, yoğunluk, akmazlık, yüzey gerilimi ve standart sıvı olarak kullanılan dodekan ölçüm değerleri ile birlikte Washburn eşitliğinde (Denklem 2.35) yerlerine konularak K-859 örneği için hava-sıvı-katı (Tablo 4.23) ve sıvı-sıvı-katı (Tablo 4.24) sistemleri için temas açısı değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 4.12 : K-859 Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.

K-859 örneği sonuçları incelendiğinde, diğer karbonatlı kayaç örneklerinde olduğu gibi mineral yağın tam olarak yüzeye yayılarak temas açısını sıfırladığı görülmekte iken gazyağı da daha yüksek değerler almakla birlikte mineral yağ gibi yüzeye yayılma eğilimi göstermiştir.

Tablo 4.23 : K-859 Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

Kayaç	Islatım Sıvısı	θ
K_859	Dodekan	0.00
K_859	Saf Su	81.39
K_859	Gazyacı	15.66
K_859	Mineral Yağ	0.00
K_859	%2 NaCl	76.54
K_859	%2 KCl	70.49
K_859	%2 CaCl ₂	73.66
K_859	%2 AlCl ₃	75.17

Su fazını temsil eden saf su ve %2'lik tuzlu su çözeltilerinin ise hava-sıvı-katı ve sıvı-sıvı-katı ara yüzeylerinde diğer kumtaşı kayaç örneklerine göre daha yüksek değerler olarak kendi aralarında tutarlı temas açısı değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

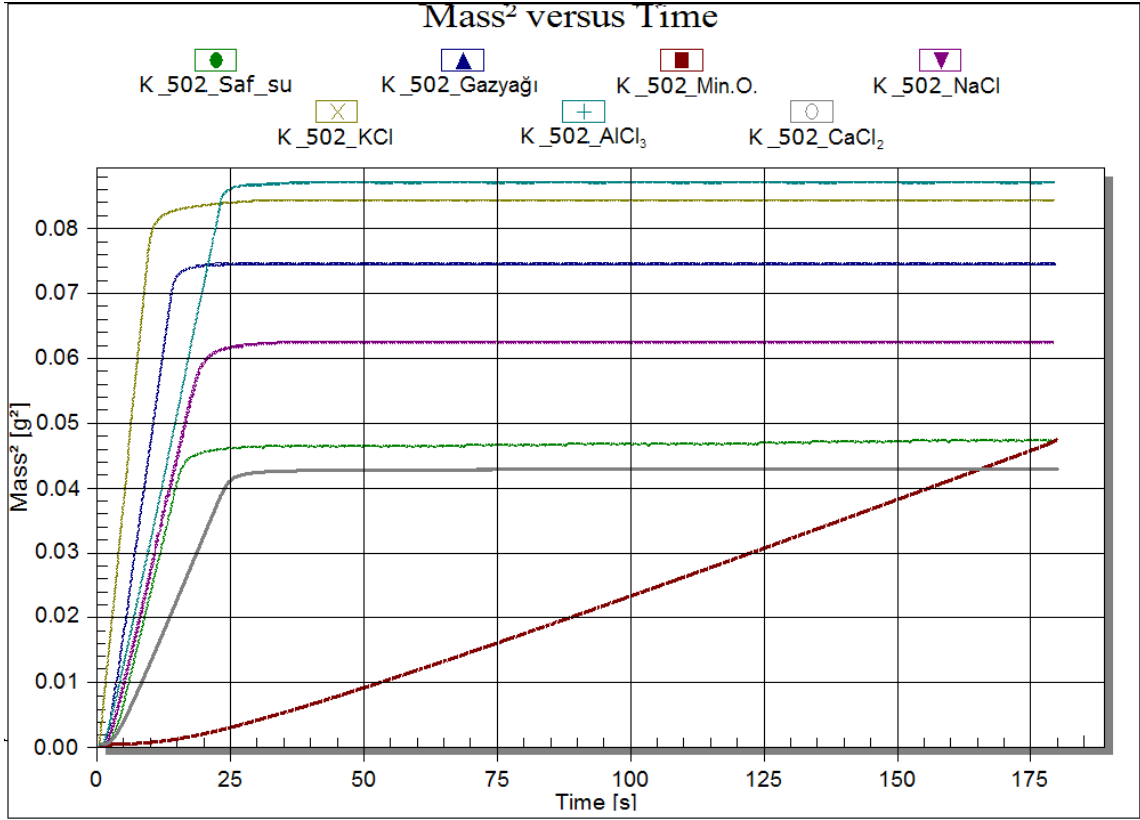
Tablo 4.24 : K-859 Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

Kayaç	Islatım_Sıvısı_1	Islatım_Sıvısı_2	θ_{12}
K-859	Gazyağı	Saf Su	114.39
K-859	Gazyağı	%2 NaCl	108.96
K-859	Gazyağı	%2 KCl	99.96
K-859	Gazyağı	%2 CaCl ₂	104.83
K-859	Gazyağı	%2 AlCl ₃	105.86
K-859	Mineral Yağ	Saf Su	156.92
K-859	Mineral Yağ	%2 NaCl	151.98
K-859	Mineral Yağ	%2 KCl	152.36
K-859	Mineral Yağ	%2 CaCl ₂	148.61
K-859	Mineral Yağ	%2 AlCl ₃	144.51

Bunun yanında, K-859 örneği kılcal tüp yükselim ölçümü uygulanan diğer karbonatlı kayaç örnekleri ile benzer sonuçlar içermektedir. Bu sonuçlar literatür değerleri ile karşılaştırıldığında, K-859 örneğinin petrol ıslatımlı bölgede yer aldığı görülmektedir (Cuiec, 1991).

4.13 K-502 (Karbonatlı Kayaç) Örneği Sonuçları

K-502 karbonatlı kayaç örneği için farklı ıslatım sıvıları kullanılarak elde edilen, kütlenin karesinin zamana göre değişim değerleri Şekil 4.13'de gösterilmiştir. Eğim değerleri, yoğunluk, akmazlık, yüzey gerilimi ve standart sıvı olarak kullanılan dodekan ölçüm değerleri ile birlikte Washburn eşitliğinde (Denklem 2.35) yerlerine konularak K-502 örneği için hava-sıvı-katı (Tablo 4.25) ve sıvı-sıvı-katı (Tablo 4.26) sistemlerinin temas açısı değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 4.13 : K-502 Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.

K-502 örneği sonuçları incelendiğinde, mineral yağın ve gazyağının tam olarak yüzeye yayılarak temas açısını sıfırladığı görülmektedir.

Tablo 4.25 : K-502 Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

Kayaç	Islatım Sıvısı	θ
K_502	Dodekan	0.00
K_502	Saf Su	85.24
K_502	Gazyağı	0.00
K_502	Mineral Yağ	0.00
K_502	%2 NaCl	80.55
K_502	%2 KCl	74.76
K_502	%2 CaCl ₂	76.79
K_502	%2 AlCl ₃	78.05

Su fazını temsil eden saf su ve %2'lik tuzlu su çözeltilerinin ise hava-sıvı-katı ve sıvı-sıvı-katı ara yüzeylerinde diğer kumtaşı kayaç örneklerine göre daha yüksek değerler olarak kendi aralarında tutarlı temas açısı değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bunun yanında, K-502 örneği kılcal tüp yükselim ölçümü uygulanan diğer karbonatlı kayaç örnekleri ile benzer sonuçlar içermektedir.

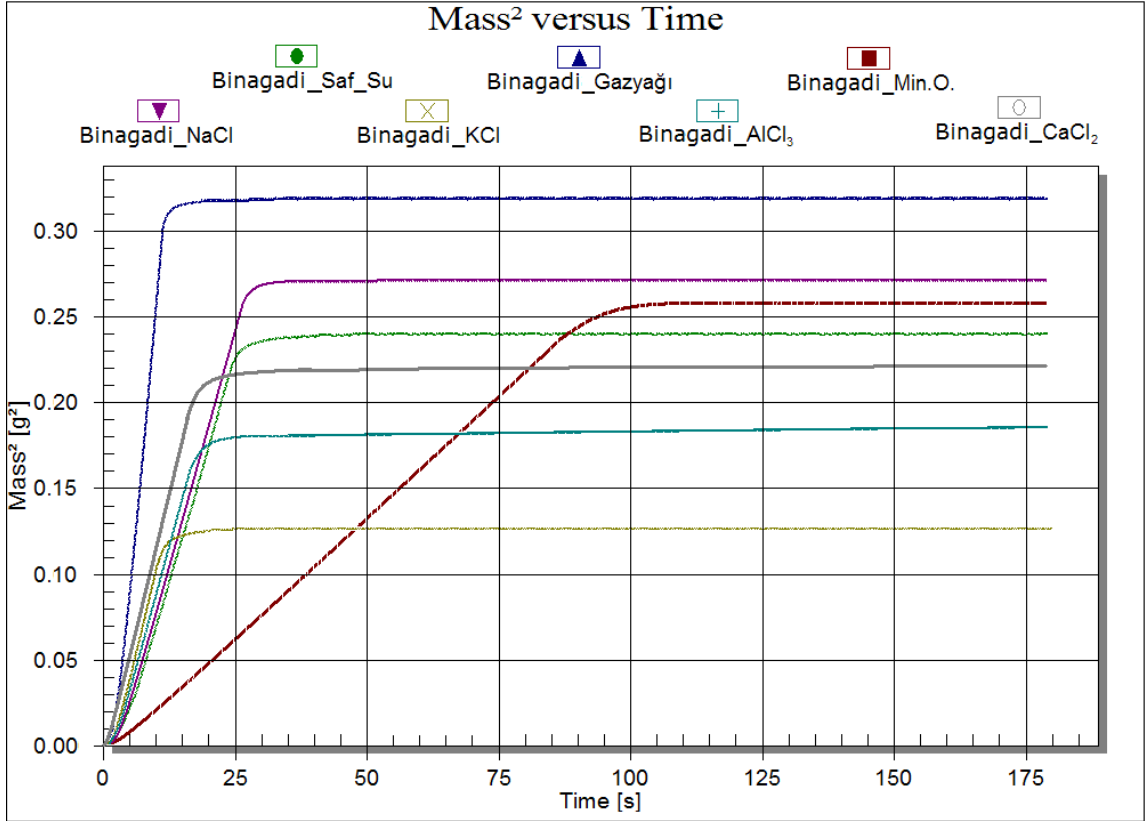
Tablo 4.26 : K-502 Örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

Kayaç	Islatım_Sıvısı_1	Islatım_Sıvısı_2	θ_{12}
K-502	Gazyağı	Saf Su	123.43
K-502	Gazyağı	%2 NaCl	119.55
K-502	Gazyağı	%2 KCl	114.79
K-502	Gazyağı	%2 CaCl ₂	114.11
K-502	Gazyağı	%2 AlCl ₃	113.73
K-502	Mineral Yağ	Saf Su	161.23
K-502	Mineral Yağ	%2 NaCl	156.94
K-502	Mineral Yağ	%2 KCl	161.59
K-502	Mineral Yağ	%2 CaCl ₂	148.28
K-502	Mineral Yağ	%2 AlCl ₃	143.43

Bu sonuçlar literatür değerleri ile karşılaştırıldığında, K-502 örneğinin petrol ıslatımlı bölgede yer aldığı görülmektedir (Cuiec, 1991).

4.14 Binagadi Örneği Sonuçları

Azerbaycan'ın Bakü/Binagadi bölgesinde faaliyet gösteren Binagadi petrol şirketinin 247071 No'lu kuyusundan 600 metre derinlikten alınan kum örneği için farklı ıslatım sıvıları kullanılarak elde edilen, kütle'nin karesinin zamana göre değişim değerleri Şekil 4.14'de gösterilmiştir. Eğim değerleri, yoğunluk, akma zlık, yüzey gerilimi ve standart sıvı olarak kullanılan dodekan ölçüm değerleri ile birlikte Washburn eşitliğinde (Denklem 2.35) yerlerine konularak Binagadi Örneği için hava-sıvı-katı (Tablo 4.27) ve sıvı-sıvı-katı (Tablo 4.28) sistemlerinin temas açısı değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 4.14 : Binagadi Örneği için Kılcal Tüp Yükselim Ölçümü Sonuçları.

Binagadi sahasından alınan örneğin kılcal tüp yükselim sonuçları incelendiğinde, mineral yağın tam olarak yüzeye yayılarak temas açısını sıfırladığı görülmektedir. Gazyağı ise mineral yağından yüksek açı değerleri almasına rağmen yine yüzeye yayılma eğilimi göstermiştir.

Tablo 4.27 : Binagadi Örneği için Elde Edilen Hava-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

Kayaç	Islatım Sıvısı	θ
Binagadi	Dodekan	0
Binagadi	Saf Su	54.08
Binagadi	Gazyağı	12.48
Binagadi	Mineral Yağ	0
Binagadi	%2 NaCl	51.67
Binagadi	%2 KCl	53.15
Binagadi	%2 CaCl ₂	52.21
Binagadi	%2 AlCl ₃	50.97

Binagadi örneği kılcal tüp yükselim ölçümü uygulanan diğer kumtaşı kayaç örnekleri ile benzer sonuçlar içermektedir. Bu sonuçlar literatür değerleri ile karşılaştırıldığında, Binagadi örneğinin ara ıslatımlı bölgede yer aldığı görülmektedir (Cuiec, 1991).

Tablo 4.28 : Binagadi Örneği için Elde Edilen Sıvı-Sıvı-Katı Sistemi Temas Açısı Değerleri.

Kayaç	Islatım_Sıvısı_1	Islatım_Sıvısı_2	θ_{12}
Binagadi	Gazyağı	Saf Su	72.31
Binagadi	Gazyağı	%2 NaCl	64.36
Binagadi	Gazyağı	%2 KCl	55.96
Binagadi	Gazyağı	%2 CaCl ₂	62.34
Binagadi	Gazyağı	%2 AlCl ₃	62.82
Binagadi	Mineral Yağ	Saf Su	78.61
Binagadi	Mineral Yağ	%2 NaCl	71.01
Binagadi	Mineral Yağ	%2 KCl	66.81
Binagadi	Mineral Yağ	%2 CaCl ₂	70.06
Binagadi	Mineral Yağ	%2 AlCl ₃	69.04

4.15 Sonuçların Değerlendirilmesi ve Literatür Değerleri ile Karşılaştırılması

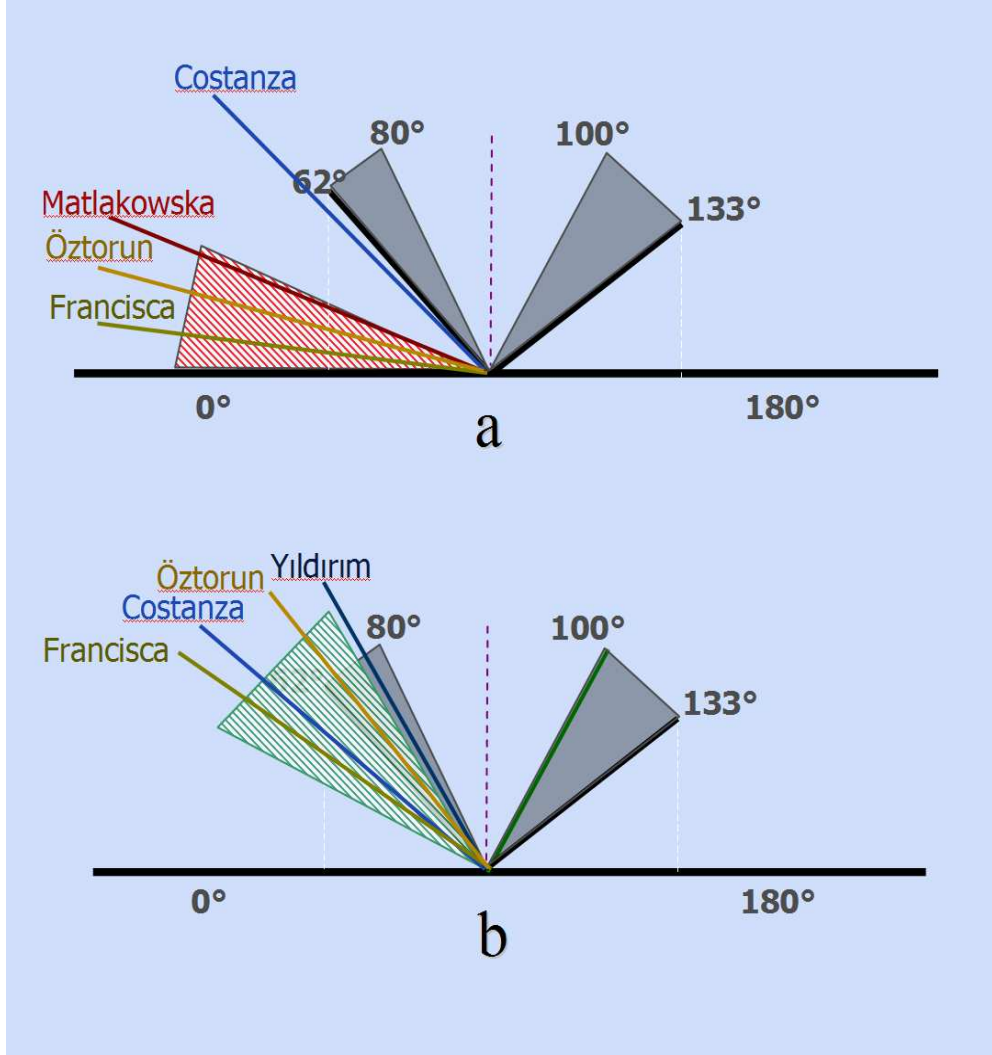
Literatürdeki çeşitli ölçüm yöntemleri kullanılarak elde edilmiş hava-sıvı-katı sistemi temas açısı değerleri incelendiğinde, kuvars için 0° ile 60° arasında, kalsit için ise 49° ile 77° arasında değerler görülmektedir (Tablo 4.29).

Tablo 4.29 : Kuvars ve Kalsit Numuneleri için Literatürdeki Mevcut Temas Açısı Değerleri (Öztorun, 2006).

Çalışma adı	Kuvars	Kalsit
Costanza, 1995	59.6	55.59
Skłodowska, Wozniak, Matlakowska, 1999	32.79	-
Yıldırım, 2001	-	77
Francisca, Rinaldi, Santamarina, 2003	13.1	49.6
Öztorun, 2006	26	67

Yapılan çalışmada elde edilen değerler ıslatımlılık bantları halinde gösterilerek literatür değerleri ile kıyaslama yapılacak olursa, Kuvars örneği için Costanza'nın 1996'da yapmış olduğu çalışmadan elde edilen temas açısı değeri hariç, hava-sıvı-katı sisteminde elde edilmiş olan bütün literatür değerlerinin ıslatımlılık bandının içerisinde yer aldığı

görülmektedir (Şekil 4.15a). Kalsit örneği için ise, Yıldırım'ın 2001'de yapmış olduğu çalışmadan elde edilen 77° değerinin ıslatımlılık bandının 3° dışında yer aldığı ve diğer tüm değerlerin bandın içinde bulunduğu görülmektedir (Şekil 4.15b).



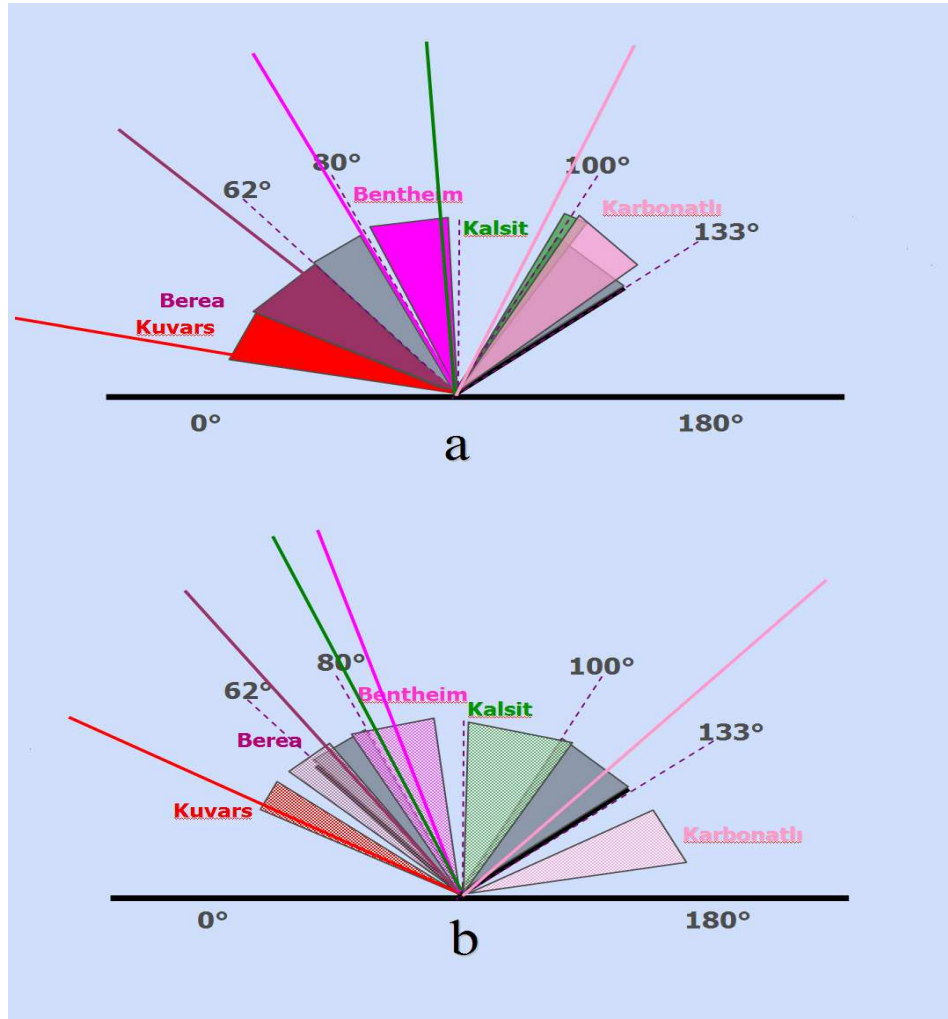
Şekil 4.15 : Çalışmadan Elde Edilen Kuvars (a) ve Kalsit (b) numuneleri verilerinin literatür değerleri ile kıyaslanması.

Öztorun'un 2006'da İnce Tabaka Kılcal Yükselim ölçüm yöntemini kullanılarak elde ettiği sıvı-sıvı-katı sistemi temas açısı değerleri Tablo 4.30' da verilmektedir.

Tablo 4.30 : Öztorun'un çalışmasında elde edilen Sıvı-Sıvı-Katı sistemi temas açısı değerleri (2006).

	Kuvars	Berea	Bentheim	Kalsit	Karbonatlı536	Karbonatlı703
Saf Su-Gazyağı	24	58	79	87	96	98
Saf Su-Min.Yağı	47	65	83	81	121	103

Kılcal Tüp Yükselim yöntemi ile elde edilen sıvı-sıvı-katı sistemi ıslatımlılık bantları, Öztorun'un 2006 yılında yapmış olduğu çalışmada elde ettiği sıvı-sıvı-katı sistemi değerleri ile karşılaştırıldığında, gazyağı-su-kayaç sistemi için kalsit numunesindeki 10°



Şekil 4.16 : Gazyağı (a) ve Mineral Yağ (b) için çalışmadan elde edilen sıvı-sıvı-katı sistemi ıslatımlılık bantlarının Öztorun, 2006 değerleri ile kıyaslanması.

ve karbonatlı kayaç numunelerindeki 8°'lik fark hariç bütün değerler ıslatımlılık bantlarının içinde görülmektedir (Şekil 4.16a). Mineral yağı için aynı durum incelendiğinde ise, kalsit numunesindeki 9° ve karbonatlı kayaç numunelerindeki 21°'lik fark dışındaki değerler ıslatımlılık bantlarının içerisinde görülmektedir (Şekil 4.16b). Bu durum, kayaçlar petrol ıslatımlı oldukça, yöntemden yönteme elde edilen açılal farklılıkların arttığının bir göstergesidir.

Genel olarak Kılcal Tüp Yükselim yönteminin literatürde farklı yöntemler kullanılarak elde edilmiş olan temas açısı değerleri ile uyum içerisinde olduğundan söz edilebilir. Ayrıca Kılcal Tüp Yükselim yöntemi, Amott ve USBM yöntemleri gibi gibi ıslatımlılık karakterini numerik olarak saptamaya yarayan nicel yöntemlerin aksine çok daha kısa zamanda ve daha az maliyetle kayaç ıslatımlılığını karakterize edebilen alternatif bir nicel yöntem olarak düşünülebilir.

5. SONUÇLAR

Heterojen minerolojik kompozisyona sahip gözenekli kayaç örneklerinin Kılcal Tüp Yükselim Yöntemi ile ıslatımlılık karakterlerinin tanımlanmasında Washburn Eşitliğinin kullanımı uygun bir yaklaşımdır.

Kuars toz numunesinin Kalsit toz numunesine göre çok daha fazla “su ıslatımlı” olduğu anlaşılmıştır. Kuvars Numunesi kuvvetli su ıslatımlı özellik gösterirken, Kalsit numunesinin ara ıslatımlı bölgenin petrol ıslatımlı kısmında yer aldığı görülmüştür.

Berea Numunesinin su ıslatımlı, Bilecik (BL-22-10, A4_6, C2_2, Bilecik_Şişecem) numunelerinin su ıslatımlı sınırında, ve Bentheim numunesinin ara su ıslatımlı bölgede yer aldığı görülmüştür.

Karbonatlı Kayaç numunelerinin (K-232, K-570, K-711, K-859, K-502) ise, Saf Su-Gazyağı-Kayaç sistemi için petrol ıslatımlı sınırında değerler verirken, Saf Su-Mineral Yağı-Kayaç sisteminde kuvvetli petrol ıslatımlı bölgede olduğu görülmektedir.

Elde edilen temas açısı değerleri, literatürde daha önce yapılmış olan goniometrik ve ince tabaka kılcal yükselim yöntemlerinin temas açısı değerleri ile uyum içerisindedir. Kılcal Tüp Yükselim Yöntemi, Sıvı-Sıvı-Katı Sistemlerinin temas açısı değerlerinin saptanmasında kullanılabilir alternatif bir yöntemdir.

6. ÖNERİLER

Yapılan bu çalışma, toz ıslatımlılığını mümkün kılan gerilim ölçer veya türevi bir mekanizma yardımı ile kullanılabilen olan kılcal tüp yükselim yönteminin kayaç ıslatımlılığını saptamada diğer ölçüm yöntemlerine göre daha az maliyet ve zaman sarfıyatı sağlayan kullanışlı bir yöntem olduğunu göstermektedir. Ayrıca elde edilen veriler göstermektedir ki bu çalışma kayaçların ıslatımlılık karakterinin tanımlanması ile ilgili ileride gerçekleştirilecek olan çalışmalara bir örnek teşkil edecektir.

İleride uygulanacak olan çalışmalarda ıslatımlılık karakteri analiz edilen kayaç örneklerinin mineralojik kompozisyon analizleri de yapılarak örneklerin mineralojik yüzde değişimlerinin temas açısı üzerindeki etkileri araştırılabilir.

Bu çalışmada yapılan ölçümlerin tamamı oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Dolayısı ile ilerideki çalışmalarda farklı mineralojik kompozisyona sahip örneklerin ölçümleri oda sıcaklığında gerçekleştirildikten sonra bir sıcaklık banyosu yardımı ile ıslatım sıvısı sıcaklıklarının değişimine göre temas açısı değerlerinin değişimi incelenebilir.

Çalışmada petrol fazı, gazyağı ve mineral yağı ile temsil edilmiştir. İleride yapılacak olan çalışmalarda petrol sahalarından sağlanan kayaç örnekleri ile birlikte, sahalardan alınan ham petrol ve formasyon suyunun ıslatım sıvıları olarak kullanılması sahaların ıslatımlılık karakterlerinin saptanmasında önemli bir çalışma olacaktır.

KAYNAKLAR

- Adamson, A.W.**, 1990. *Physical Chemistry of Surfaces*, John Wiley & Sons, Inc., Los Angeles, California.
- Amott, E.**, 1959. Observations Relating to the Wettability of Porous Rock, *Petroleum Transactions, AIME*, **216**, 156-162.
- Anderson, W.G.**, 1986a. Wettability Literature Survey-Part 1: Rock/oil/brine Interactions and the Effects of Core Handling on Wettability, *Journal of Petroleum Technology*, October, 1125-1144.
- Anderson, W.G.**, 1986b. Wettability Literature Survey-Part 2: Wettability Measurement, *Journal of Petroleum Technology*, November, 1246-1262.
- Bartell, F.E. and Miller, F.L.**, 1928. Degree of Wetting of Silica by Crude Petroleum Oils, *Ind. Eng. Chem.*, July, **20(7)**, 738-742.
- Benner, F.C. and Bartell, F.E.**, 1942. The Effect of Polar Impurities Upon Capillary and Surface Phenomena in Petroleum Production, *Drill. And Prod. Prac.*, API, New York City, 341-348.
- Brown, R.J.S. and Fatt, I.**, 1956. Measurements of Fractional Wettability of Oilfield Rocks by the Nuclear Magnetic Relaxation Method, *Trans. AIME*, **207**, 262-264.
- Chilingar, G.V. and Yen, T.F.**, 1983. Some Notes on Wettability and Relative Permeabilities of Carbonate Reservoir Rocks, II, *Energy Sources*, 7, No.1, 67-75.
- Craig, F.F.**, 1971. The Reservoir Engineering Aspects of Waterflooding, Monograph series 3, SPE, Richardson, TX.
- Cuiec, L.E.**, 1991. Evaluation of Reservoir Wettability and Its Effect on Oil Recovery, Interfacial Phenomena in Oil Recovery, N.R. Morrow (ed.), Marcell Dekker, New York, 319-75.
- Donaldson, E.C., Thomas, R.D., and Lorenz, P.B.**, 1969. Wettability Determination and Its Effect on Recovery Efficiency, *SPEJ*, 13-20.

- Donaldson, E.C. and Tiab, D.,** 1996. *Petrophysics : Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties*, 240-279, Gulf Publishing Company, New York.
- Fatt, I. and Klikoff, W.A.,** 1959. Effect of Fractional Wettability on Multiphase Flow Through Porous Media, *Trans. AIME*, **216**, 426-432.
- Giese, R.F. and van Oss, C.J.,** 2002. *Colloid and Surface Properties of Clays and Related Minerals*, Surfactant Science Series, **105**, Marcel Dekker inc. New York.
- Gökmen, M.,** 2003. Şekil Faktörü, Karakteristik Uzunluk ve Sınır Koşullarının Doğal Su İmbibisyonuna Etkileri, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Maslak, İstanbul.
- Green, D.W. and Willhite, G.P.,** 1998. Enhanced Oil Recovery, SPE Textbook Series, **61**, SPE, Richardson, TX.
- Harkins W.D. and Feldman A.,** 1922. “Spreading of Liquids and the Spreading Coefficient”, J. Am. Chem. Soc., Vol. 44, No. 12, pp 2665–2685.
- Iwankow, E.N.,** 1960. A Correlation of Interstitial Water Saturation and Heterogeneous Wettability, *Producers Monthly*, **24**, October, 18-26.
- Jadhunandan, P.P.,** 1990. Effects of Brine Composition, Crude Oil and Aging Conditions on Wettability and Oil Recovery, *Ph.D. Thesis*, New Mexico Inst. of Mining and Tech., Socorro, New Mexico.
- Karagüzel, C., Can, M. F., Sönmez, E., Çelik, M.S.,** 2005. “Effect of Electrolyte on Surface Free Energy Components of Feldspar Minerals Using Thin-Layer Wicking Method”, *Journal of Colloid and Interface Science*, **285**, pp 192-200.
- Kumbasar, I. ve Aykol, A.,** 1993. Mineroloji, İ.T.Ü., Teknik Üniversite Matbaası, Gümüşsuyu, İstanbul
- Leverett, M. C.,** 1941. “Capillary Behaviour in Porous Solids” *Trans AIME*, Vol. 142, pp 152-169
- Ma, S., Morrow, N.R., Zhou, X., and Zhang, X.,** 1994. Characterization of Wettability from Spontaneous Imbibition Measurements, *paper CIM 94-47, Petr. Soc. of CIM Ann. Tech. Meeting*, Calgary, June, 12-15.

- Marmur A.**, 1992. Penetration and Displacement in Capillary Systems in Modern Approach to Wettability: Theory and Application, edited by M. Shrader and G. Loeb (Eds), 327-358, Plenum Press, New York.
- Marsden, S.S. and Nikias, P.A.**, 1962. The Wettability of the Bradford Sand. I., *Producers Monthly*, May, 2-5.
- Morrow, N. R.**, 1976. Capillary Pressure Correlations for Uniformly Wetted Porous Media, *J. Cdn. Pet. Tech.*, Oct.-Dec., 46-69.
- Morrow, N.R., Lim, H.T., and Ward, J.S.**, 1986. Effect of Crude-Oil-Induced Wettability Changes on Oil Recovery, *SPE Formation Evaluation*, February, 89-103.
- Morrow, N. R.**, 1990. Wettability and Its Effect on Oil Recovery, *Journal of Petroleum Technology*, December, 1476-1484.
- Morrow, N. R.**, 1991. Interfacial Phenomena in Petroleum Recovery, *N.R. Morrow (Editor)*, Surfactant Science Series, 36, Marcel Dekker Inc., New York, iii-iv.
- Öztorun, F.B.**, 2006. Determination of Reservoir Rock Wettability by Thin Layer Wicking Approach, *Ms. Thesis*, İ.T.Ü. Institute of Science and Technology, Maslak, İstanbul.
- Plateau, J.A.F.**, 1863. "Experimental and Theoretical researches on the figures of equilibrium of a liquid mass withdrawn from the action of gravity", *Smithsonian Institute Annual Reports: Series No:1*, pp 207-285
- Salathiel, R.A.**, 1973. Oil Recovery by Surface Film Drenaige in Mixed Wettability Rocks, *Journal of Petroleum Technology*, October, 1216-1224.
- Treiber, L.E., Archer, D.L., and Owens, W.W.**, 1972. A Laboratory Evaluation of the Wettability of Fifty Oil Producing Reservoirs, *SPEJ*, December, 531-540.
- Ucko, D.A.**, 1982. Basics for Chemistry, Academic Press., Orlando, Florida, pp. 416-427.
- Van Oss, C.J.** 1994. *Interfacial Forces in Aqueous Media*, Marcel Dekker, Inc., New York, USA, 21-98.
- Washburn, E. W.**, 1921. The Dynamics of Capillary Flow, *The Physical Review, Second Series*, **17(3)**, 273-283.

- White, L. R.**, 1982. "Capillary Rise in Powders," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 90, No.2, Dec., pp 536-538.
- Wolfrom, R. L., Chander, S., and Hogg, R.**, 2002. Evaluation of Capillary Rise Methods for Determining Wettability of Powders, *Minerals and Metallurgical Processing*, **19**, 198-202.
- Yıldırım, I.**, 2001. Surface Free Energy Characterization of Powders, The Virginia Polytechnic Institute, Ph.D. Dissertation, Mining and Minerals Engineering, Blacksburg, Virginia, USA, pp. 51-77.
- Yıldız, H.Ö.**, 1998. PT 703 Üretim Arttırma Yöntemleri Ders Notları, İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul.
- Yıldız, H.Ö., and Gökmen, M.**, 2001. An Investigation of Capillary and Viscous Forces for Very Strongly Water Wet Systems, *Petroleum Society's Canadian International Pet. Con.*, **133**, June, 12-14, Canada.
- Zisman W.A.**, 1944. Relation of the Equilibrium contact Angle to Liquid and Solid Constitution, *Advances in Chemistry Series*, **43**, 1-48.

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında İzmir’de doğan Celal Hakan CANBAZ, ilk öğrenimini İzmir Hakimiyet-i Milliye İlk Okulu’nda, orta öğrenimini İzmir Güzelyalı Ortaokulu ve lise öğrenimini İzmir Şirinyer Lisesi Yabancı Dil Ağırlıklı Bölümü’nde tamamladı. 2000 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü’nde lisans öğrenimine başladı. 2005 yılında Petrol ve Doğal Gaz Mühendisi olarak mezun olan CANBAZ, aynı bölümde yüksek lisans eğitimine devam etmiş olup, 2006 yılından beri İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü’nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.