

**GÖZENEKLİ ORTAMDA AKIŞKAN DOYMASI VE
KILCAL BASINÇ-DOYMA ARASINDAKİ İLİŞKİNİN
GAMA IŞINI ZAYIFLATMA TEKNİĞİ İLE
İNCELENMESİ**

126647

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Fiz. Lis. Ali İSHAKOĞLU
(304981045)**

İ. T. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANİSYON MERKEZİ

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Mayıs 2002
Tezin Savunulduğu Tarih : 31 Mayıs 2002**

Tez Danışmanı :

Doç.Dr. A. Filiz BAYTAŞ

R. Baytaş

26/6/2002

Diğer Jüri Üyeleri

Prof.Dr. Nurfer GÜNGÖR

Nurfer Güngör

26-06-02

Prof.Dr. Melih GEÇKİNLİ

Melih Geçkinli

26.06.2002

MAYIS 2002

126647

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, gözenekli bir ortamda akışkan doyması ve kılcal basınç-doyma arasındaki ilişki incelenmiştir. Foton zayıflatması, gözeneklilik, hacimsel yoğunluk, akışkan nemliliği ve sıvı doyması gibi gözenekli bir ortama ait özellikler, deneysel olarak gama ışını zayıflatma tekniği kullanılarak incelenmiştir.

Bu Yüksek Lisans tez çalışması, İ.T.Ü. Araştırma Fonu tarafından Lisansüstü Araştırma Projesi olarak desteklenmiştir.

Bu konuda çalışmayı bana öneren ve konu olarak veren, çalışmalar boyunca her zaman yardımlarını ve bilgisini esirgemeyen, yönlendiren, teşvik eden değerli hocam Sayın Doç. Dr. Filiz BAYTAŞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu Yüksek Lisans Tez çalışmasında deneylerde kullanılan, kumun tedarik edilmesini sağlayan ve her konuda yardımcı olan babam Raif İSHAKOĞLU'na, deneysel düzeneği yapan Betül Makina Sanayi ve Bekir TEMİZ'e, kimyasal sıvıların teminini sağlayan ve yardımcı olan Ergin Kimya Sanayi Limited Şirketi'ne ve Uğur İSHAKOĞLU'na yardımları için teşekkür ederim.

Ayrıca bütün hayatım boyunca gösterdikleri sabır, hoşgörü ve her konuda olan destekleri için annem, babam ve ablama en içten sevgilerimi sunarım.

Mayıs, 2002

Ali İSHAKOĞLU

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	V
ŞEKİL LİSTESİ	VI
SEMBOL LİSTESİ	IX
ÖZET	XII
SUMMARY	XIII
1. GİRİŞ	1
2. GÖZENEKLİ ORTAMLARIN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ	6
2.1. Yapı ve Sınıflandırma	6
2.2. Gözeneklilik	9
2.2.1. Gözenekliliğin tanımı	9
2.2.2. Katılma ve sıkışmanın gözenekliliğe etkileri	13
2.2.3. Gözenekliliğin ölçülmesi	13
2.3. Geçirgenlik	15
2.3.1. Geçirgenliğin tanımı	15
2.3.2. Geçirgenliği etkileyen faktörler	15
2.4. Gözenekli Ortamda Kılcal Basınç-Doyma İlişkisi	16
2.4.1. Akışkan doyması	18
2.4.2. Kılcallık	19
2.4.2.1. Yüzey gerilimi	19
2.4.2.2. Temas açısı	19
2.4.2.3. Islatan ve ıslatmayan akışkan	21
2.4.2.4. Temas açısı histerisizleri	21
2.4.3. Kılcal Basınç	22
2.4.3.1. Kılcal basınç eğrileri	25
2.4.3.2. Kılcal histerisiz	29
2.4.3.3. Leverett J-fonksiyonu	30
2.4.4. Gözenekli Bir Ortamda Üç Fazlı Akış	31
2.4.4.1. Üç fazlı akış için kılcal basınç-doyma ilişkisi	32
3. GÖZENEKLİ ORTAM ÖZELLİKLERİNİN GAMA IŞINI ZAYIFLATMA TEKNIĞİ İLE İNCELENMESİ	35
3.1. Gama Işını Zayıflatma Tekniği	35
3.2. Yapılan Çalışmalara Toplu Bakış	36

4. DENEY KOŞULLARININ TANITIMI	43
4.1. Deney Düzeneği	43
4.2. Deneylerde Kullanılan Malzemeler	47
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	49
5.1. Gözenekli Ortamda Akışkan Doymasının İncelenmesi	49
5.1.1. Birincil emme aşaması	51
5.1.2. Yerçekimine bağlı süzülme aşaması	58
5.1.3. İkincil emme aşaması	63
5.2. Gözenekli Ortamda İki Fazlı Akış İçin Kılcal Basınç ile Doyma Arasındaki İlişkinin İncelenmesi	64
5.2.1. Doyma Ölçümleri	64
5.2.2. Temas Açısı Ölçümleri	66
5.2.3. Deneysel Verilerin Değerlendirilmesi	66
5.3. Üç Akışkan İçeren Gözenekli Ortamda Akışkan Doyması ve Akışkanların Ortam Tarafından Tutulmalarının İncelenmesi	74
5.3.1. Birinci prosedür ile yapılan incelemeler	74
5.3.2. İkinci prosedür ile yapılan incelemeler	79
5.3.2.1. İkinci prosedür için kullanılan teorik altyapı	79
5.3.2.2. İki ve üç akışkan içeren ortam için deneylerin yapıları	82
5.3.2.3. Deney sonuçlarının değerlendirilmesi	83
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	89
KAYNAKLAR	93
ÖZGEÇMİŞ	96

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Bazı gözeneklilik ölçüm teknikleri.....	14
Tablo 2.2. Gözenekli ortamda taşınım ile ilgili çeşitli örnekler.....	17
Tablo 3.1. Moseley ve Dhir' in çalışmalarında kullanılan cam bilyelerin özellikleri.....	37
Tablo 3.2 Kullanılan akışkanların 300 ⁰ K ve 1 atm basıncındaki özellikleri.....	38
Tablo 4.1. Deneylerde kullanılan Co-60 kaynağının radyoaktif özellikleri.....	43
Tablo 4.2. Deneylerde kullanılan gözenekli ortamın özellikleri.....	47
Tablo 4.3. Deneylerde kullanılan sıvıların 20 ⁰ ve 1 atm basıncındaki özellikleri	48
Tablo 5.1. 1332 keV enerjide malzemelere ait zayıflatma katsayıları.....	50
Tablo 5.2. Yerçekimine bağlı emme ve ikincil emme deneylerinin sonuçları.	63
Tablo 5.3 Cam kürelerle üç sıvı için ölçümlenen temas açısı değerleri.....	68
Tablo 5.4 Süzülme aşaması için iki akışkanlı LNAPL-hava sistemindeki azaltılamaz nemlilik değerleri.....	75
Tablo 5.5 Süzülme aşaması için üç akışkanlı su-LNAPL-hava sistemindeki azaltılamaz nemlilik değerleri.....	76
Tablo 5.6 İki akışkanlı LNAPL-hava sistemi için gözenekli ortamda tutunum.....	84
Tablo 5.7 Üç akışkanlı su-LNAPL-hava sistemi için gözenekli ortamda tutunum.....	85

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

- Şekil 2.1** : Doğal gözenekli malzeme örnekleri. (A) Plaj kumu, (B) kumtaşı, (C) kireçtaşı, (D) Çavdar ekmeği, (E) tahta ve (F) insan akciğeri. En altta yer alan iki şekil, yapı endüstrisinde kullanılan tanecikli gözenekli malzemelerdir. Solda 0.5 cm çaplı Liapor küreler, sağda 1 cm boyutunda ezilmiş kireçtaşları..... 7
- Şekil 2.2** : (a) Paslanmaz bir ekranın elektron mikroskobu ile alınan görüntüsü. Tel sayısı 200x1500 (Her doğrultudaki inch başına tel sayısı). $\phi=0.385$, $A_0 = 6.67 \times 10^4 m^{-1}$ ve gözenek çapı $= 10 \mu m$ dır. Buradaki noktalı hattın uzunluğu $100 \mu m$ dır. (b) Fitol olarak kullanılan bir paslanmaz çelik fiber topluluğu..... 8
- Şekil 2.3** : (a) Poliüretan bir köpüğün elektron mikroskobu ile alınmış görüntüsü. Inch başına gözeneklerin sayısı 100 dür, $\phi = 0.98$ ve gözenek çapı $= 20 \mu m$. (b) Kesik bir kireçtaşı parçası yüzeyinin elektron mikroskobu ile alınan görüntüsü..... 9
- Şekil 2.4** : Kübik sıralanışa sahip uniform kürelerin gözenek uzayı ve düzeni..... 11
- Şekil 2.5** : Rombohedral sıralanışa sahip uniform kürelerin gözenek uzayı ve düzeni..... 12
- Şekil 2.6** : Temas açısının gösterimi..... 20
- Şekil 2.7** : Eğimli bir katı yüzey üzerinde temas açılarının şematik gösterimi..... 22
- Şekil 2.8** : Konik kılcallığın şeması..... 23
- Şekil 2.9** : Muhtelif doymalarda hava ve suyun yer değiştirmesi; (a) Pendular doyma, (b) iki küre arasındaki pendular halka, (c) funicular su doyması, (d) insular hava doyması..... 24
- Şekil 2.10** : Emme ve süzülme aşamalarında fazların yer değiştirmesi..... 25
- Şekil 2.11** : Emme ve süzülme işlemlerinin şematik gösterimi..... 26
- Şekil 2.12** : Cam bilye yüzeyinde süzülme sonucu oluşan ıslatan akışkan filminin elektron mikroskobu ile alınan görüntüsü. A) Kuru hal, B) süzülme işleminden sonra alınan görüntü..... 27
- Şekil 2.13** : Kılcal basınç eğrilerindeki histerisiz..... 29
- Şekil 2.14** : Aynı ara yüzeyin farklı derinliklerde oluşması. A) Süzülme, B) emme..... 30

Şekil 2.15 :	Üç fazlı akış için doymadaki yer değişimin şeması; (a) Gaza temas eden NAPL' i suyun işgal etmesi, (b) buna müteakip NAPL' in gazın yerini alması. Üç fazlı akış için süzülmedeki yer değişimin şeması; (c) NAPL' in hava ve su dolu gözenekler veya boğazlara temas edişi, (d) suyun yerini alan NAPL' i gazın işgal etmesi.....	33
Şekil 3.1 :	Gama ışını zayıflatma tekniğinin blok şeması.....	36
Şekil 3.2 :	Emme ve süzülme deneyleri için kullanılan düzeneç.....	37
Şekil 3.3 :	Kuruma deneylerinin ve koordinat sisteminin şeması.....	41
Şekil 4.1 :	Deney düzeneğinin blok şeması.....	44
Şekil 4.2 :	Deney düzeneğini oluşturan elemanların fotoğrafları. (a) Genel görünüm, (b) gözenekli ortam kolon sisteminin yandan görünümü, (c) milimetrik düşey hareket adımını sağlayan mekanizma, (d) plexiglas flanjlara ve paslanmaz çelik eleğin görünümü, (e) kaynak ve dedektör ikilisinin içinde bulunduğu kolimatörleri taşıyan düşey plaka.....	45
Şekil 4.3 :	Dar demet geometrisini oluşturan kolimatörler. (a) Kaynak tarafındaki, (b) dedektör tarafındaki kolimatörler.....	46
Şekil 5.1 :	Sıvıların kum içerisinde kılcallığın etkisiyle zamana bağlı olarak yükselmesi.....	52
Şekil 5.2 :	Gözenekli ortama ait yerel gözeneklilik.....	53
Şekil 5.3 :	Farklı ölçüm seviyelerindeki doymanın (a) su, (b) etanol ve (c) LNAPL için zamana bağlı değişimi.....	54
Şekil 5.4 :	Kum kolonunda ortalama doyma değerlerinin zamana bağlı değişimi.....	55
Şekil 5.5 :	Ortalama doymanın kum yüzeyinden itibaren zamana bağlı değişimi.....	56
Şekil 5.6 :	Kum kolonunun ortalama nemliliğinin zamana bağlı değişimi.	57
Şekil 5.7 :	Zamana bağlı doyma ve nemliliğin karşılaştırılması.....	58
Şekil 5.8 :	Su için zamana bağlı olarak azaltılamaz doyma ve nemlilik.....	59
Şekil 5.9 :	Etanol için zamana bağlı olarak azaltılamaz doyma ve nemlilik.....	60
Şekil 5.10 :	LNAPL için zamana bağlı olarak azaltılamaz doyma ve nemlilik.....	61
Şekil 5.11 :	Efektif doymanın zamana bağlı değişimi.....	62
Şekil 5.12 :	Temas açısı deneylerinin fotoğrafları (a) İlerleme, (b) geri çekilme temas açıları.....	67
Şekil 5.13 :	Üç sıvı için Leverett fonksiyonuna göre birincil emme doyması.....	68
Şekil 5.14 :	Üç sıvı için yeniden düzenlenmiş Leverett fonksiyonuna göre emme doyması.....	70
Şekil 5.15 :	Su için emme ve süzülme doymalarına göre Leverett fonksiyonu.....	70
Şekil 5.16 :	Üç sıvı için Leverett fonksiyonuna göre süzülme doyması.....	71
Şekil 5.17 :	Üç sıvı için Leverett fonksiyonuna göre efektif doyma.....	72

Şekil 5.18 :	Üç sıvı için yeniden düzenlenmiş Leverett fonksiyonuna göre süzülme doyması.....	73
Şekil 5.19 :	Birincil emme aşamasında iki ve üç akışkanlı sistem için doyma eğrileri.....	77
Şekil 5.20 :	Süzülme aşamasında iki ve üç akışkanlı sistem için doyma eğrileri.....	78
Şekil 5.21 :	Süzülme aşamasında iki akışkanlı LNAPL-hava sistemi için hacimsel nemlilik eğrisi.....	86
Şekil 5.22 :	Süzülme aşamasında iki ve üç akışkanlı sistem için hacimsel nemlilik eğrileri.....	87
Şekil 5.23 :	Emme aşamasında iki ve üç akışkanlı sistem için hacimsel nemlilik eğrileri.....	88

SEMBOL LİSTESİ

A	: Gözenekli ortam kesiti (cm^2)
c	: Kimyasal yapı bileşenleri konsantrasyonu
C_s	: Yayılma katsayısı (N/m)
d	: Gözenekli ortamı oluşturan bilyaların çapı (cm)
g	: Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
h	: Akışkan serbest yüzeyinden itibaren yükseklik (cm)
I_{ds}	: Kuru kum ile dolu kolonu geçen radyasyon şiddeti
I_h	: h yüksekliğinde kolonu geçen radyasyon şiddeti
I_{sd}	: Sadece sıvı ile dolu kolonu geçen radyasyon şiddeti
I_{sh}	: Sıvı ve hava içeren doymamış kolonu geçen radyasyon şiddeti
I_{ss}	: Islatan akışkan ile tamamen doymuş kolonu geçen radyasyon şiddeti
I_{top}	: Su, LNAPL, hava içeren doymamış kolonu geçen radyasyon şiddeti
I_0	: Boş kolonu geçen radyasyon şiddeti
$J(S_w)$	: Boyutsuz kılcal basınç Leverett J-fonksiyonu
K	: Geçirgenlik (<i>darcy</i>)
L	: Gözenekli ortam uzunluğu (cm)
N_{hava}	: Gözenekli ortamda hava nemliliği
N_i	: i . bileşenin nemliliği
N_l	: Sıvı nemliliği
N_{LNAPL}	: LNAPL için nemlilik
$N_{LNAPL(ir)}$	: Azaltılamaz LNAPL nemliliği
N_s	: Gözenekli ortamda katı kesri
N_{su}	: Su için nemlilik
$N_{su(ir)}$	: Azaltılamaz su nemliliği
N_{top}	: Toplam sıvı nemliliği
$N_{top(ir)}$	: Azaltılamaz toplam sıvı nemliliği
N_w	: w-akışkanının nemliliği
N_{wo}	: Azaltılamaz ıslatan akışkan nemliliği
N_{no}	: Artık ıslatmayan akışkan nemliliği
P_e	: Giriş basıncı (N/m^2)
P_i	: Orta ıslatan akışkandaki basınç (N/m^2)

P_n	: Islatmayan akışkandaki basınç (N/m^2)
P_w	: Islatan akışkandaki basınç (N/m^2)
P_c	: Kılcal basınç (N/m^2)
$P_{c(iw)}$	: Orta ıslatan-ıslatan akışkan kılcal basıncı (N/m^2)
$P_{c(ni)}$	: Islatmayan-orta ıslatan akışkan kılcal basıncı (N/m^2)
$P_{c(nw)}$	: Islatmayan-ıslatan akışkan kılcal basıncı (N/m^2)
r_1, r_2	: Yüzey eğrileşmesinin iki asal yarıçapı (cm)
r^*	: Ortalama eğrileşme yarıçapı (cm)
S_w	: w-akışkanının (ıslatan akışkan) doyması
S_n	: Islatmayan akışkan doyması
S_i	: Orta ıslatan akışkan doyması
S_e	: Efektif doyma
S_{wo}	: Azaltılamaz ıslatan akışkan doyması
S_{no}	: Artık ıslatmayan akışkan doyması
S_{lh}	: Kolon eksenini boyunca herhangi bir pozisyondaki doyma
T	: Sıcaklık
V_g	: Gözenek hacmi (cm^3)
V_k	: Katı hacmi (cm^3)
V_t	: Toplam hacim (cm^3)
V_w	: w-akışkanının hacmi (cm^3)
w_i	: i. elementin ağırlıksal yüzdesi
$x_{l.sat}$	: %100 doymuş ortamda temsili sıvı kalınlığı (cm)
x_s	: Kum kalınlığı (cm)
x_t	: Toplam kalınlık (cm)
ΔP	: Basınç farkı (atm)
$\Delta \rho$	: İki akışkan arasındaki yoğunluk farkı (g/cm^3)
ρ_d	: Gözenekli ortam için hacimsel yoğunluk (g/cm^3)
ρ_p	: Gözenekli ortam için parçacık yoğunluğu (g/cm^3)
δ	: Teorik değerden sapma miktarı (%)
γ	: Akışkan vizkozitesi ($centipoise$)
λ	: Gözenek boyut dağılım parametresi
μ	: Lineer zayıflatma katsayısı ($1/cm$)
μ_{den}	: Deneysel olarak saptanan lineer zayıflatma katsayısı ($1/cm$)
μ_i	: i. elementin lineer zayıflatma katsayısı ($1/cm$)
μ_l	: Sıvının lineer zayıflatma katsayısı ($1/cm$)
μ_{LNAPL}	: LNAPL in lineer zayıflatma katsayısı ($1/cm$)
μ_s	: Kumun lineer zayıflatma katsayısı ($1/cm$)
μ_{su}	: Suyun lineer zayıflatma katsayısı ($1/cm$)

μ_{teo}	: Teorik olarak hesaplanan lineer zayıflatma katsayısı ($1/cm$)
ϕ	: Gözeneklilik
ϕ_e	: Efektif gözeneklilik
θ	: Temas açısı
θ_A	: İlerleme temas açısı
θ_R	: Geri çekilme temas açısı
σ	: Yüzey gerilimi (N/m)
σ_{lg}	: Sıvı-gaz arasındaki yüzey gerilimi (N/m)
σ_{ls}	: Sıvı-katı arasındaki yüzey gerilimi (N/m)
σ_{sg}	: Katı-gaz arasındaki yüzey gerilimi (N/m)
σ_{ni}	: Islatmayan-orta ıslatan akışkan arasındaki yüzey gerilimi (N/m)
σ_{iw}	: Orta ıslatan-ıslatan akışkan arasındaki yüzey gerilimi (N/m)
σ_{wn}	: Islatan-ıslatmayan akışkan arasındaki yüzey gerilimi (N/m)

ÖZET

GÖZENEKLİ ORTAMDA AKIŞKAN DOYMASI VE KILCAL BASINÇ-DOYMA ARASINDAKİ İLİŞKİNİN GAMA IŞINI ZAYIFLATMA TEKNİĞİ İLE İNCELENMESİ

Gözenekli ortamlar ile doğada ve birçok mühendislik alanında sık sık karşılaşmaktadır. Kum, kumtaşı, toprak, seramik, köpük lastik, ekmek ve akciğer uygulamada karşılaşılan gözenekli malzemelere örneklerdir. Gözenekli ortamlarda temel olarak önem taşıyan değişken, faz doyması veya akışkan nemliliğidir. Endüstriyel çözücüler ve non-aqueous phase liquid (NAPL) olarak bilinen sıvı atıkların hareketinin anlaşılmasında, atık su bilimi alanındaki araştırmalarda önemli bir konudur çünkü birçok sıvı atık, zehirlidir veya kanser oluşumuna neden olur. Gama zayıflatma tekniği, akışkan nemliliği ve doyma değerlerinin elde edilmesi için toprak fiziği uygulamalarında geleneksel olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, foton zayıflatması, gözeneklilik, hacimsel yoğunluk, akışkan nemliliği ve sıvı doyması gibi gözenekli bir ortama ait özellikler gama ışını zayıflatma tekniği kullanılarak incelenmiştir. Gama kaynağı olarak ^{60}Co (1332 keV), homojen ve uniform bir gözenekli ortam olarak Ottawa kumu ve sıvı olarak da su, etanol ve LNAPL (toluen) kullanılmıştır.

Bu çalışmada, ortamın doyma özellikleri, standart bir sıvı olan su ve endüstriyel sıvılar olan etanol ve LNAPL ile karşılaştırılmıştır. Bunun yanı sıra LNAPL tutunumu, iki akışkanlı LNAPL-hava ve üç akışkanlı su-LNAPL-hava sistemleri için incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Kılcal basınç-doyma ilişkisi, gözenekli bir ortamda akışkan dağılımının doğasını nitelendirmek için önemlidir. Sunulan çalışmada, Leverett tarafından geliştirilmiş olan boyutsuz kılcal basınç fonksiyonu kullanılarak sıvılar için bu ilişki de incelenmiştir.

SUMMARY

INVESTIGATION OF FLUID SATURATIONS AND CAPILLARY PRESSURE- SATURATION RELATIONSHIPS IN A POROUS MEDIUM BY GAMMA-RAY ATTENUATION TECHNIQUE

Porous media are most frequently met in nature and in many engineering fields. Sand, sandstone, soil, ceramic, foam rubber, bread and lungs are examples of porous materials encountered in practice. A variable fundamental importance is the phase saturation or fluid content in porous media. Understanding industrial solvents and liquid contaminants referred to as non-aqueous phase liquid (NAPL) contaminants, movement is an important topic of research in the field of contaminant hydrology since most liquid contaminants are toxic or potentially cancirogenic. The gamma attenuation technique has traditionally been used in soil physics applications for the determination of fluid content and saturation values.

In this study, the properties of a porous medium, such as, photon attenuation, porosity, bulk density, fluid content, and liquid saturation were investigated by using the gamma-ray attenuation technique. ^{60}Co (1332 keV) as the gamma source, the Ottawa sand as a homogeneous and uniform porous medium, and water, ethanol and LNAPL (toluene) as liquids were used.

In this study, the saturation properties of the medium were compared for water as a standart liquid and ethanol, LNAPL as industrial liquids. Besides, LNAPL retention was investigated and compared for two-fluid LNAPL-air and three-fluid water-LNAPL-air systems. Capillary pressure-saturation relation is important for characterising the nature of fluid distribution in a porous medium. Also, in the presented study, this relationship was examined for the liquids by using the dimensionless capillary pressure function, which was developed by Leverett.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Gözenekli ortamlar, günlük yaşamımızda, teknolojiye ve doğada hemen her yerde karşımıza çıkan malzemelerdir. Beton tuğla, kireç taşı gibi birçok yapı malzemesi, tahta, toprak, kayalar, bazı plastikler, kurutulmuş et ve sebzeler, hatta insan akciğeri ve kemikler gözenekli yapıya sahip ortamlardan bazı örneklerdir. Bu nedenle, tıp, biokimya, mühendislik ve teknolojik çalışmalarda problemlerin çözümü gözenekli ortamlar üzerine yapılmaktadır.

Gözenekli ortamlarda çok fazlı akış önemli bir araştırma konusudur. Bu konudaki araştırmalar çoğunlukla gözenekli ortamda akışın modellenmesi veya çeşitli deneysel yöntemlerle elde edilen verilerin değerlendirilmesi şeklindedir.

Bu konudaki çalışmalar, 1800 yıllarında Young'ın birbirleri ile temas eden iki sıvı arasındaki arayüzeyde yüzey gerilimini tanımlaması ile başlamıştır. Gözenekli ortamla ilgili çalışmalara, kum yataklarında suyun ilerleyişini inceleyen kitabı ile Darcy 1856 'da önemli bir katkı sağlamıştır (Kaviany, 1995).

Gözenekli ortamlarda akışın matematiksel olarak incelenmesinde, kılcal basınç ve geçirgenliğin, doymanın bir fonksiyonu olarak tarif edilmesi yoluna gidilmektedir. Kılcal basınç-doyma ve geçirgenlik-doyma ilişkileri, özellikle toprak bilimi ve petrol mühendisliğinde geniş çapta araştırılmaktadır. Kılcal basınç-doyma ilişkisinin incelenmesinde, Leverett 1941 yılında önemli bir ampirik fonksiyon bulmuştur. Gözenekli ortamlarda kılcal basınç-doyma ilişkisini en iyi tanımladığı kabul edilen Leverett fonksiyonu günümüze kadar kullanılmıştır.

Genellikle kılcal basınç-doyma ilişkisi deneysel veriler kullanılarak, Leverett fonksiyonu veya diğer bilim adamları tarafından geliştirilmiş olan ampirik bağıntılar yardımı ile incelenmektedir.

Bu konuda yapılan çalışmaların bir kısmında kılcal basınç-doyma ilişkisini teorik olarak incelemek üzere bazı modeller öngörülmektedir. Bu çalışmalara bir örnek, **Hu ve diğerleri (2001)** tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, ayrık gözenekli ortamın termal iletkenliği için, kılcal basınç-doyma ilişkisini inceleyen Leverett-Lewis eşitliğine dayanan yeni bir model geliştirilmiştir. Sonuçta, doyma ve kılcal basıncın değişimi ıslak doymamış gözenekli ortamın iç yapısı ve sıvı, katı, gaz fazlarının olası dağılımlarını göstermektedir. Burada önerilen model, doymuş ve ıslak doymamış gözenekli ortamın termal iletkenliğini etkin bir şekilde tahmin edebilmektedir. Doymuş gözenekli ortam için deneysel verilerle yapılan karşılaştırmalar, bu çalışmada önerilen modelin gözenekli ortamın termal iletkenliğini tahmin etmek için makul ve uygun olduğunu göstermiştir.

Demond ve diğerleri (1994) tarafından yapılan bir çalışmada da kılcal basınç-doyma ilişkisini etkileyen bazı faktörler incelenmiştir. Surfactant, yani bir sıvının yüzey gerilimini azaltan madde, üç ara yüzey sisteminde emilebilir : Organik sıvı-su, su-katı ve organik sıvı-katı. Bu durumda çok fazlı akışın modellenmesinde, surfactantların emilmesi, temel yapısal ilişkiler olan kılcal basınç-doyma ilişkisini etkilemektedir. Bu çalışmada organik sıvı-su sistemi için surfactant absorpsiyonunun söz konusu ilişkiyi nasıl etkilediği incelenmiştir. Kimyasal temele dayanan bazı deneysel ölçümler ile yüzey kimyası ile ilgili bilgiler, temas açısı ve kılcal basınç-doyma bilgileri elde edilip, Leverett fonksiyonunun geliştirilmiş bir versiyonu kullanılmıştır. Sonuçta, süzülme esnasındaki doymanın surfactantlar nedeniyle değişebileceği gösterilmiştir.

Gözenekli ortamlarda kılcal basınç-doyma ilişkisinin deneysel olarak incelendiği, çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan birisi **Reitsma ve Kueper (1994)** tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, farklı basınç koşulları altındaki sert duvarlı kaya parçaları için, akışkan doyması ile kılcal basınç arasındaki ilişkiyi belirlemek üzere bir laboratuvar tekniği geliştirilmiştir. Kaya numuneleri Ontario bölgesinden kireç taşı kütleleri olarak toplanmış ve 12 cm kalınlığında, 29.5 x 26.5 cm boyutlarında kesilmiştir. Deney düzeneğinde, bir çatlak için kılcal basınç-doyma ilişkisini ölçmek üzere, kılcal engel kullanılmıştır. Bu engel, ıslatmayan sıvının ıslatan sıvı ile yer değiştirerek çatlağın içine girmesini sağlamaktadır. Böylece, belli

kılcal basınçlarda, kılcal engeli geçen ıslak faz miktarı kılcal basınç–doyma ilişkisini belirtmektedir. Bu arada kaya numunesi üzerine çeşitli basınçlar uygulanmaktadır. Ölçümlenen kılcal basınç eğrileri Brooks–Corey gözenekli ortam kılcal basınç fonksiyonuna uyumlu olarak bulunmuştur.

Gama ışını zayıflatma tekniği, gözenekli ortamlarda gözeneklilik, nem miktarı, akışkan doymasının bulunmasında ve kılcal basınç–doyma ilişkisinin deneysel olarak incelenmesinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. **Ferrand ve diğerleri (1986)** tarafından yapılan çalışmada, üç akışkan için gözenekli ortamın doyması çift enerjili gama ışını zayıflatma tekniği ile ölçülmüştür. Önerilen bu kalibrasyon tekniğinde, iki akışkan içeren ortam numuneleri kullanılmaktadır. Numune içerisinde akışkan içeriklerinin veya gözeneklerin homojen olarak dağılması gerekmektedir. Gama ışını zayıflatma bilgisinin verilmesiyle elde edilen sistem parametreleri, üç akışkan içeren numunelerdeki akışkan içeriklerinin hesaplanmasını sağlamaktadır. Burada, çift enerjili gama ışını zayıflatma grubu olarak ^{137}Cs ve ^{241}Am kaynakları kullanılmıştır. Gözenekli ortam numunesi olarak da ayrık quartz kumu yani Ottawa CN-501 test kumu kullanılmıştır. Ayrıca, bu çalışmada akışkan olarak su, trikloroetilen (TCE) ve hava kullanılmıştır. Burada kullanılan TCE ve benzer organik çözücüler genellikle endüstriyel atık sahalarından kaynaklanan kirleticilerde bulunmaktadır. Sonuçlar gama zayıflatma tekniğinin, su ve TCE gibi organik kirleticilerin gözenekli bir ortamdaki içeriklerinin laboratuvarında saptanması için yararlı bir yöntem olduğunu öngörmektedir.

Kılcal basınç–doyma ilişkisinin incelendiği bir diğer çalışma **Plumb (1991)** tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, karmaşık gözenekli ortamlar olarak kabul edilen besinlerin kurutulmasına yönelik bir incelemedir. Çalışmada her çaptaki cam bilyeler için kılcal basınç–doyma eğrileri ve yine gama ışını zayıflatma tekniği ile saptanan derinliğe bağlı gözeneklilik eğrileri bulunmaktadır. Sonuçta, cam bilyelerin çapları büyüdükçe, doymanın süzülme esnasında daha hızlı bir şekilde düştüğü, yani çap büyüdükçe kurumanın hızlı olduğu anlaşılmıştır.

Gama ışını zayıflatma tekniği ile yapılan çalışmalara en iyi örneklerden birisi **Moseley ve Dhir (1996)** tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ıslatan faz doyması ve kılcal basınç arasında fonksiyonel bir ilişki geliştirilmiştir. Burada, düzgün ayrık silika parçacıklarının oluşturduğu gözenekli bir ortamdaki ıslatan faz

sıvısının emme ve süzülmesi göz önüne alınmıştır. Çalışmada, deneysel olarak elde edilen bilgiler yardımıyla Leverett'in kılcal basınç fonksiyonu kullanılmıştır. Kullanılan üç test sıvısı ve iki ayrı boyuttaki cam bilyeler için süzülme ve emme işlemlerine ait Leverett'in fonksiyonunun doymaya bağlı değişimi grafiklerle incelenmiştir.

İki enerjili gama kaynağı kullanılan bir diğer çalışma **Hofstee ve diğerleri (1997)** tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, 8 cm çapında 1 m uzunluğunda, iki cam kolon içerisine 90 cm yüksekliğinde kum yerleştirilerek gözenekli ortam oluşturulmuştur. Kılcal basınç-nem miktarı ilişkisinin incelenmesi için Van Genuchten' in formülasyonu kullanılmıştır.

Organik kimyasal maddelerin yeraltı sularına bulaşması ihtimali yüksektir. Bu nedenle, bilim adamları toprak katmanlarında organik sıvı geçişini incelemektedirler. Bu tip bir çalışma **Walser ve diğerleri (1999)** tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, organik sıvı kirleticilerinin katmanlı toprakta tutulması, iki enerjili gama radyasyonu kullanılarak incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, sıvı organik atıklarının doymalarının beklenenden yüksek olduğu ve katmanlaşmış toprakta hayli yüksek oranda tutuldukları kanısına varılmıştır.

Kumlu gözenekli ortamlarda bir LNAPL' in ortama sızması ve dağılımı için kullanılan bağıl geçirgenlik-doyma-basınç arasındaki parametrik modellerin deneysel verilerle karşılaştırılmasına yönelik bir çalışma **Oostrom ve Lenhard (1998)** tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, 1-m uzunluğundaki düşey kolonlarda 3 kısım deney yapılmıştır. Kolonlar sırasıyla, uniform bir kum ile, geniş parçacık boyut dağılımına sahip bir kum ile ve kalın yapılı uniform bir kumun ince yapılı uniform bir kumun üzerine katmanlandığı bir sistem ile doldurulmuştur. Su ile doyma koşulları sağlandıktan sonra, uniform olarak sabit bir oranda LNAPL enjekte edilmiştir. Su ve LNAPL doymaları ^{137}Cs ve ^{241}Am kaynaklarından oluşan iki enerjili gama radyasyon sistemi ile zamanın ve yükselmenin fonksiyonu olarak ölçümlenmiştir. LNAPL' in sızma ve dağılımı parametrik bağıl geçirgenlik-doyma-basınç modelleri ile oluşturulmuştur. Ayrıca, test edilmiş olan bu üç parametrik modelin performansları arasındaki farklılıklar için birtakım önerilerde bulunulmuştur.

Oostrom ve diğerleri (1998) tarafından yapılan bir diğer çalışmada gözenekli ortamlarda tek kaynaklı gama radyasyonu için geliştirilmiş kalibrasyon ve ölçümleme prosedürleri incelenmiştir. Çalışmada üç tane uygulama için yeni prosedürler tarif edilmiştir. Bu uygulamalar, doymamış gözenekli ortamda su nemliliği değerleri, doymuş sistemlerde üç akışkan için su ve NAPL nemliliği ve doymuş sistemlerdeki tuz konsantrasyonu değerlerinin belirlenmelerini içermektedir. Her bir uygulama için yeni tek-kaynak metodu ve standart çift-kaynak gama radyasyonu metodlarının karşılaştırılması amacı ile basit deneyler ve örnek hesaplamalar yapılmıştır. Kaynak olarak ^{137}Cs ve ^{241}Am kullanılmıştır. Ayrıca, her bir uygulama için hata artış formülüne dayalı olarak hata analizleri yapılmıştır. Bu analizler, geleneksel çift-kaynak metodu yerine tek-kaynak metodu kullanıldığında elde edilen ölçüm miktarlarının olası hatalarında azalma göstermiştir. Dolayısıyla, her bir durumda tek-kaynak metodu çift-kaynak metoduna göre daha güvenilir veriler sağlamıştır.

Yukarıda bahsedilen yayınlardan da anlaşılacağı üzere, gözenekli ortamda akışın incelenmesinde önemi büyük olan kılcal basınç-doyma ilişkisi, teorik modeller kurularak veya deneysel olarak saptanan doyma ve gözeneklilik bilgisi bu konuda türetilmiş ampirik bağıntılarda kullanılarak açıklanmaktadır. Bu konudaki deneysel çalışmalarda, gama ışını zayıflatma yöntemi ile doyma bilgilerine ulaşmak günümüzde de yaygın olarak uygulanmaktadır.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında da, gama ışını zayıflatma tekniği kullanılarak gözenekli ortam özellikleri incelenmiştir. Gama kaynağı olarak ^{60}Co (1332 keV), gözenekli ortam olarak Ottawa kumu ve sıvı olarak damıtılmış su, etanol, toluen kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar üç aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada gözenekli ortama ait , gözeneklilik, söz konusu üç sıvı ile ilgili doyma özellikleri gibi parametreler saptanmıştır. İkinci aşamada su, etanol ve toluen için kılcal basınç ve doyma ilişkileri yine gama ışını zayıflatma bilgileri kullanılarak saptanmıştır. Burada gözenekli ortamda hava ve sıvı olmak üzere iki faz mevcuttur. Çalışmanın son bölümünde ise, gözenekli ortam içerisinde su-toluen-hava olmak üzere üç farklı akışkan için bazı parametreler incelenmiştir.

BÖLÜM 2

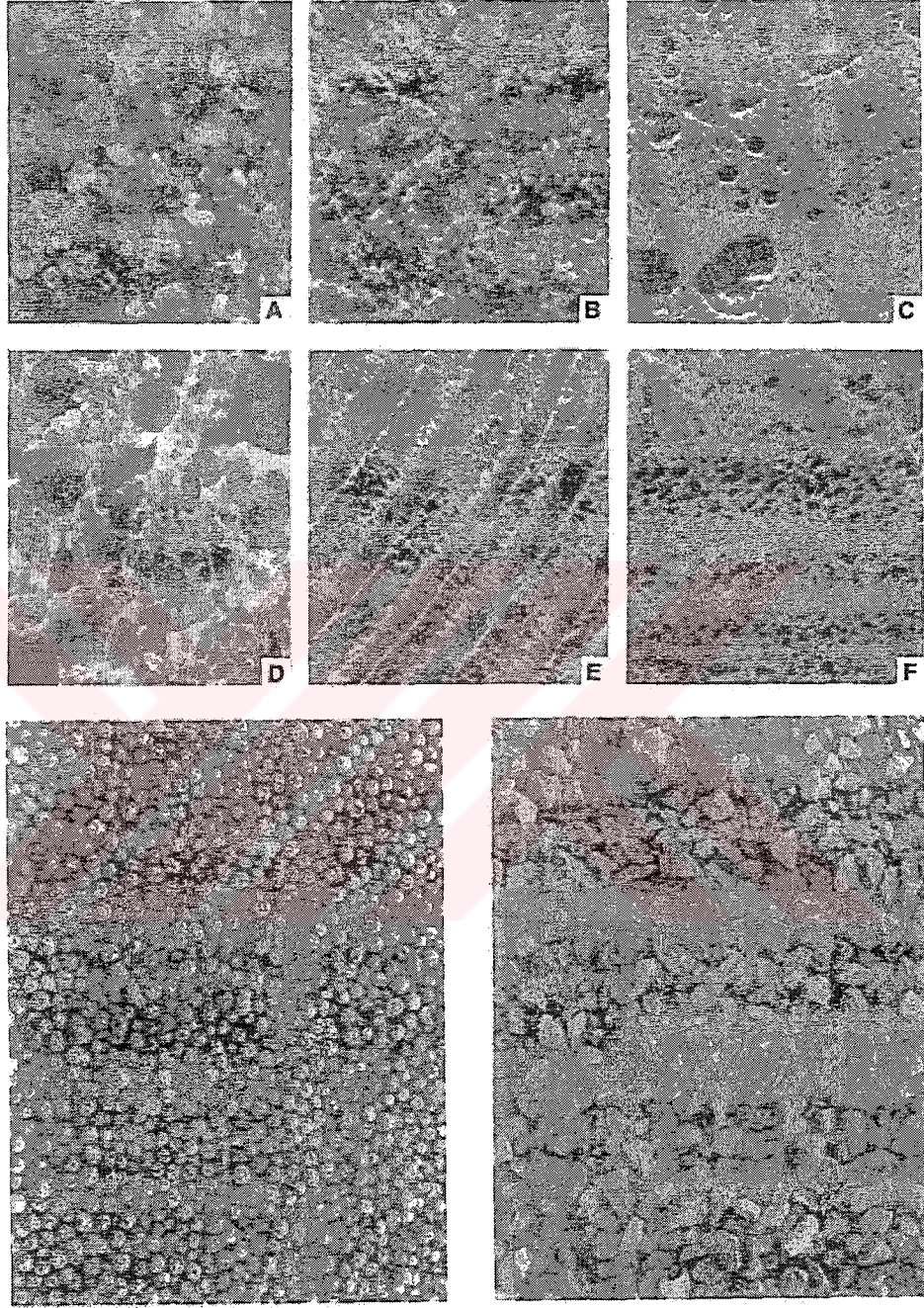
GÖZENEKLİ ORTAMLARIN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ

Gözenekli ortam özellikleri mikroskopik ve makroskopik olmak üzere iki seviyede tanımlanır. Mikroskopik tanımlama ortamın gözenek yapısının ve gözenek dağılımının incelenmesine dayanır. Bu incelemede gözenek boyutu dağılımı istatistiksel olarak tanımlanır. Gözenekli ortamın makroskopik özellikleri ise birçok gözenekten oluşan seçilmiş bir bölgenin ortalama davranışlarını göstermektedir. Yani makroskopik özellikler bir gözenekten daha büyük boyutlar için tanımlanırlar. Bir gözenekli ortamın makroskopik özelliklerinden bazıları; gözeneklilik, geçirgenlik, kılcallık, iletkenlik ve ıslanabilirliktir. Bu bölümde gözenekli ortamların, tez çalışmasına konu olan, bazı makroskopik özelliklerine değinilmektedir.

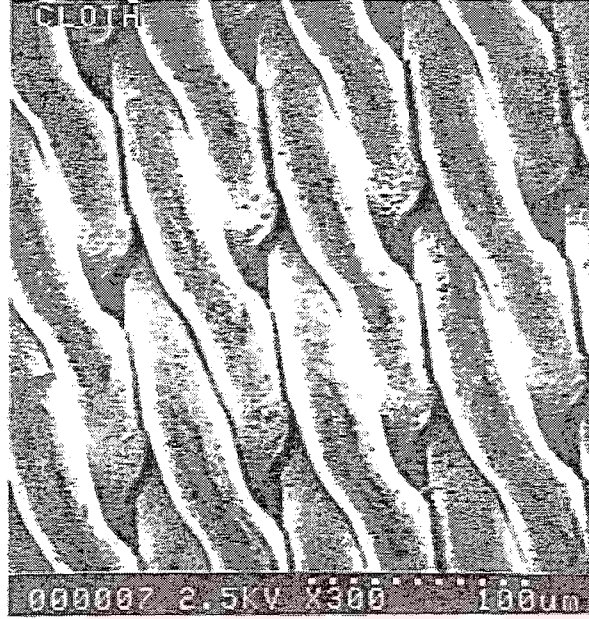
2.1. YAPI VE SINIFLANDIRMA

En genel anlamda gözenekli madde içinde delikler bulunan bir katıdır. Ancak, içi boş metal bir silindir gözenekli madde olarak sınıflandırılmaz. Zira gözenekli maddeyi oluşturan gözenekler, genellikle çıplak gözle görülemezler. Dolayısıyla gözenekli madde teriminin ayrıntılı bir şekilde belirtilmesi gerekir. Birbirleriyle ilişkili olsun olmasın, madde içinde düzgün yada karmaşık bir dağılım gösteren delikleri ve boşlukları olan katılar, bu gibi boşlukların katı içinde oldukça sık rastlanması koşuluyla gözenekli madde olarak sınıflandırılmıştır (Collins, 1973).

Doğal ve yapay maddelerin büyük bir kısmı gözeneklidir. Doğal bir gözenekli ortamdaki gözeneklerin dağılımı düzensizdir. Şekil 2.1 'de görüldüğü gibi doğal gözenekli ortama örnek olarak, plaj kumu, kumtaşı, kireçtaşı, çavdar ekmeği, tahta ve insan akciğeri verilebilir. Ayrıca Şekil 2.2 ve Şekil 2.3 'de yapay gözenekli ortamlara örnek olmak üzere sert bir paslanmaz ekran, fitil olarak kullanılan paslanmaz fiber topluluğu, poliüretan köpük ve kesik bir kumtaşı parçası yüzeyinin elektron mikroskobu ile alınan görüntüsü görülmektedir.



Şekil 2.1 Doğal gözenekli malzeme örnekleri. (A) Plaj kumu, (B) kumtaşı, (C) kireçtaşı, (D) çavdar ekmeği, (E) tahta ve (F) insan akciğeri. En altta yer alan iki şekil, yapı endüstrisinde kullanılan tanecikli gözenekli malzemelerdir. Solda 0.5 cm çaplı Liapor® küreler, sağda 1 cm boyutunda ezilmiş kireçtaşları (Nield ve Bejan, 1998).



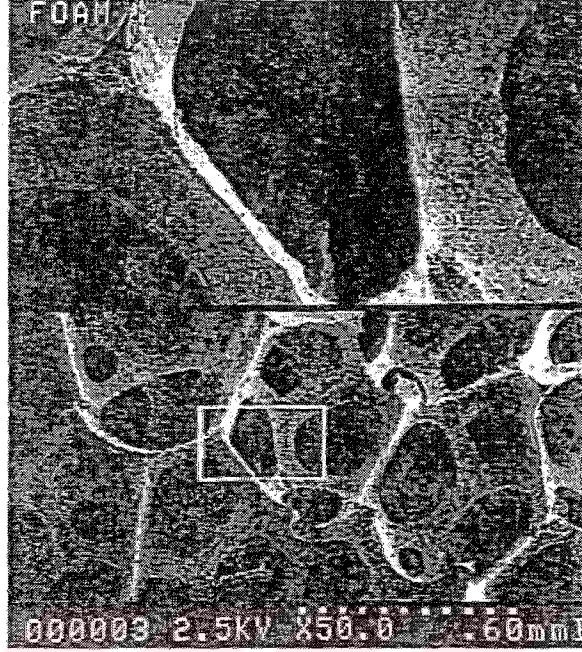
(a)



(b)

Şekil 2.2 (a) Paslanmaz bir ekranın elektron mikroskobu ile alınan görüntüsü. Tel sayısı 200x1500 (Her doğrultudaki inch başına tel sayısı). $\phi = 0.385$, $A_0 = 6.67 \times 10^4 m^{-1}$ ve gözenek çapı $= 10 \mu m$ dır. Buradaki noktalı hattın uzunluğu $100 \mu m$ dır. (b) Fıtil olarak kullanılan bir paslanmaz çelik fiber topluluğu (Sac) (Kaviany, 1995).

(a)



(b)



Şekil 2.3 (a) Poliüretan bir köpüğün elektron mikroskobuyla alınmış görüntüsü. Inch başına gözeneklerin sayısı 100 dür, $\phi = 0.98$ ve gözenek çapı $= 20\mu m$. (b) Kesik bir kireçtaşı parçası yüzeyinin elektron mikroskobu ile alınan görüntüsü (Kaviany, 1995).

Gözenekler yapılarına göre çeşitli şekillerde sınıflandırılabilirler. Gözenekler birbirleriyle ilişkilidirler veya ilişkili değildirler. Akışkan gözenekli bir madde içinden ancak bazı gözeneklerin birbirleriyle ilişkili olmaları halinde akabilir. Birbirleriyle ilişkili olan gözenek boşluğuna etkin boşluk, bütün gözenek boşluğuna da toplam boşluk denilir.

Gözenekli madde içindeki boşluklar büyüklüklerine göre de sınıflandırılabilir. Akışkanın boşluk içindeki davranışına dayanan üç ana sınıflandırma yapılabilir;

- (a) **Moleküler boşluk:** En küçük boşluklarda katı ve akışkan molekülleri arasındaki moleküler kuvvetler önemlidir. Bu çok küçük boşluklara moleküler boşluk denir.
- (b) **Mağaralar:** Çok büyük boşluklarda akışkan hareketi boşluk iç yüzeyinden kısmen etkilenir, bu en geniş boşluklara da mağaralar denilir.
- (c) **Gözenekler:** Moleküler boşluk ile mağaralar arası büyüklükteki boşluklar ise gözenek olarak bilinir.

Ek bir sınıflandırma da gözenekli maddelerin düzenli ve dağınık olarak ikiye ayrılmasıdır. Anlam olarak açıktır, uniform kürelerin düzgün sıralanışı düzenli, bir ekmek parçası ise dağınık bir gözenek yapısı gösterir.

2.2. GÖZENEKLİLİK

2.2.1. Gözenekliliğin Tanımı

Gözenekli bir maddenin gözenekliliği (porozitesi) boşlukların hacminin toplam hacme oranıdır. Böylece gözeneklilik;

$$\phi = \frac{V_g}{V_t} \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilir ve boyutsuz bir büyüklüktür. Burada; V_g gözenek hacmi, V_t ise toplam hacimdir.

Gözeneklerin bulunmadığı katı hacim kısmı ise maddenin tanelerini yada matrisini oluşturur ve

$$1 - \phi = \frac{V_k}{V_t} \quad (2.2)$$

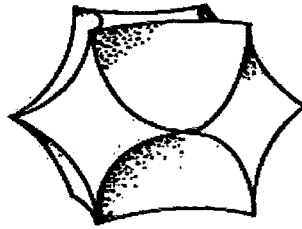
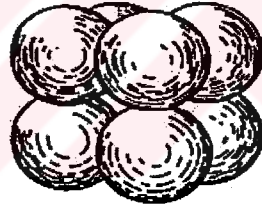
şeklinde yazılabilir. Burada V_k katı hacmidir. Gözeneklilik, madde içerisindeki boşluk kesrinin değil boşluk boyutunun bir ölçüsüdür (Dullien, 1992). Gözenekli ortamın tipine bağlı olarak, gözeneklilik 0 ile 1 arasında değişmektedir.

İki tip gözeneklilik tanımlanabilir;

- (a) **Mutlak gözeneklilik:** Gözenek ilişkileri düşünülmezsizin toplam hacme göre oransal boşluklar hacmidir.
- (b) **Etkin gözeneklilik:** Toplam hacme göre birbirleri ile ilişkili boşlukların hacminin meydana getirdiği orandır.

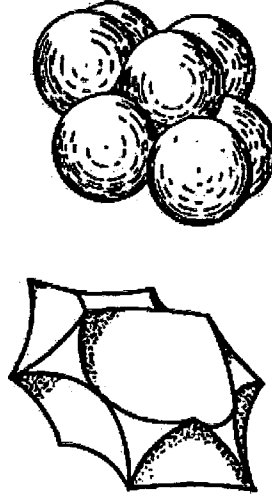
Lavlar ve manyetik kayalar gibi birçok doğal kayaların yüksek mutlak gözenekliliklerine karşın yok denecek kadar az etkin gözeneklilikleri vardır. Etkin gözeneklilik geçirgenliğin bir belirtisi olmakla birlikte onun ölçüsü değildir.

Uniform küre ve çubukların düzgün sıralanışları göz önüne alınarak gözenekli bir maddenin gözenekliliğinin yapıya olan bağlılığı incelenebilir. Şekil 2.4 'de uniform kürelerin kübik sıralanışı ve bu sıralanıştan doğan gözeneklilik görülmektedir.



Şekil 2.4 Kübik sıralanışa sahip uniform kürelerin gözenek uzayı ve düzeni (Greenkorn, 1983).

Şekil 2.5 'de ise rombohedral sıralanış düzeni ve bu düzen için birim hücrelerde bulunan gözeneklerin şekli görülmektedir



Şekil 2.5 Rombohedral sıralanışa sahip uniform kürelerin gözenek uzayı ve düzeni (Greenkorn, 1983).

İçi kürelerle dolu bir kapta düzgün bir sıralanış elde etmek olanaksız gibidir, ‘köprüleşme’ denen olay meydana gelmekte ve çok yüksek gözeneklilikler elde edilmektedir. Uniform tane büyüklüğü olan bölümler düzgüne yaklaşan bir sıralanış bölgesi göstermekte, bu küçük bölgeler ise köprüleşmenin olduğu düzgün olmayan sıralanış bölgeleriyle ayrılmaktadır. Köprüleşen kısımlarda gözeneklilik ‘en gevşek’ sıralanışa karşı gelen değerden daima daha büyük olmaktadır.

Teorik olarak, uniform kürelerin sıralanışlarının gözenekliliği kürelerin büyüklüğünden bağımsız ise de doğal maddelerde durum böyle olmamaktadır. Gerçekte, homojen tane büyüklüğündeki kumlarda, tane büyüklüğü küçüldükçe gözenekliliğin arttığı gözlenmektedir. Homojen tane büyüklüğüne sahip herhangi bir katılaşmamış doğal madde de taneler ne kadar küçük olursa gözenekliliğin de o kadar artacağı genel bir kural olarak söylenebilir (Collins, 1973).

Düzgün olmayan tane büyüklüğüne sahip katılaşmamış doğal maddelerde gözeneklilik tane büyüklüğünün dağılımına bağlıdır. Tane büyüklüğünün çeşitli oluşu, büyük tanelerin meydana getirdiği gözeneklerin küçük tanelerle doldurulmasına ve gözenekliliğin azalmasına sebep olur. Genellikle, iyi ayıklanmamış madde, daha ince taneli fakat iyi ayıklanmış maddeden daha düşük gözenekliliğe sahiptir.

2.2.2. Katılma ve Sıkımanın Gözenekliliğe Etkileri

Sıkıma, dışarıdan uygulanan basınçla hacimdeki azalmayı, katılma ise katı matrisin çimentolama maddesiyle elemanlarının birbirleri ile birleşmesini ifade eder. Killer ve siltler, bez kağıt gibi lifsel maddeleri içine alan bazı doğal gözenekli maddelerde sıkıma, gözeneklilikte önemli değişikliklere sebep olabilir. Silis kumu gibi oldukça sert maddeler ise yüksek sıkıma basınçlarında bile gözenekliliklerinde çok az değişiklik gösterirler.

Çok yüksek sıkıma basınçlarında bütün maddeler, gözeneklilik değişikliği gösterirler. Bunun sebebi, tanelerin ezilip şekil değiştirmeleri ve bazı hallerde yeniden kristalleşmeleridir. Kayaçların gözenekliliklerinin saptanmasında çimentolama önemli bir rol oynar. Gözenek boşluğu yıllar boyunca çimentolama maddesi ile doldukça gözeneklilikte azalma görülür. Bu arada seramikler, sinterlenmiş cam ve metaller gibi bazı yapay gözenekli maddeler de füzyon olayı ile katılmışlardır. Bütün doğal maddeler içerisinde, killer en büyük gözeneklilik değişimi gösterirler. Killer, çok küçük plakamsı tanelerden oluştuğu için, sıkıma uygundur. Böylece, yeryüzünden itibaren artan derinliklerde killerin gözenekliliği azalmaktadır. Çimentolama ve sıkıma doğal kayaçlarda gözenekliliği azaltmakla birlikte, yeraltı suyu akışı sonucu oluşan kimyasal reaksiyonlar ve fiziksel erozyon gözenekleri genişletici etki yapar (Collins, 1973).

2.2.3. Gözenekliliğin Ölçülmesi

Gözenekliliğin ölçülmesi birkaç teknik kullanılarak yapılır. Bunlardan bazıları mutlak gözenekliliği, bazıları da etkin gözenekliliği ölçerler. Gözenekliliğin tanımlanmasından hatırlanacağı gibi, gözenekli bir maddenin gözenekliliği katı hacim, toplam hacim veya gözenek hacminden herhangi ikisinin ölçülmesi ile saptanabilir.

Bazı gözeneklilik ölçüm teknikleri Tablo 2.1 'de görülmektedir. Bu tablodan da anlaşılacağı gibi gerçek gözeneklilik değerleri direk, fotoğraf ve gama ışını zayıflatma tekniklerinde elde edilmektedir. Yerel gözeneklilik ölçümü ise fotoğraf ve gama ışını zayıflatma tekniklerinde mümkün olmaktadır.

Tablo 2.1 Bazı gözeneklilik ölçüm teknikleri (Kaviany, 1995).

PRENSİP	ÖLÇÜLEN BÜYÜKLÜK	GÖZENEKLİLİK	YEREL GÖZENEKLİLİK ÖLÇÜM OLASILIĞI
Direk: Kaba hacim ile toplam hacmin karşılaştırılması	Hacim	Gerçek	Hayır
Fotoğraf (İki Boyutlu): Katı alanların toplamının boşluk alanları toplamıyla karşılaştırılması	Alan	Gerçek	Evet
Emme (Islatan Sıvı): Islatan akışkanı tamamen emmiş kütle ile kuru kütlelerin karşılaştırılması	Kütle ve Hacim	Efektif	Hayır
Cıva Enjeksiyonu (Islatmayan Sıvı): Matrise doğru ilerleyen cıvanın hacmi	Hacim	Efektif	Hayır
Gaz Enjeksiyonu: Genleşmeden önce ve sonraki matrisi bir arada tutan basınç.	Basınç ve Hacim	Efektif	Hayır
Zayıflatma(Gamma Işını) : Matristen geçen hüzmelin zayıflamasının, aynı kalınlıktaki bir katı maddeden geçerken ki zayıflaması ile karşılaştırılması.	Radyasyon Şiddeti	Gerçek	Evet

2.3. GEÇİRGENLİK

2.3.1. Geçirgenliğin Tanımı

Geçirgenlik, gözenekli maddenin akışkan geçirgenliğini karakterize eden bir parametredir. Bu parametrenin anlamlı bir şekilde tarif edilebileceği ilk defa 1856’ da Darcy tarafından gösterilmiştir.

Geçirgenliği ölçülebilir büyüklüklerle ifade eden denklem Darcy kanunu olarak bilinir. Bu kanun geçirgenlik, akışkan viskozitesi, gözenekli ortam boyutları ve uygulanan basınç cinsinden ifade edilebilir (Collins, 1973). L uzunluğunda, A kesit alanı olan gözenekli bir ortam için K geçirgenliği aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$K = \frac{Q\gamma}{A(\Delta P/L)} \quad (2.3)$$

burada; Q debi, γ akışkanın viskozitesi (poise) ve ΔP ’ de örnek uzunluğu boyunca uygulanan basınç farkıdır. Geçirgenlik için en fazla kullanılan birim *darcy*(d)’ dır. Bu birim şöyle tarif edilir: Geçirgenliği 1 darcy olan bir maddede 1 atmosferik basınç farkı, kenarları 1 cm olan küpte 1 centipoise ($\frac{1}{100}$ poise) viskoziteli bir sıvının saniyede 1 cm^3 debi ile akışına sebep olur (Dullien, 1992). Buradan,

$$1darcy = \frac{1(cm^3/s)}{1(cm^2)} \frac{1(cp)}{1(atm/cm)} \quad (2.4)$$

Çok sıkı maddeler için milidarcy, (md) = 0.001 d , kullanılır. 1 *darcy* $0.987\mu m^2$ ye eşittir.

2.3.2. Geçirgenliği Etkileyen Faktörler

(a) **Kil şişmesi:** Birçok katılaşmış kumtaşı bir miktar kil ve silt ihtiva eder. Bazı killer çok fazla tatlı su absorbe ettikleri ve şiştikleri için doğal kumtaşlarının geçirgenlikleri tatlı su emmiş olmaları halinde büyük miktarda azalmış olarak ölçülür. Sodyum klorür veya potasyum klorür gibi tuzların ilavesi killerde şişmeyi önler.

- (b) **Sıkışma:** Sıkışma, gözenekliliği azalttığı gibi, gözenekli maddelerde geçirgenliği de azaltır. Kağıt, izolasyon maddeleri ve tahta gibi lifsel maddeler sıkışma ile geçirgenliklerinden büyük değerler kaybederler. Sert taneli pudra ve kum gibi katılaşmamış maddelerde ise geçirgenlikte belirli bir azalmanın meydana gelmesi için oldukça büyük sıkışma basınçlarına gerek vardır. İyi katılaşmamış tortul kayalar geçirgenlik azalması için çok büyük sıkışma basınçlarını gerektirir. Ancak birçok maddelerde sıkışma basıncının belirli bir değerin üzerinde artırılması geçirgenlikte hissedilir bir değişme göstermez.
- (c) **Yapının mekanik değişimi:** Katılaşmamış gözenekli maddeler viskoz sıvıların akışıyla taneler üzerine etki eden mekanik kuvvetlerden dolayı yapısal değişim gösterirler. Bu gibi etkiler geçirgenliği değiştirebilir.
- (d) **Çözülme:** Kalsiyum karbonat suda biraz çözüldüğünden, gözenekli bir kalkerin gözeneklerinden geçen su, gözenek cidarını çözücü bir etki yapar ve geçirgenlik artar. Geçirgenlik ölçümlerinde doymuş hale getirilmiş kalsiyum karbonat çözeltisi kullanılarak bu gibi çözücü etkiler önlenabilir (Collins, 1973).

2.4. GÖZENEKLI ORTAMDA KILCAL BASINÇ – DOYMA İLİŞKİSİ

Gözenekli bir ortamda, en azından bir akışkanın ortam gözenekleri içerisine girmesi taşınım olarak tarif edilir. Gözenekli ortamda taşınım olayına, birçok mühendislik alanında rastlanmaktadır. Bu açıdan, inşaat mühendisliği yapı malzemelerinde nemin ilerleyişi ile; ziraat mühendisliği su ve kimyasal maddelerin topraktaki ilerleyişi ile; kimya mühendisliği reaktör kolonlarında ısı ve kütle taşınımı ve kurutma işlemi ile; petrol mühendisliği petrol rezervlerindeki yağ, su ve gaz akışı ile ilgilenmektedir.

Gözenekli ortamda taşınım ile ilgili diğer bazı örnekler Tablo 2.2 ' de verilmiştir. Gösterilen örneklerden de anlaşılacağı gibi gözenekli ortam boşluklarını dolduran akışkan, bir gaz (hava), bir gaz bir sıvı (sıvı ve hava) veya iki sıvı bir gaz (su,yağ ve hava) olabilir.

Tablo 2.2 Gözenekli ortamda taşınım ile ilgili çeşitli örnekler (**Kaviany, 1995**).

Kimyasal	Filtreleme. Kurutma. Zarların içerisinde kütle transferi. Yüzeyde adsorbsiyon/ desorbsiyon. Farmösetiklerin bioreaktörlerde üretimi.
Çevresel	Yeraltı sularının akışı. Yer altı sularında kontaminasyon gücü. Radyoaktif ve kararlı atıklar. Toprağa alçı enjeksiyonu. Yapı malzemelerinde hava, su buharı ve su akışı. Sulama.
Jeoloji	Su ve mineral göçü. Jeotermal enerji üretimi ve yönetimi. Buzul taşınışı.
Makine	Gaz soğutucu kullanan reaktörlerde soğutucuların yakıt paletleri arasındaki akışı. Gözenekli ısıtıcılar. Absorblanan güneş enerjisinin depolanması. Ormanlarda ve yapı malzemelerinde gözenekli malzemelerin yangın güvenliği.
Petrol	Depolarda petrol ve gaz akışı. Doğal gaz üretimi. Killi şistten petrol üretimi.

2.4.1. Akışkan Doyması

Gözenekli bir malzemede boşluklar bir akışkan ile doldurulursa tek fazlı akış, boşluklar sıvı ve gaz ile dolarsa da iki fazlı akış söz konusudur. Çalışmada sıkça kullanılacak olan faz ifadesi, bir sistemin kimyasal açıdan homojen olan bir kısmını açıklar ve bu kısım sistemin diğer kısımları ile arayüzey diye tanımlanan sınırlarla ayrılmıştır. Sadece gaz fazı olan sistemlerde tüm gaz bileşenleri bir aradadır, birbirlerinden sınırlarla ayrılmazlar. Ancak sıvılarda durum farklıdır. Birden fazla sıvı olan bir sistemde, sıvılar birbirine karışmadan fiziksel sınırlarla birbirinden ayrık durumda bulunabilirler. Bunlara birbirine karışmayan sıvılar (immiscible fluid) adı verilir.

Karışmayan iki akışkanın veya herhangi bir sıvı ve gazın bütün boşluk uzayında bir arada bulunmasında nemlilik yada ortamın tuttuğu akışkan miktarı önemli bir parametredir. Gözenekli bir ortamın göz önünde bulundurulan herhangi bir bölgesindeki w -akışkanının nemliliği N_w , göz önünde bulundurulan bölgedeki w -akışkanının hacmi V_w ve göz önünde bulundurulan bölgenin hacmi V ile gösterilirse;

$$N_w = \frac{V_w}{V_t} \quad (2.5)$$

şeklindedir. Eğer gözeneklere dolan akışkan su ise N_w nem miktarı olarak tanımlanır.

Gözenekli ortamın belirli bir akışkana göre doyması, ortamın boşluk hacminin, akışkanla dolu hacme göre oranı olarak tanımlanır. w -akışkanına göre doyma S_w ile gösterilirse;

$$S_w = \frac{V_w}{V_g} \quad (2.6)$$

şeklindedir.

Gözenekli ortamın boşluklarını birlikte dolduran iki farklı akışkan w ve nw ile gösterilirse, aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$S_{nw} + S_w = 1 \quad (2.7)$$

Doyma, akışkanın malzemenin gözenek yapısındaki dağılışı hakkında fikir vermez ve boyutsuz bir sayıdır. Eğer gözenekli bir malzeme belirli bir akışkan ile tamamen doymuş halde ise $S_w = 1$ ' dir.

Bu iki tanım birbirleri ile sistemin gözenekliliği açısından aşağıdaki gibi ilişkilendirilebilir (Bear ve Bachmat, 1990).

$$N_w = \phi \cdot S_w \quad (2.8)$$

Burada; ϕ gözenekli ortamın yerel gözenekliliğini göstermektedir.

2.4.2. Kılcallık

Farklı faz sınırlarında görülen arayüzey olayları, çok fazlı sistemlerin davranışları üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Kılcallık arayüzey olaylarında en önemli konulardan birisidir. Gözenekli ortamlar kılcallığın söz konusu olduğu sistemlerdir. Kılcal sistemlerde arayüzeyde denge hali, hidrostatik basınç ve yerçekimi etkisinin yanı sıra yüzey gerilimi ile ilgili kuvvetlere de bağlıdır.

2.4.2.1. Yüzey Gerilimi

Bir kan damlası yatay bir cam üzerinde bir tümsek formunu alır, bir civa damlası ise mükemmele yakın bir küre formunu alır ve pürüzsüz bir yüzey üzerinde çelik bir top gibi yuvarlanabilir. Ağaçların yapraklarında veya dallarında asılı duran çiğ veya yağmurdan oluşan su damlacıkları veya sızıntı yapan bir musluktan damlayan su küresel tanecikler olarak düşer. Havaya bırakılan bir sabun balonu küresel bir şekil alır. Bu tip olayları sıkı sık gözlemlemek mümkündür.

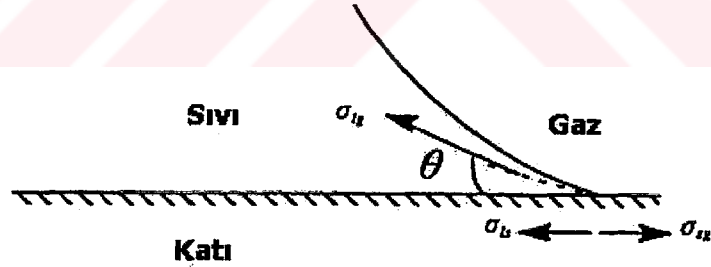
Bu veya başka tip gözlemlerlerde, sıvı damlacıkları içi dolu küçük küresel balonlar gibi davranır ve sıvının yüzeyi gerilmiş bir zarf şeklinde bulunur. Bu gerilmeye neden olan kuvvet, sıvı molekülleri arasındaki çekim kuvvetinden kaynaklanır ve yüzeye paraleldir. Bu kuvvetin birim uzunluk için büyüklüğüne 'yüzey gerilimi' denir. Genellikle σ ile gösterilen yüzey geriliminin birimi N/m ' dir. Yüzey gerilimi sıvılar için sıvı-sıvı veya sıvı-gaz ara yüzeylerinde söz konusu olabilir (Çengel ve Turner, 2001).

İki faz arasındaki yüzey gerilimini etkileyen faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- (a) **Sıcaklık:** Malzemeden malzemeye sıcaklığa bağlı olarak yüzey gerilimi değişim gösterebilir. Örneğin, 20^0 'de suyun yüzey gerilimi cıvaya oranla daha düşüktür. Cıva daha yüksek bir yüzey gerilimine sahip olması nedeniyle de katı yüzeyi ıslatmaksızın katı bir küre gibi davranır. Sıvıların yüzey gerilimi sıcaklık ile azalma gösterir.
- (b) **Basınç:** Genel olarak basıncın yüzey gerilimi üzerindeki etkisi çok küçüktür ve ihmal edilebilir.
- (c) **Kimyasal yapı bileşeni:** Bir maddenin yüzey gerilimi safsızlıklarla değişebilir. Surfactant adı verilen bazı kimyasal maddeler sıvıya eklenerek, sıvının yüzey gerilimi düşürülebilir. Örneğin, sabunlar ve deterjanlar suyun yüzey gerilimini azaltır ve daha etkili yıkama için fiberler arasındaki küçük boşluklar boyunca ilerlemesini sağlar.

2.4.2.2. Temas Açısı

Bir sıvı damlası düz bir katı yüzeyi üzerinde form aldığı anda veya iki düz katı arasında bir sıvı köprüsü form aldığı anda, genellikle bu sıvı damlası hem katı hemde çevresindeki gaz ile temas halinde bulunacaktır.



Şekil 2.6 Temas açısının gösterimi (Shyy, 1994).

Temas açısı yada ıslanma açısı olarak adlandırılan, θ , katı yüzey ile sıvı-gaz yüzeyi arasındaki veya sıvı-sıvı ara yüzeyindeki açıyı gösterir. Temas açısının mevcudiyeti şu anlama gelmektedir (Shyy, 1994);

- (a) Katı yüzeyine paralel olarak hareket eden sıvı-gaz yüzey gerilimi σ_{lg} ile bağdaşan bir kuvvet bileşeni olmalıdır ve büyüklüğü de $\sigma_{lg} \cos \theta$ 'dır.

(b) Eğer sıvı katı yüzeyi boyunca hareket etmeksizin statik dengede kalıyorsa, yukarı kuvvet bileşeni temas hattında hareket eden diğer kuvvetler tarafından dengelenmelidir. Bu diğer kuvvetler sıvı ile katı arasındaki yüzey gerilimi olan σ_{ls} ve katı ile gaz arasındaki yüzey gerilimi olan σ_{sg} 'dır.

Temas hattındaki kuvvet dengelenmesinden, temas açısı Young denklemi ile saptanabilir;

$$\sigma_{lg} \cos \theta = \sigma_{sg} - \sigma_{ls} \quad (2.9)$$

burada temas açısı ve yüzey gerilimi malzemenin bir özelliğidir.

2.4.2.3. Islatan ve Islatmayan Akışkan

Young eşitliği aşağıdaki gibi düzenlenebilir;

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{sg} - \sigma_{ls}}{\sigma_{lg}} \quad (2.10)$$

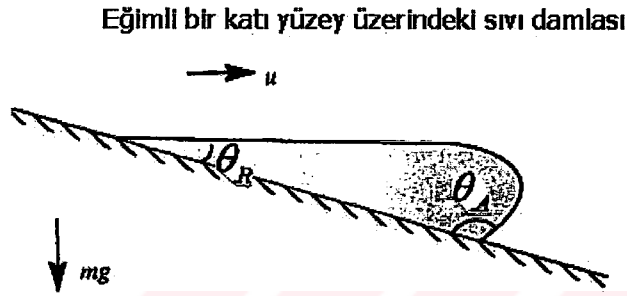
Sıvı-gaz ve sıvı-katı ara yüzeyleri $0^\circ - 180^\circ$ arasında değişen bir açı yaparlar. Temas açısı 0 ise sıvı katı yüzeyi üzerine yayılmış demektir.

Temas açısına bağlı olarak bir akışkanın ıslatan veya ıslatmayan akışkan olduğu anlaşılabilir. $\theta < 90^\circ$ ise sıvı katıyı ıslatıyor denir. Yani, bir akışkan, katı üzerinde kuvvetlice absorblanıyorsa ve yüzeye yayılma eğilimi gösteriyorsa ıslatan akışkan adını alır. Bunun yanı sıra, $\theta > 90^\circ$ ise sıvı katı yüzeyini ıslatmıyor demektir ve akışkan ıslatmayan akışkan adını alır. Yani, katı yüzeyi üzerinde topaklaşma veya uzaklaşma eğilimi gösterir. Ancak, bir akışkanın ıslatan veya ıslatmayan fazı oluşturması bir akışkana bağlı olarak da tanımlanabilir. Mesela, bir mineral yağ temiz bir cam veya silika yüzey üzerinde suya nazaran ıslatmayan fazı oluşturur, buna karşılık aynı yüzey üzerinde havaya nazaran ıslatan fazı oluşturur (Dullien, 1992).

2.4.2.4. Temas Açısı Histerisizleri

Yüzey gerilimi ölçümlerinde, sıvı yüzeyi homojen ve düz olarak kabul edilebilir. Ancak, görsel olarak pürüzsüz bir düzlüğe sahip katı yüzeyi sağlamak mümkün değildir. Ayrıca, katı yüzeyleri her zaman için hemen hemen kontamine

durumdadırlar ve bu durum yüzey gerilimini esas olarak etkileyebilir. Bu nedenle, pratikte, katı ile sıvı arasındaki yüzey gerilim kuvvetlerinin belirlenmesini sağlamak zordur. Deneysel olarak yapılan ölçümlerde temas açısının iki değerine yer verilmektedir. Bunlar Şekil 2.7’de görüldüğü gibi ilerleme (advancing) temas açısı θ_A ve geri çekilme (receding) temas açısı θ_R olarak adlandırılır. Şekil 2.7’ de iki açının aynı olmadığına dikkat edilmelidir. Bu farklılık ‘temas açısı histerisizleri’ olarak bilinmektedir.



Şekil 2.7 Eğimli bir katı yüzey üzerinde temas açılarının şematik gösterimi (Shyy, 1994).

Temas açısı histerisizlerinin oluşumunun kaynakları şunlardır;

- (a) Yüzey safsızlıkları
- (b) Yüzey pürüzlülüğü
- (c) Yüzey kontaminasyonu

2.4.3. Kılcal Basınç

Kılcal basınç, gözenekli bir ortamdaki çok fazlı akışın tanımlanması için kullanılan temel bir parametredir. Gözenekli ortamda çok fazlı akış tanımı, iki veya daha çok birbirine karışmayan akışkan içeren bir gözenekli ortamı ifade etmektedir. Gözenekli bir ortamın boşlukları içerisinde, iki veya daha çok karıştırılamayan akışkan bulunursa iki akışkan arasındaki ara yüzeydeki basınçta bir süreksizlik oluşur. Bu basınç farkı kılcal basınç olarak tarif edilmektedir.

$$P_c = P_n - P_w \quad (2.11)$$

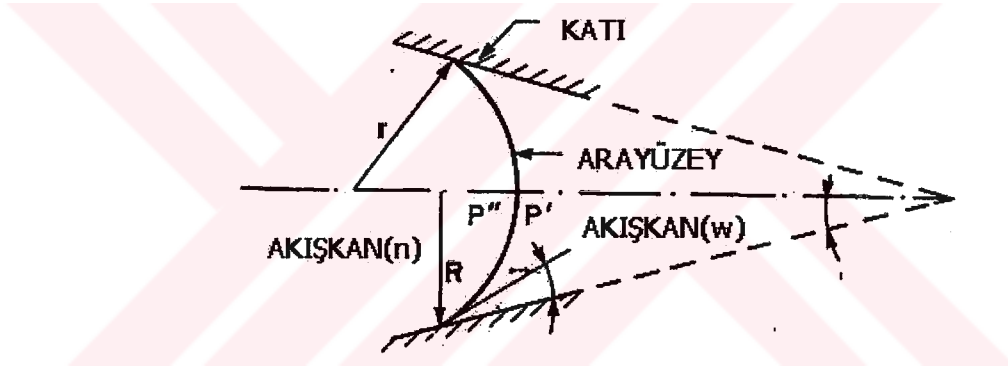
Burada; P_n ıslatmayan fazdaki basınç, P_w ıslatan fazdaki akışkan P_c de kılcal basıncı ifade etmektedir.

Ara yüzeydeki bir noktada basınç farklılığının büyüklüğü bu noktadaki yüzey gerilimi ve eğrilenmeye bağlıdır. Karıştırılamayan iki akışkan fazı arasındaki sınırdaki oluşan ara yüzey gerilimi , ara yüzey katmanının eğrileşmesine neden olur. Bu eğrileşme üzerindeki kılcal basıncın bağımlılığı Laplace eşitliği ile ifade edilmektedir;

$$P_c = \sigma_{wn} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) = \frac{2}{r^*} \sigma_{wn} \quad (2.12)$$

Burada; σ_{wn} ara yüzey gerilimi, r_1 ve r_2 yüzey eğrileşmesinin iki asal yarıçapı ve r^* de ortalama eğrileşme yarıçapıdır.

Şekil 2.8'den görüldüğü gibi, aslında kılcal basınç, ara yüzey katmanının iç bükeyi ile dış bükey yüzeyi basınçları arasındaki farktır (Dullien, 1992).



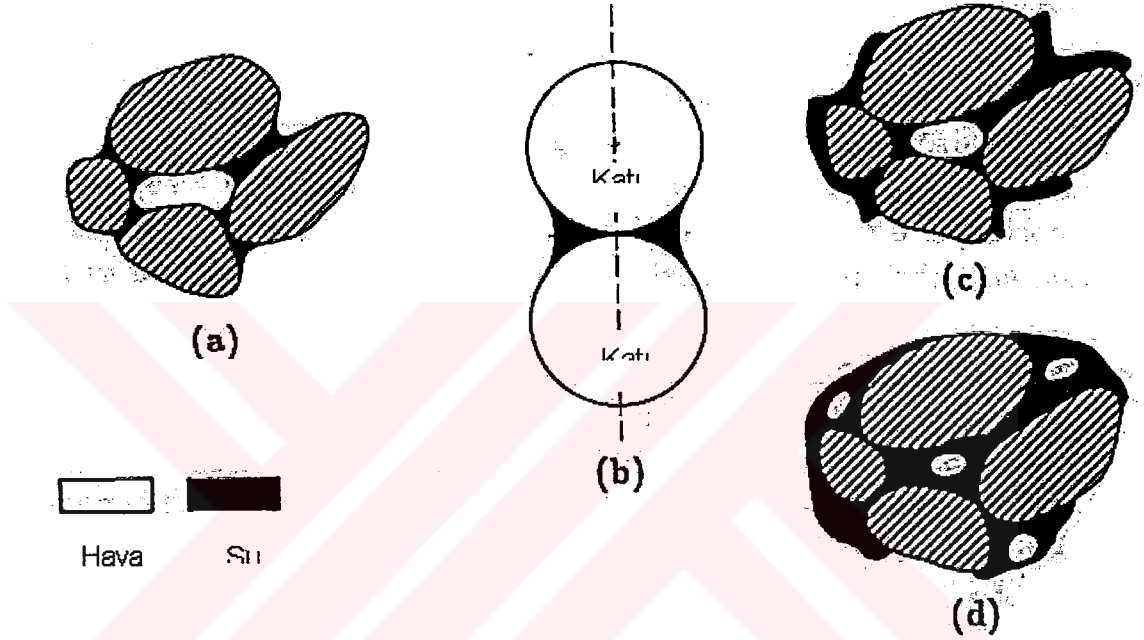
Şekil 2.8 Konik kılcallığın şeması (Dullien, 1992).

Ara yüzey katmanındaki eğrileşme aşağıdaki faktörlere bağlıdır;

- (a) Gözenek boyutu ve geometrisi
- (b) Akışkanlar arasındaki ara yüzey gerilimi
- (c) Ortamın ıslaklanma kabiliyeti
- (d) Olası fazların doymaları
- (e) Doymanın sağlanma şekli

Gözenekli ortamın gözenekleri içinde bir akışkanın diğeri tarafından ötelenmesine kılcal basıncın yüzey kuvvetleri ya yardımcı olur ya da karşı koyarlar. Dolayısıyla, gözenekli ortamda ıslatan akışkan mevcut iken ortamı, ıslatmayan akışkan ile belli bir değere doymuş hale getirmek için, ıslatmayan akışkanın basıncını ıslatan akışkaninkinden daha büyük bir değerde tutmak gerekir.

Yüzey gerilimi ve ıslaklanma kavramlarına bağlı olarak boşluk uzayındaki akışkanların dağılımlarının iç yapısını daha iyi anlamak için, gözenekli bir ortamdaki ıslatmayan akışkan olarak hava ve ıslatan akışkan olarak da suyun davranışlarını incelemek uygun olur. Şekil 2.9.a da görülen düşük doymalarda, su halka şeklinde taneciğin temas noktalarının çevresinde şekil alır. Bu halkalara **pendular halkalar** denir. Bu hava-su arayüzeyi eyer (semer) şekline sahiptir. Bu aşamada suyun katıya dokunduğu yerdeki temas açısının gözlemlenebilmesi de mümkündür.



Şekil 2.9 Muhtelif doymalarda hava ve suyun yer değiştirmesi; (a) Pendular doyma, (b) iki küre arasındaki pendular halka, (c) funicular su doyması, (d) insular hava doyması (Bear ve Bachmat, 1990).

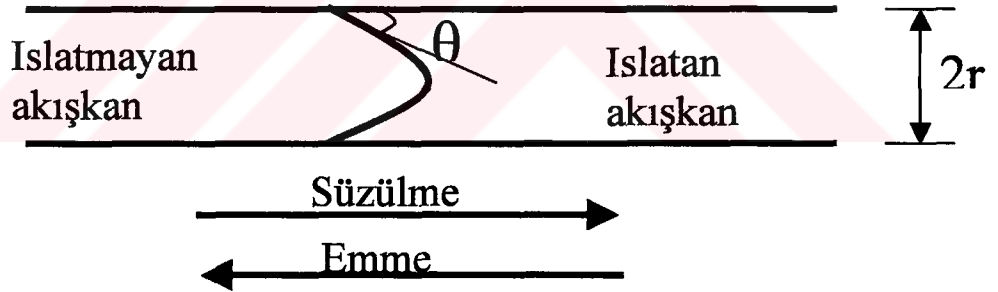
Şekil 2.9.b de iki küre arasındaki bir pendular halka görülmektedir. Bu idealize durum için, hava-su arayüzeyinin eğrilenmesinin yarıçapının halka hacmine bağdaştırılması mümkündür. Sırasıyla yukarıda gösterilmiş olan iki olay menisküsteki kılcal basınçla ilgilidir.

Su doyması artarken, pendular halkalar sürekli bir su fazı şeklini alıncaya kadar genişler. Bu olayın olduğu yerdeki doymaya **dengeli su doyması** adı verilir. Bu kritik doymanın üzerindeki doyma ise **funicular** olarak adlandırılır ve bu durumda suyun akışı mümkündür (Şekil 2.9.c). Bu aşamadaki su ve hava fazlarının her ikisinde sürekli bir yapı vardır. Suyun doyması daha da artarken, havanın sürekli olamayacağı bir durum gelişir ve daha geniş gözenekler birbirinden bağımsız taneciklere bölünürler (Şekil 2.9.d). Bu durumda havanın **insular doyma** halinde olduğu söylenir. Bu haldeki

hava boşluğunun hareket etmesi, suyun hava boşluğu üzerine uyguladığı basınca bağlıdır. Bu basınç hava boşluğunu kılcal boyutlara sıkıştırarak kadar olursa hava boşluğu harekete geçer. Bu olayın sonucunda, boşluk uzayında havanın bulunmayışıyla, tamamen doyma elde edilir.

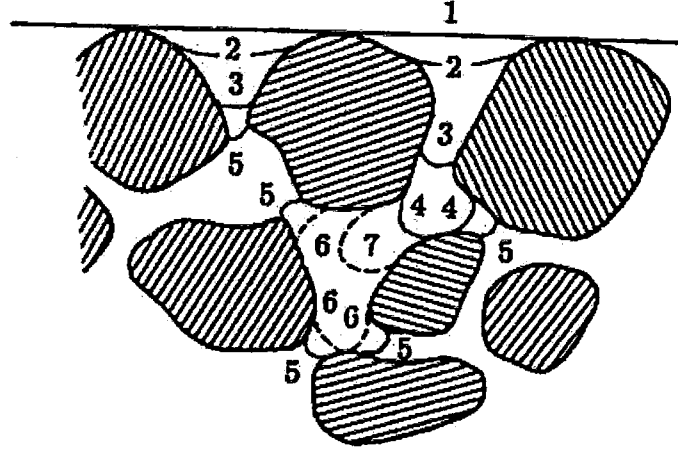
2.4.3.1. Kılcal Basınç Eğrileri

Kılcal basınç-doyma arasındaki ilişki kılcal basınç eğrileri kullanılarak incelenmektedir. Kılcal basınç eğrileri hem emme hem de süzülme işlemleri dikkate alınarak incelenir. Burada emme işlemi, ıslatan bir akışkan ile ıslatmayan bir akışkanın yer değiştirmesidir. Bu açıdan, doyma eş zamanlı emme olayıdır. Süzülme işlemi ise, ıslatmayan bir akışkanın ıslatan bir akışkanla yer değiştirmesidir. Yani, akışkanla doyan gözenekli ortamdan akışkanın süzülerek uzaklaşmasıdır. Şekil 2.10' da emme ve süzülme esnasında ıslatan ve ıslatmayan akışkanın yerdeğiştirmesi şematik olarak gösterilmiştir. Eğer sistemde tek akışkan varsa süzülme işlemi yer çekimi etkisiyle gerçekleşir. Birden fazla farklı akışkan söz konusu ise deney kolonuna dışarıdan basınç uygulanarak süzülme gerçekleştirilir (Bear ve Bachmat, 1990).



Şekil 2.10 Emme ve süzülme aşamalarında fazların yer değiştirmesi (Fenwick ve Blunt, 1998).

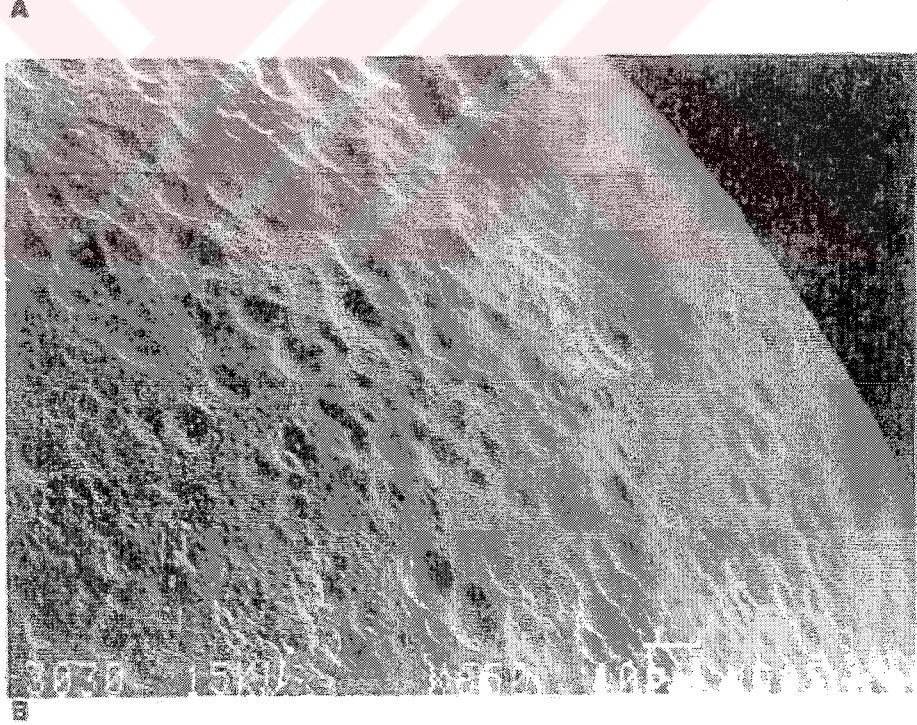
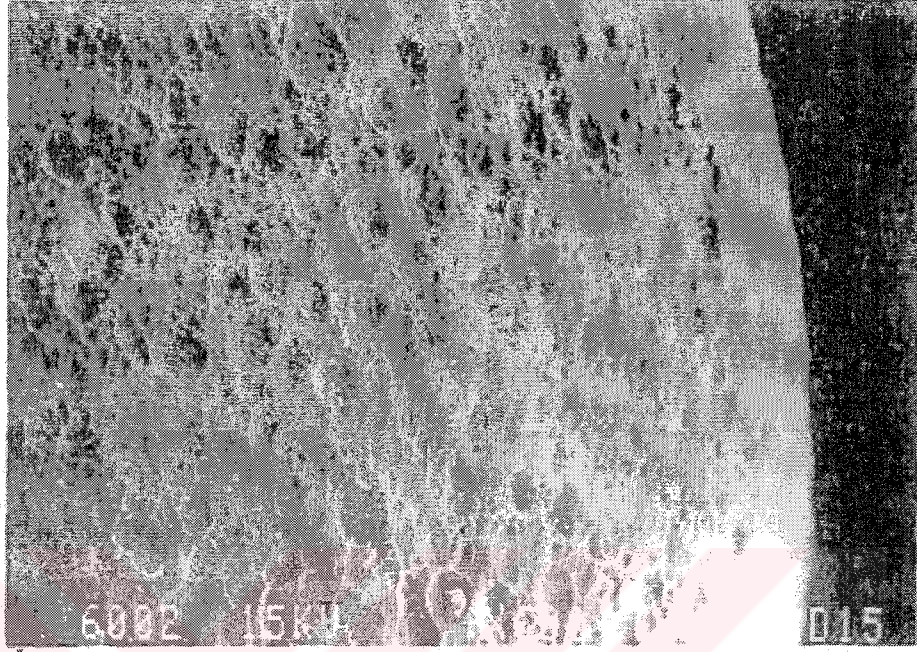
Islatan bir akışkanın, gözenekli bir ortamın boşluklarını tamamen doldurduğunu düşünelim. Daha sonra gözenekli ortamın alt kısmından akışkan süzülürken, üst kısımda ıslatmayan akışkan ilerlemeye başlar. Süzülme ve emme aşamaları Şekil 2.11 de görülmektedir. Islatan akışkan süzüldükçe su-hava ara yüzeyleri oluşur. Her noktadaki ara yüzey eğrilerinin yarıçapı yerel kılcal basınca bağlıdır. Denklem 2.12 deki Laplace eşitliğinden de görüleceği gibi, kılcal basınç arttıkça yarıçap küçülür.



Şekil 2.11 Emme ve süzülme işlemlerinin şematik gösterimi (Bear ve Bachmat, 1990).

Süzülme işlemi ilerledikçe, ara yüzey kanala yani gözenek içerisine doğru çekilir ve böylece daha büyük çapta eğrilikler oluşur (Şekil 2.11’ de ara kesit 4). Bu dengesiz bir hal anlamına gelir ve ıslatan akışkan dengeli bir arakesit yüzeyi oluşturuncaya kadar gözenek içerisine doğru geri çekilir. Burada arakesit yüzeyinin dengeli olması yüzeyin büyük çaplı ve yeterince dar bir eğri çizmesi anlamına gelmektedir. Eğer ortamdaki kanalların yani gözeneklerin hepsi büyük ve eşitse ıslatan akışkan birden ve neredeyse ‘tamamen’ süzülür, yani bu durumda ara yüzey eğrilerinde denge söz konusu değildir (Bear ve Bachmat, 1990). Islatan akışkanın tamamen süzülmesi mümkün olmaz, ince bir film şeklinde gözeneklerde bir miktar kalır. Bu durum Şekil 2.12’ de cam bilye yüzeyinin kullanılmadan önce ve süzülme sonundaki elektron mikroskobu ile alınan görüntüsünden de açıkça görülmektedir. Süzülme işleminde gözenek boşluklarında kalan belli miktardaki ıslatan akışkan miktarı, azaltılamaz ıslatan akışkan doyması olarak tanımlanır.

Genellikle, gözenekli ortamın gözenekleri birbirinden farklı boyut ve şekillerde olur. Bu durumda hepsinin aynı kılcal basınçta boşalması düşünülemez. Büyük gözenekler düşük kılcal basınçlarda, küçük gözenekler yüksek kılcal basınçlarda boşalırlar. Süzülme işlemi durdurulursa yani gözenekli ortam kolonunun altı kapatılırsa, bir süre sonra sistemde bir denge hali oluşur. Bu durumda artık akışkan hareketi durmaktadır ve hidrostatik basınç dağılımı söz konusu olmaktadır. Her noktadaki basınç değişimi noktadaki ara yüzey şeklinin yarıçapına bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 2.12 Cam bilye yüzeyinde süzülme sonucu oluşan ıslatan akışkan filminin elektron mikroskobu ile alınan görüntüsü. A) Kuru Hal, B) süzülme işleminden sonra alınan görüntü (Dullien, 1992).

Sonuç olarak süzülme işleminin her aşamasında, gözenekli ortamda tutulan ıslatan akışkan miktarı kılcal basınca bağlı olarak kalmaktadır. Ara yüzey alanı küçüldükçe kılcal basınç artmaktadır ve bu durum tutulan ıslatan akışkan miktarının azalması anlamına gelmektedir.

Şimdi süzülmenin tersine, gözeneklerin ıslatan akışkan ile dolduğunu düşünelim (Şekil 2.11' de 5-6-7 aşamaları). Gözeneklerdeki mevcut akışkan miktarı, akışkan doyması ile ölçülür. Kılcal basınç doymanın bir fonksiyonudur.

$$P_c(S_w) = P_n - P_w \quad (2.14)$$

Bu denklem ıslatmayan akışkandaki basınç fazlasının kılcal basınç olduğunu ve bunun da doymanın fonksiyonu olduğunu göstermektedir. Denklem 2.14, gözenekli ortamda kılcal basıncı tanımlama denklemidir.

Bir mentüsküs, yani ara yüzey eğrisi, üzerinde kılcal basınç ıslatan ve ıslatmayan akışkanlar arasındaki yüzey gerilimine bağlıdır. Yüzey gerilimi, sıcaklık ve kimyasal yapıya bağlı olduğu için kılcal basınç tüm bu faktörlere bağlı olacaktır.

$$P_c = P_c(S_w, T, c) \quad (2.15)$$

Burada; T sıcaklık ve c kimyasal yapı bileşenlerinin konsantrasyonlarını ifade etmektedir. Literatürde, genellikle kolaylık sağlaması amacı ile $P_c = P_c(S_w)$ varsayımı kullanılmaktadır.

Kılcal basınç ve süzülme aşamasındaki doyma arasındaki ilişki, literatürde bazı ampirik formüller kullanılarak incelenmiştir. Brooks ve Corey modeli birincil süzülme aşaması için efektif doymayı ifade etmektedir (Reitsma ve Kueper, 1994);

$$S_e = 1 \quad P_c \leq P_e \quad (2.16)$$

$$S_e = \left(\frac{P_e}{P_c} \right)^\lambda \quad P_c > P_e \quad (2.17)$$

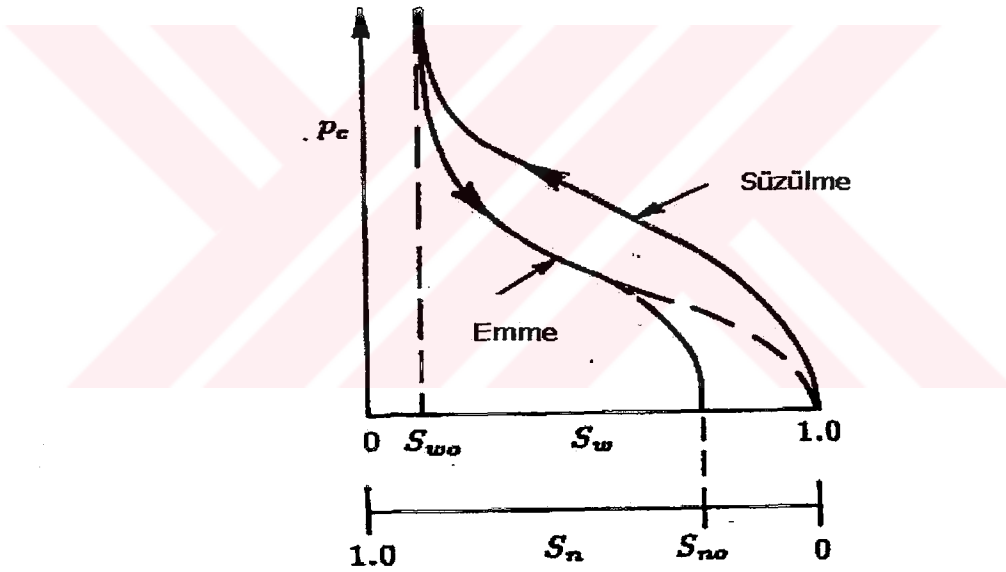
Burada; P_e giriş basıncı, S_e efektif doymayı ve λ gözenek boyut dağılımını gösteren bir parametreyi ifade etmektedir. Eşitlik (2.16) ve (2.17) da bulunan efektif doyma aşağıdaki gibi belirlenmektedir.

$$S_e = \frac{S_w - S_{wo}}{1 - S_{wo}} \quad (2.18)$$

Burada; S_{wo} azaltılamaz ıslatan akışkan doymasını, S_w da ıslatan akışkan doymasını ifade etmektedir. Bu eşitlikteki S_{wo} , azaltılamaz akışkan doyması kavramı, buharlaşmanın oluşmadığı varsayımına dayanmaktadır. Şayet, buharlaşmaya müsaade edilirse, S_w sıfıra doğru düşecektir (Bear ve Bachmat, 1990).

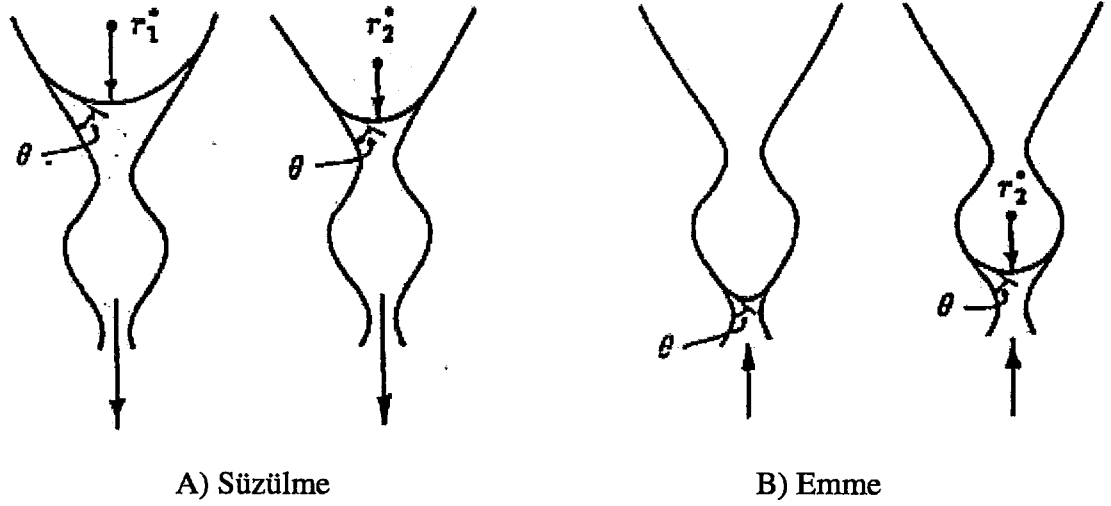
2.4.3.2. Kılcal Histerisiz

Emme ve süzülme işlemleri sırasında elde edilen kılcal basınç-doyma eğrileri birbirinden farklıdır. Bu olay histerisiz olarak bilinir. Aşağıdaki şekil 2.13 'de kılcal basınç eğrilerindeki histerisizler görülmektedir.



Şekil 2.13 Kılcal basınç eğrilerindeki histerisiz (Bear ve Bachmat, 1990).

Şekil 2.13'deki S_{wo} azaltılamaz ıslatan akışkan doymasını, S_n ıslatmayan akışkan doymasını ve S_{no} artık ıslatmayan akışkan doymasını göstermektedir. Artık ıslatmayan akışkan doyması, süzölmüş gözenekli ortam tekrar ıslatılırken ıslatmayan akışkanın gözeneklerde tutulmasını ifade etmektedir. Histerisiz oluşmasının bir sebebi, süzölme ve emme işlemlerinde aynı ara yüzey eğrisine sahip menüsküslerin farklı derinliklerde oluşmasıdır. Böylece aynı kılcal basınç için farklı doyma değerleri elde edilir. Şekil 2.14 'de emme ve süzölme süreçleri boyunca bu durum görülmektedir.



Şekil 2.14 Aynı ara yüzeyin farklı derinliklerde oluşması. A) Süzülme, B) emme (Bear ve Bachmat, 1990).

Bir diğer sebep ise, katı yüzeyin minerallerindeki farklılıklar, safsızlıklar ve yüzey pürüzlülüğü gibi sebeplerden dolayı temas açısının ilerleme ve geri çekilme konumları için farklı olmasıdır. Bunların dışında süzülen ve sonra ıslatan akışkan emdirilen gözenekli ortamda hava tuzaklarının kalması emme ve süzülme kılcal basınç eğrilerini farklı yapmaktadır.

2.4.3.3. Leverett J-Fonksiyonu

Doğal gözenekli maddelerin hemen hepsinin kılcal basınç-doyma eğrilerinin birçok ortak özelliklerinin olması, bütün bu eğrileri tanımlayan genel bir denklemin çıkarılması fikrini ortaya çıkarmıştır. Leverett 1941 yılında, kılcal basınç fonksiyonunu tanımlayan ampirik bir formül oluşturmuştur. Leverett J-fonksiyonu olarak adlandırılan doymanın boyutsuz fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Moseley ve Dhir, 1996);

$$J(S_w) = (P_c / \sigma) \sqrt{(K / \phi)} \quad (2.19)$$

Kılcal basınç hidrostatik basınca eşit sayılabilmektedir. Bu durumda;

$$P_c = \Delta \rho \cdot g \cdot h \quad (2.20)$$

eşit olmaktadır. Burada ; $\Delta \rho$ iki faz arasındaki yoğunluk farkını, g yerçekimi ivmesini ve h akışkanın serbest yüzeyinden itibaren mesafeyi vermektedir. Leverett J-fonksiyonu aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir;

$$J(S_w) = (\Delta\rho \cdot g \cdot h / \sigma) \sqrt{(K/\phi)} \quad (2.21)$$

Bu boyutsuz kılcal basınç fonksiyonu, bir çok hallerde kılcal basınç-doyma eğrilerindeki ayrılıkları ortadan kaldırmakta ve hepsini ortak bir eğriye indirgemektedir.

Yapılan çalışmalarda geçirgenlik, K , değeri hem teorik hemde deneysel olarak hesaplanabilmektedir. Teorik olarak hesaplamada Carman-Ergun (C-E) bağıntısı yaygın olarak kullanılmaktadır (Lago ve Araujo, 2001);

$$K = \frac{1}{180} \cdot \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \cdot d^2 \quad (2.22)$$

Burada; d gözenekli ortamı oluşturan bilyaların çapıdır. Denklem (2.21) ve (2.22) kullanılarak Leverett J-fonksiyonu aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir;

$$J(S_w) = \left(0.074 \cdot \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot h \cdot d}{\sigma} \right) \frac{\phi}{1-\phi} \quad (2.23)$$

2.4.4. Gözenekli Bir Ortamda Üç Fazlı Akış

Buraya kadarki teorik anlatımda, gözenekli bir ortamın boşluk uzayında, birbirlerine karışmayan iki akışkanın bulunduğu varsayılmaktadır. Doymamış bölgede bulunan bu iki akışkana örnek olarak, ıslatan akışkan için su ve ıslatmayan akışkan için hava kullanılmıştır. Bu iki akışkanın (mikroskopik seviyede) arasında keskin bir arayüzey bulunduğu ve korunduğu, ayrıca bu durumun, bir hava habbesinin ıslatan akışkan içerisinde çözünmesi ve bir kısmının da buharlaşması durumlarında da geçerli olduğu varsayılmaktadır.

Bazen, gözenekli bir ortamdaki boşluk uzayı birbirlerine karışmayan (immiscible) üç akışkan içerir. Bu duruma örnek olarak, bir depo veya boru vasıtasıyla yağın, başlangıçta su ve hava ile dolu olan doymamış bölgeye aktarılması verilebilir. Yağın belirli bileşenlerinin su içerisinde çözünebilmesi veya uçucu olmasına karşın, yağın ana kütlelerinin büyük bir kısmı hava ve suyun arayüzeyleri arasında keskin bir şekilde durumunu muhafaza etmektedir. Bu durumda yağ, orta ıslatan akışkan (intermediate wetting fluid) konumundadır. Hayli zehirli kirleticilerden TCE (Trikloroetilen), PCE (Perkloroetilen), çeşitli tarım ve böcek ilaçları veya aromatik bileşikler olan benzen,

toluen ve xylene gibi çeşitli organik çözücüler, doymamış bölgedeki orta ıslatan akışkana örnek olarak verilebilir. Bu orta ıslatan akışkanlar genellikle su içermeyen sıvı fazı (Non-aqueous phase liquid, NAPL) olarak adlandırılırlar. Bu akışkanlardan yağ, toluen, benzen gibi bazıları sudan az yoğun iken TCE, PCE gibi diğerleri sudan daha çok yoğundur. NAPL sudan az yoğun olduğunda, hafif su içermeyen sıvı fazı (Light non-aqueous phase liquid, LNAPL) olarak adlandırılır. Öte yandan, NAPL sudan daha fazla yoğun olduğunda, yoğun su içermeyen sıvı fazı (Dense non-aqueous phase liquid, DNAPL) olarak adlandırılır.

2.4.4.1. Üç Fazlı Akış İçin Kılcal Basınç-Doyma İlişkisi

Gözenekli bir ortamdaki bütün bir boşluk uzayını birlikte dolduran, su (aqueous), hava (gas) ve NAPL (non-aqueous) fazlarından oluşan üç akışkanlı bir sistemi göz önünde bulunduralım. NAPL' in katıya olan birleşme eğiliminin su ve hava arasında olduğu varsayımıyla, bu üç akışkan sırasıyla ıslatan (w), orta ıslatan (i) ve ıslatmayan (n) akışkan olarak davranırlar. Şekil 2.15' de doyma ve süzülme aşamalarında üç akışkanın gözeneklerdeki hareketleri gösterilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi doyma aşamasında su NAPL ile ve NAPL' de hava ile yer değiştirir. Süzülme aşamasında ise tam tersi gerçekleşir, NAPL suyun yerini, hava NAPL' in yerini işgal eder. Boşluk uzayını dolduran bu akışkanların doymaları aşağıdaki eşitlik ile yazılabilir (Bear ve Bachmat, 1990);

$$S_w + S_i + S_n = 1 \quad (2.24)$$

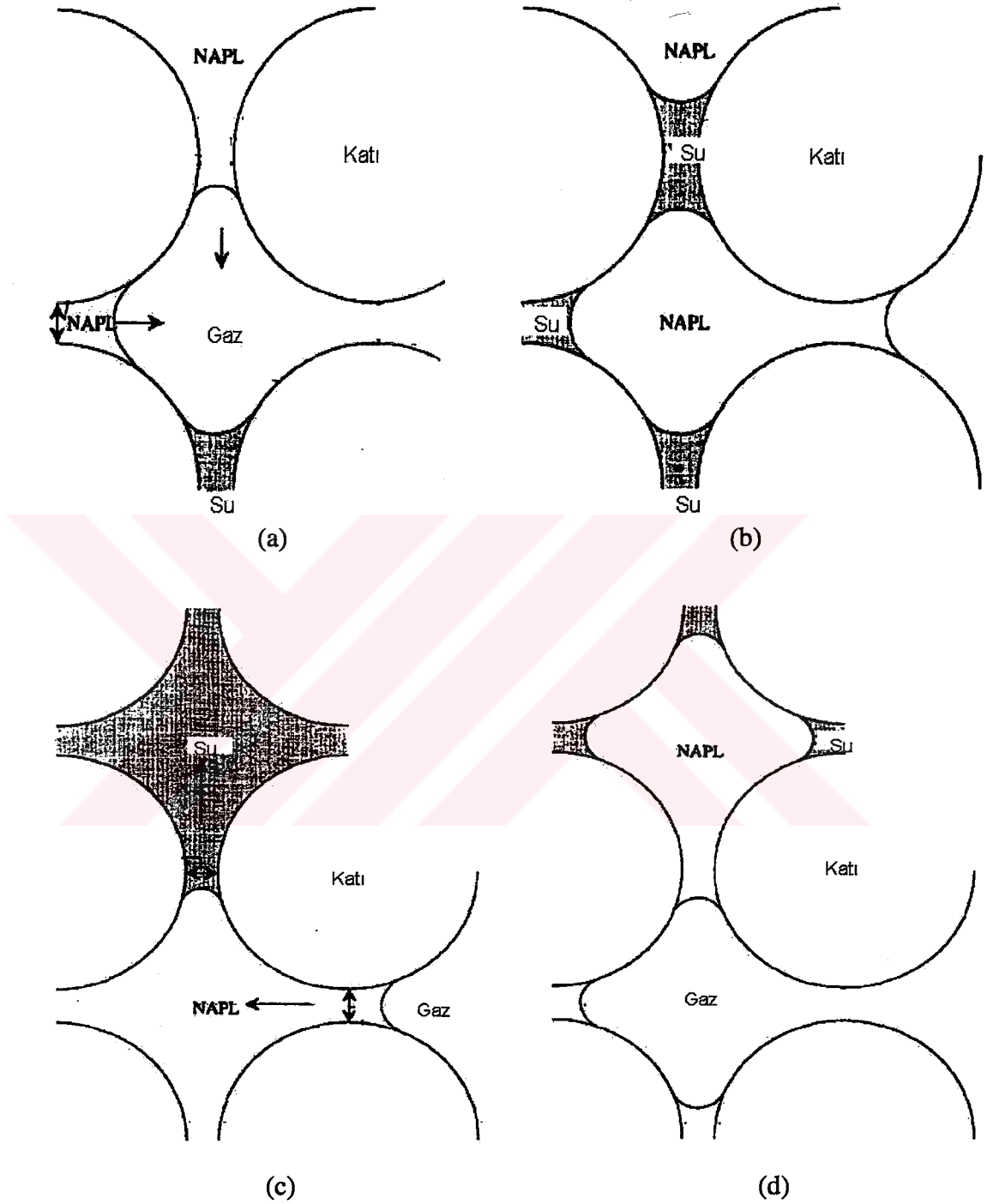
Doymaya bağlı olarak da üç tane kılcal basınç eğrisi aşağıdaki gibi belirlenebilir.

$$P_{c(iw)} = P_i - P_w = f_1(S_w, S_n) \quad (2.25)$$

$$P_{c(ni)} = P_n - P_i = f_2(S_w, S_n) \quad (2.26)$$

$$P_{c(nw)} = P_n - P_w = f_3(S_w, S_n) \quad (2.27)$$

Burada; $P_{c(iw)}$ orta ıslatan ve ıslatan akışkan kılcal basıncını, $P_{c(ni)}$ ıslatmayan ve orta ıslatan akışkan basıncını, $P_{c(nw)}$ ıslatan ve ıslatmayan akışkan kılcal basıncını, P_w ıslatan akışkan basıncı, P_i orta ıslatan akışkan basıncını ve P_n ıslatmayan akışkan basıncını ifade etmektedir.



Şekil 2.15 Üç fazlı akış için doymadaki yer değişimin şeması; (a) Gaza temas eden NAPL' i suyun işgal etmesi, (b) buna müteakip NAPL' in gazın yerini alması. Üç fazlı akış için süzülmedeki yer değişimin şeması; (c) NAPL' in hava ve su dolu gözenekler veya boğazlara temas edişi, (d) suyun yerini alan NAPL'i gazın işgal etmesi (Fenwick ve Blunt, 1998).

Eşitlik (2.12) deki Laplace formülünün buradaki herhangi akışkan çifti için kullanılması mümkündür. Örneğin;

$$P_{c(iw)} = \sigma_{iw} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) = \frac{2}{r^*} \sigma_{iw} \quad (2.28)$$

şeklinde yazılabilir. Burada; σ_{iw} orta ıslatan akışkan ile ıslatan akışkan arasındaki arayüzey gerilimini ifade etmektedir (Bear ve Bachmat, 1990).



BÖLÜM 3

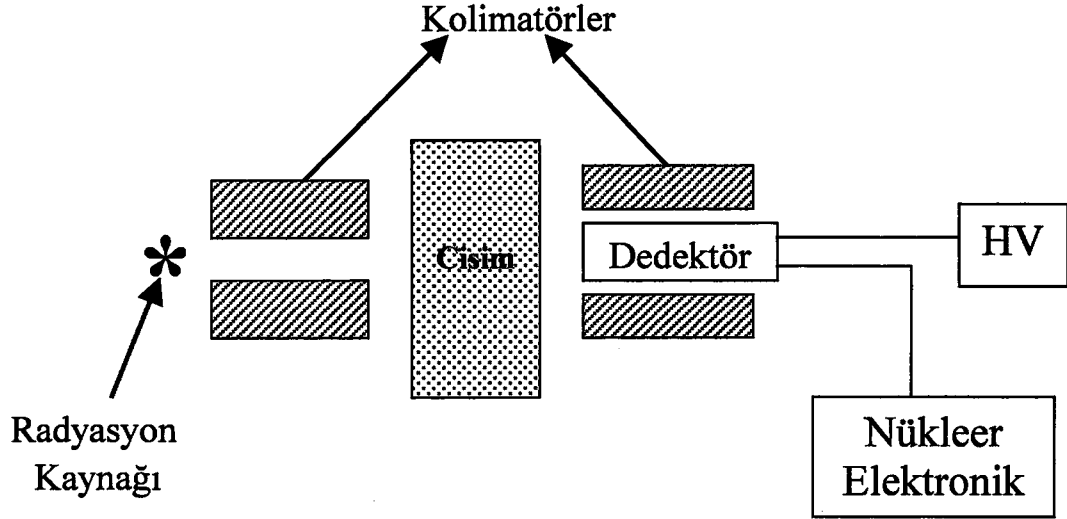
GÖZENEKLİ ORTAM ÖZELLİKLERİNİN GAMA IŞINI ZAYIFLATMA TEKNİĞİ İLE İNCELENMESİ

3.1. GAMA IŞINI ZAYIFLATMA TEKNİĞİ

Gama ışını zayıflatma tekniği, kalınlık, yoğunluk ve seviye tayini gibi malzeme özelliklerinin saptandığı en yaygın kullanımı olan nükleer tekniklerden birisidir. Günümüzde bu teknikten toprak bilimi ve akışkanlar mekaniği de yararlanmaktadır. Bir toprak kolonu boyunca nem miktarının tayini veya gözenekli bir ortamda akışkanın ilerlemesi ile ilgili çalışmalarda gama ışını zayıflatma tekniği tercih edilmektedir. Bu teknikte gama fotonunun geçtiği malzeme kesiti boyunca zayıflatılması malzemenin bazı fiziksel özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla gama fotonunun zayıflatılması bilgilerinin ölçülmesi ile incelenen malzemenin özelliklerinin saptanması mümkün olmaktadır. Şekil 3.1’ de genel hatları ile çalışma şeması görülen gama ışını zayıflatma tekniğinde, saçılmalara engel olan böylece incelenen malzeme kesiti için sağlıklı bilgi üreten dar demet geometrisinin kullanımı tercih edilmektedir.

Dar demet geometrisi, hem dedektörün hem de radyasyon kaynağının zırh malzemesi olabilecek bir malzemeden yapılmış olan aynı çapa sahip kolimatörler içerisine alınması ile gerçekleştirilmiştir. Gama ışını zayıflatma tekniğinde çoğunlukla gama verimi yüksek olan $NaI(Tl)$ sintilasyon dedektörü ve bu dedektöre uygun nükleer elektronik bileşenleri kullanılır. ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{192}Ir ve ^{241}Am bu teknikte en çok tercih edilen gama kaynaklarıdır.

Gama ışını zayıflatma tekniğinde, malzeme içerisinde fotonun zayıflatılmasının sadece ölçülen malzeme özelliğine bağlı olması için malzemenin diğer özelliklerinin biliniyor olması gerekir.

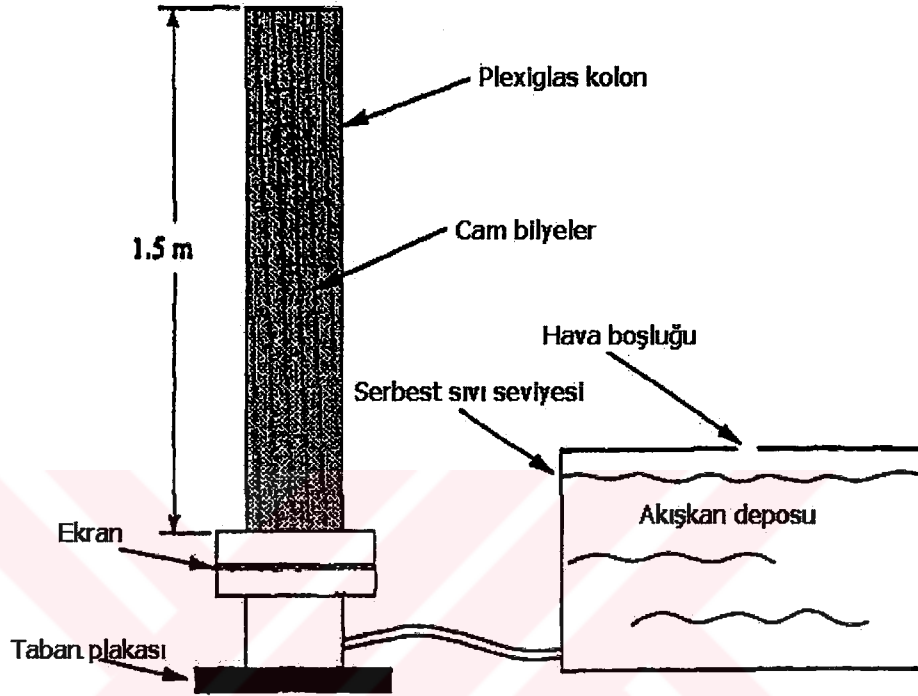


Şekil 3.1 Gama ışını zayıflatma tekniğinin blok şeması

3.2. YAPILAN ÇALIŞMALARA TOPLU BAKIŞ

Gözenekli ortamlarda kılcal basınç-doyma ilişkisinin ya da diğer bazı gözenekli ortam özelliklerinin deneysel olarak incelenmesinde, gama ışını zayıflatma tekniği oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bölümde literatürde yer alan ve tez çalışmasında temel alınan bazı yayınlara değinilecektir.

Gama zayıflatma tekniğinin gözenekli ortam için uygulamalarına en iyi örneklerden birisi **Moseley ve Dhir (1996)** tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ıslatan faz doyması ve kılcal basınç arasında fonksiyonel bir ilişki geliştirilmiştir. Burada, düzgün ayırık silika parçacıklarının oluşturduğu gözenekli bir ortamdaki ıslatan faz sıvısının emme ve süzülmesi göz önüne alınmıştır. Doyma ölçümlmeleri bir gama ışını zayıflatma sistemi ile yapılmıştır. Deneyler, hem önceden doymuş gözenekli ortamdan bir sıvının süzülmesi hem de kuru gözenekli ortamda bir sıvının emilmesi halinde kılcal basınç-doyma profillerini oluşturmak üzere Şekil 3.2’ de görülen düzeneğe gerçekleştirilmiştir. Her iki halde de iki farklı gözenekli ortam için üç sıvı kullanılmıştır. İki boyuttaki cam bilyeler homojen ve uniform gözenekli ortam sağlamak için kullanılmıştır. Deneyde su, etanol, refrigerant-113 sıvıları kullanılmıştır. Cam bilyeler ve sıvılara ait özellikler Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’ de görülmektedir.



Şekil 3.2 Emme ve süzülme deneyleri için kullanılan düzenek (Moseley ve Dhir, 1996).

Tablo 3.1 Moseley ve Dhir' in çalışmalarında kullanılan cam bilyelerin özellikleri

	Paketleme 1	Paketleme 2
Bileşim	SiO_2	SiO_2
Yapı	Düzgün, ayrık	Düzgün, ayrık
Mesh (μm)	100-140	320-400
Ortalama tanecik çapı (μm)	120	360
Geçirgenlik ($\times 10^{-12} m^2$)	9.24 ± 0.22	112 ± 3.2
Yaklaşık gözeneklilik	0.41 ± 0.02	0.41 ± 0.02

Tablo 3.2 Kullanılan akışkanların 300° K sıcaklık ve 1 atm basınçtaki özellikleri

Sıvılar	Su	Etanol	R-113
Moleküler formül	H ₂ O	C ₂ H ₆	FCCL ₂ CClF ₂
Arayüzey gerilimi (N/m)	0.0717	0.022	0.017
Sıvı yoğunluğu (kg/m ³)	997	799	1569
Buhar yoğunluğu (kg/m ³)	0.596	1.08	3.09

Deney düzeneğinde, iç çapı 9.53 cm olan düşey bir plexiglas kolon içerisine cam bilyeler konmaktadır. Düzeneğe bağlanan poliüretan bir rezervuar test sıvısı ile doldurulmuştur ve kolonun alt kısmına bağlanmıştır. Gamma ışını zayıflatma sistemi, ¹³⁷Cs gama kaynağı, NaI(Tl) detektörü ve kolimatör gurubundan oluşmaktadır. Kolimatörün çapı 3.18 mm dir. Kaynak-detektör ikilisi kolon boyunca hareket ederek yerel doyma bilgisini toplamaktadır. Deneylerde önce bilyelerle dolu kolon rezervuardan sağlanan test sıvıları ile yavaşça doldurulmuştur. Bu süre yaklaşık on dört gündür. Tamamen doyma sağlandıktan sonra kolon boyunca ölçümler tekrarlanmıştır. Doyma deneyleri, ortalama çapları 120 ve 360 µm olan cam bilyeler için üç ayrı sıvı kullanılarak tekrarlanmıştır. Süzülme deneylerinde ise yukarıda bahsedilen, doymaya ulaşmış her bir kombinasyondan test sıvısının süzülmesi izlenmiştir. Bu da yaklaşık 10-12 günlük bir süreyi kapsamaktadır.

Çalışmada, deneysel olarak elde edilen bilgiler yardımıyla Leverett'in kılcal basınç fonksiyonu kullanılmıştır. Her üç test sıvısı ve iki farklı boyuttaki cam bilyeler için süzülme ve emme işlemlerine ait Leverett'in fonksiyonunun doymaya bağlı değişimi grafiklerle incelenmiştir. Bu çalışmada, ayrıca temas açısı ölçümü ve geçirgenlik ölçümü de deneysel olarak yapılmıştır. Sonuçta, bu çalışmada kullanılan üç test sıvısı için Leverett fonksiyonunun geçerliliği, ancak bu fonksiyonun geliştirilmesi ile mümkün olmuştur. Geliştirilen Leverett fonksiyonunda üç sıvının temas açıları arasındaki fark göz önüne alınmaktadır.

Moseley ve Dhir (1992) bu deney düzeneğinden diğer bir çalışmalarında da bahsetmektedir. Bu çalışmada özellikle, gama ışını zayıflatma sistemi kullanılarak gözeneklilik ve doyma bilgilerinin nasıl oluşturulduğu anlatılmaktadır. Bilindiği üzere gama ışınları kolon boyunca geçerken, radyasyon şiddeti eksponansiyel olarak azalmaktadır.

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (3.1)$$

Burada; I_0 kolona gelen radyasyon şiddeti, I kolonu geçen radyasyon şiddeti, x malzeme kalınlığı, μ ise malzemenin lineer zayıflatma katsayısını temsil etmektedir. Sıvının zayıflatma katsayısının bilinmesi durumunda, doyma ve gözeneklilik Denklem (3.1) kullanılarak aşağıda gösterildiği şekilde belirlenebilmektedir.

$$I_{ds} = I_0 \exp(-\mu_s x_s) \quad (3.2)$$

Burada; I_{ds} kuru kum ile dolu kolonu geçen radyasyon şiddeti, μ_s kumun lineer zayıflatma katsayısı ve x_s de kum kalınlığıdır. Burada kum diye bahsedilen yine cam bilye topluluğudur.

$$I_{ss} = I_0 \exp(-\mu_s x_s - \mu_l x_{l.sat}) \quad (3.3)$$

Burada; I_{ss} tamamen doymuş kum ile dolu kolonu geçen radyasyon şiddetini, μ_l sıvının lineer zayıflatma katsayısını, $x_{l.sat}$ ise % 100 doymuş ortamda temsili sıvı kalınlığını göstermektedir. Denklem (3.2) ve (3.3)'ün birleştirilmesi ile $x_{l.sat}$ aşağıdaki gibi elde edilir;

$$x_{l.sat} = [\ln(I_{ds}/I_{ss})]/\mu_l \quad (3.4)$$

Buna göre %100 doymuş kum kolonundaki gözeneklilik aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\phi = \frac{x_{l.sat}}{x_t} \quad (3.5)$$

Burada; x_t kolonun iç çapı veya toplam kalınlıktır ve aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$x_t = x_{l.sat} + x_s \quad (3.6)$$

$$S_{lh} = \frac{x_l}{x_{l.sat}} \quad (3.7)$$

Burada; S_{lh} kolon eksenı boyunca herhangi bir pozisyondaki doymadır.

$$x_l = [\ln(I_{ds}/I_h)]/\mu_l \quad (3.8)$$

eşitliği ile de sıvı kalınlığı hesaplanır. Burada; I_h h yüksekliğinde kolonu geçen hüzmeye şiddetidir.

Bu çalışmada, bundan önce tanıtılan çalışma ile aynı sonuçlar verilmektedir. Sadece, az öncede bahsedildiği gibi gama ışını zayıflatma ölçüm sonuçlarının gözeneklilik ve doyma bilgilerine dönüştürülmesi ayrıntılı olarak verilmiştir.

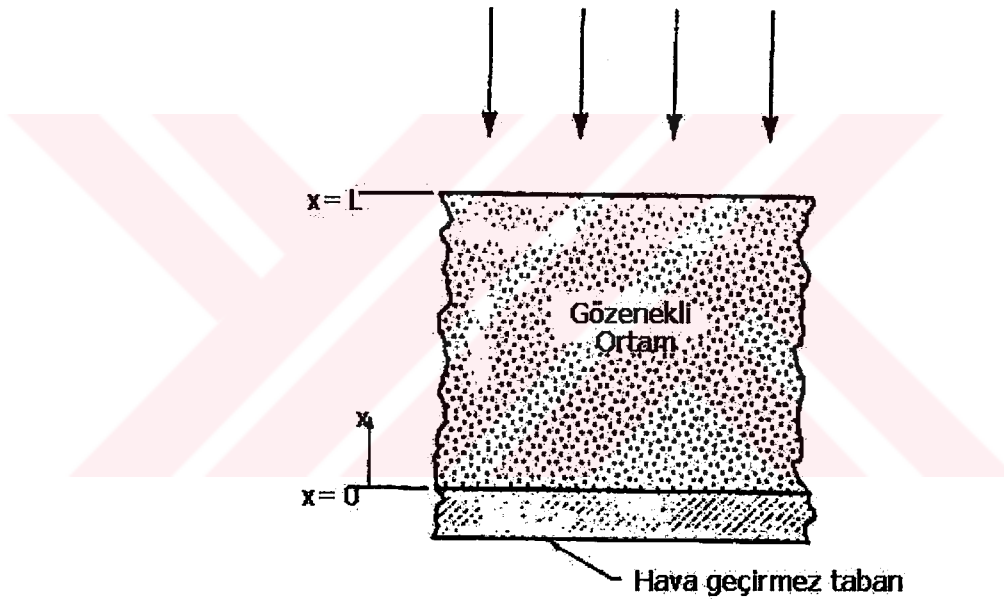
Organik kimyasal maddelerin yer altı sularına bulaşması ihtimali yüksektir. Bu nedenle, bilim adamları toprak katmanlarından organik sıvı geçişini incelemektedirler. Bu tip bir çalışma **Walser ve diğerleri (1999)** tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, organik sıvı kirleticilerinin katmanlı toprakta tutulması, iki enerjili gama radyasyonu kullanılarak incelenmiştir. Test malzemesi olarak iki farklı elekten geçirilmiş kum kullanılmıştır. Kumlardan biri kaba ve sıkıştırılmış diğeri ise ince ve doğal kum şeklindedir. Sıvı olarak yoğunluğu 789 kg/m^3 olan soltrol 220 isimli uçucu olmayan bir yağ kullanılmıştır. 8.25 cm çapında ve 160 cm yüksekliğinde plexiglas bir kolon 52 cm yüksekliğinde kaba kumla üzerine 50 cm yüksekliğinde ince kumla doldurulmuştur. Kolon boyunca yağ doyması, iki enerjili bir gama kaynağı kullanılan gama ışını zayıflatma sistemi ile bulunmuştur. Kumun yağa doyması yaklaşık on dört günde gerçekleşmiştir. Yağın kumdan süzülmesi ise bir günden yirmi güne kadar gama ışını zayıflatma ölçümleri yapılarak izlenmiştir. Soltrolün süzülüşü hayli yavaş olmuştur. Yapılan deneyler sonucu iki toprağın arakesit yüzeyinin üzerindeki ince katmanda yağın yüksek oranda tutulduğu gözlenmiştir. Çalışmanın sonucunda, sıvı organik atıkların doymalarının beklenenden yüksek olduğu ve katmanlaşmış toprakta hayli yüksek oranda tutuldukları kanısına varılmıştır.

İki enerjili gama kaynağı kullanılan bir diğer çalışma **Hofstee ve diğerleri (1997)** tarafından gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde, 8 cm iç çapında 1 m uzunluğunda, 2 cam kolon içerisine 90 cm yüksekliğinde kum yerleştirilmiştir.

Kolonlardan birisinde kuru kum muhafaza edilmekte iken, diğeri destile su ile doyurulmuş ve sonra suyun kolondan süzülmesi sağlanmıştır. Daha sonra her iki kolona da 20°C deki yoğunluğu 1631 kg/m^3 olan PCE (perchloroethylene) verilmiştir. Böylece bir kolondaki gözenekli ortamda su-hava-PCE akışı, diğesinde

hava-PCE akışı söz konusu olmaktadır. PCE, kolonlar üzerinde bir gölcük oluşana kadar (doyma) kolonların dibinden emdirilmiştir. Tüm bu işlemler esnasında ve kolonlardan PCE süzülmesi esnasında, kolon boyunca 8 noktadan gama ışıını zayıflatma ölçümleri yapılmıştır. Böylece kolon boyunca gözeneklilik, yoğunluk ve sıvı içeriği gibi bilgilere ulaşılmıştır.

Kılcal basınç-doyma ilişkisinin incelendiği bir diğer çalışma **Plumb (1991)** tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, karmaşık gözenekli ortam olarak kabul edilen besinlerin kurutulmasına yönelik bir incelemedir. Kullanılan test malzemesi ortalama çapları $65 \mu m$, $120 \mu m$ ve $450 \mu m$ olan cam bilyelerdir. Test malzemesinin şematik gösterimi aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.3 Kuruma deneyinin ve koordinat sisteminin şeması

Burada görülen paket 5x5 cm büyüklüğünde ve yaklaşık 2.5 cm ile 5 cm arasında bir derinliğe sahiptir. Emme ve süzülme işlemleri esnasında yerel doyma değerleri, gama ışıını zayıflatma tekniği ile paket boyunca 4 noktadan alınan ölçümlerle bulunmuştur. Emme ve süzülme için farklı iki ampirik formül kullanılmıştır.

$$S_e = \frac{S_w - S_{w0}}{1 - S_{w0}} \quad ; \text{ Süzülme için} \quad (3.9)$$

$$S_e = S \quad ; \text{ Emme için} \quad (3.10)$$

Bu çalışmada kurutma amaç olduğu için, test paketine üst kısmından $65^{\circ}C$ ' lik hava akımı uygulanıyor. Test malzemesinin kuruması demek, doymanın sıfır değerini alması demektir. Çalışmada her çaptaki bilyeler için kılcal basınç-doyma eğrileri ve yine gama ışını zayıflatma yöntemi ile saptanan derinliğe bağlı gözeneklilik eğrileri bulunmaktadır. Sonuçta, cam bilyelerin çapları büyüdükçe, doymanın süzülme esnasında daha hızlı bir şekilde düştüğü, yani çap büyüdükçe kurumanın daha hızlı olduğu anlaşılmıştır.



BÖLÜM 4

DENEY KOŞULLARININ TANITIMI

4.1. DENEY DÜZENEGİ

Bu çalışmada gözenekli ortam özellikleri incelenirken dar demet geometrili bir gama zayıflatma düzeneği kurulmuştur. Bu tez çalışması İ.T.Ü. Lisansüstü Tezleri Destekleme Programı tarafından yüksek lisans tez projesi olarak desteklenmiştir ve bu proje programı çerçevesinde deney düzeneği kurulmuştur. Deney düzeneğine ait blok şema Şekil 4.1. de görülmektedir. Deney düzeneğinin bir fotoğrafı da Şekil 4.2. de verilmiştir.

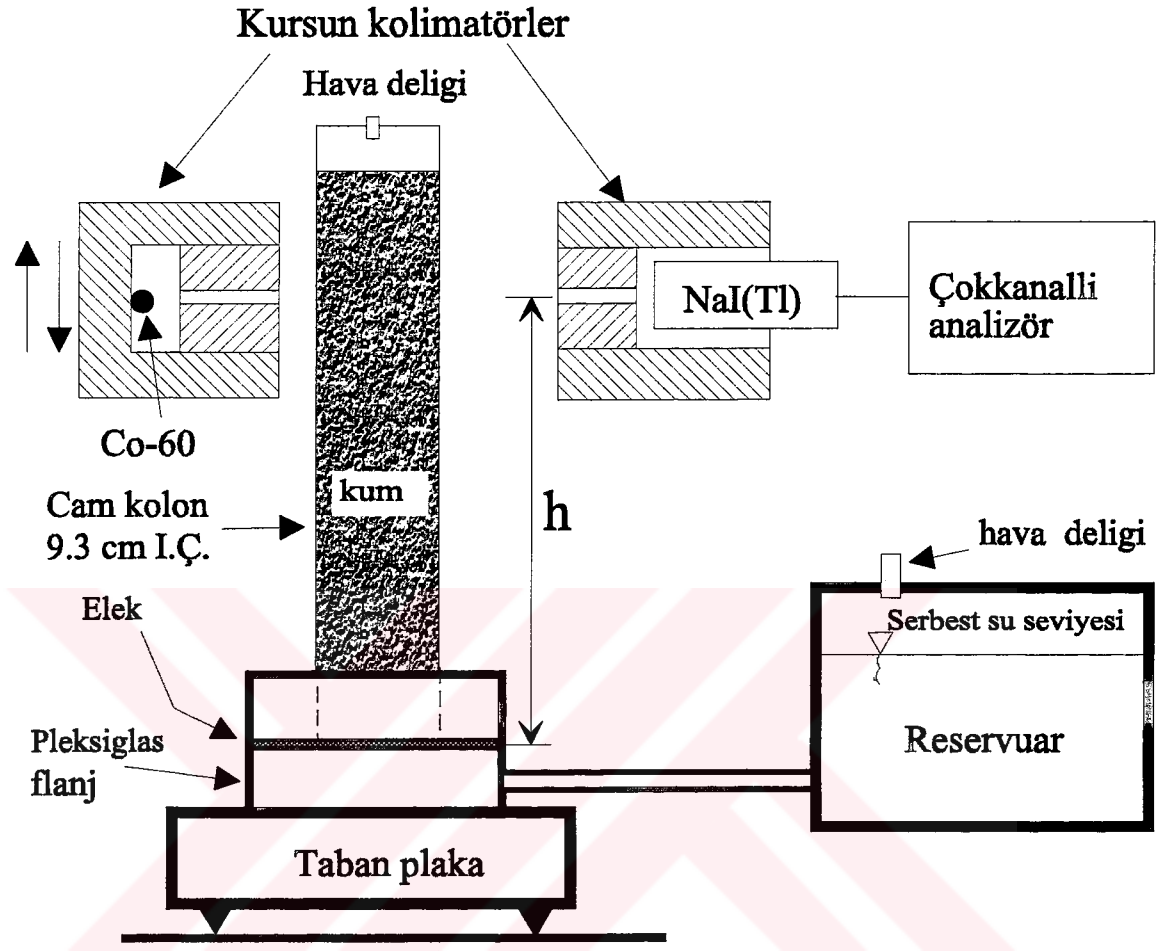
Deney düzeneğini oluşturan elemanlar;

(a) **Radyasyon kaynağı;** Bu çalışmada radyoaktif kaynak olarak ^{60}Co kullanılmıştır. Kullanılan ^{60}Co kaynağı Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezinden temin edilmiştir. Bu merkezden alınan referans değerler kullanılarak ve deneylerin gerçekleştirildiği süre dikkate alınarak ^{60}Co kaynağının aktivitesi hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılan bu ^{60}Co kaynağına ait değerler Tablo 1. de verilmektedir. Bu çalışmada ^{60}Co kaynağının 1332 keV enerjili piki kullanılmıştır.

Tablo 4.1 Deneylerde kullanılan ^{60}Co kaynağının radyoaktif özellikleri

Kaynak	Yarı Ömür (Yıl)	Enerji (keV)	Aktivite (Bq)
^{60}Co	5.27	1173 (% 100) 1332 (% 100)	$1.74 \cdot 10^6$

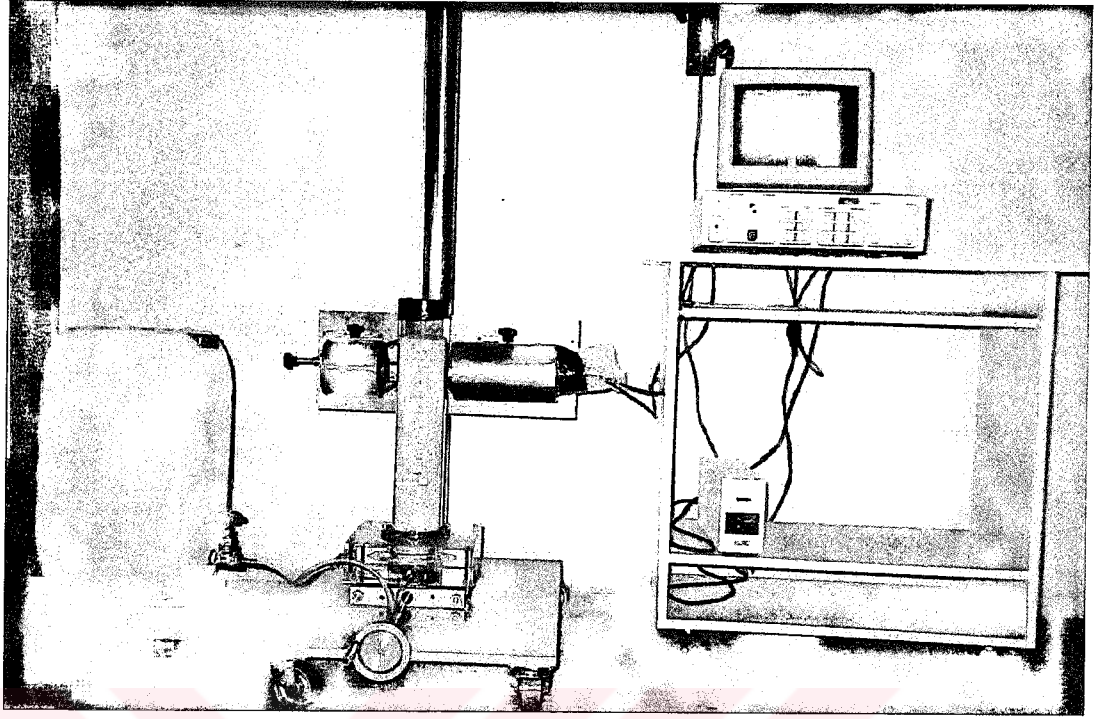
(b) **Sayım sistemi;** Çalışmada gama verimi yüksek olan NaI (Tl) sintilasyon dedektörü ve 256 kanallı bir MODEL 800A çok kanallı analizörü kullanılmıştır. Çok kanallı analizörde standart ^{60}Co kaynağı ile kanal başına 10 keV enerji gelmek üzere kalibrasyon gerçekleştirilmiştir.



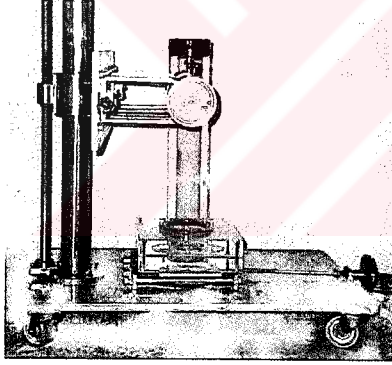
Şekil 4.1 Deney düzeneğinin blok şeması

(c) **Kurşun kolimatörler;** Dar demet geometrisinin oluşturulduğu kurşun kolimatörler grubuna ait teknik resimler ve boyutları Şekil 4.3 de görülmektedir. Kaynak ve dedektör ikilisinin içinde bulunduğu kolimatörlerin çapı 5 mm dir.

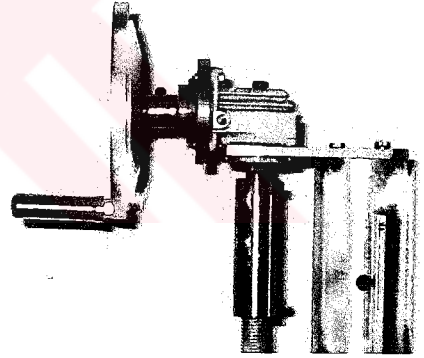
(d) **Gözenekli ortam kolon sistemi;** Yürütülen deneylerde 9.3 cm lik iç çapa sahip 50 cm uzunluğunda düşey bir cam kolon kullanılmıştır. İnce bir paslanmaz çelik elek test bölümünün alt kısmında yer alan iki plexiglas flanşın arasında yer almaktadır. Bu elek sayesinde test sıvılarının kolona serbestçe girişi sağlanmaktadır. Serbest bir sıvı seviyesi sağlayan polietilen bir rezervuar, Şekil 4.1 de gösterildiği gibi plexiglas flanşın alt kısmına birleştirilmiştir.



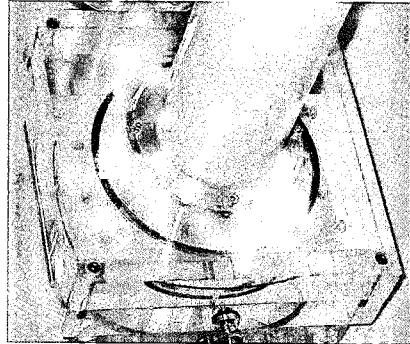
(a)



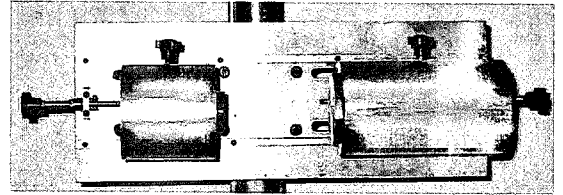
(b)



(c)

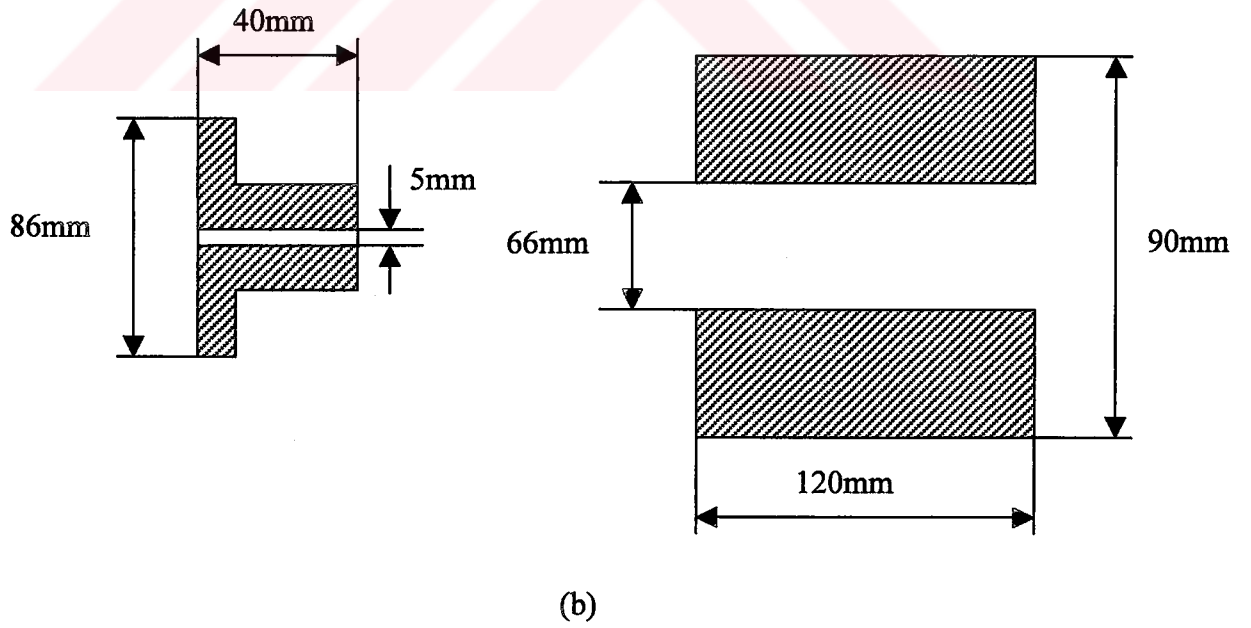
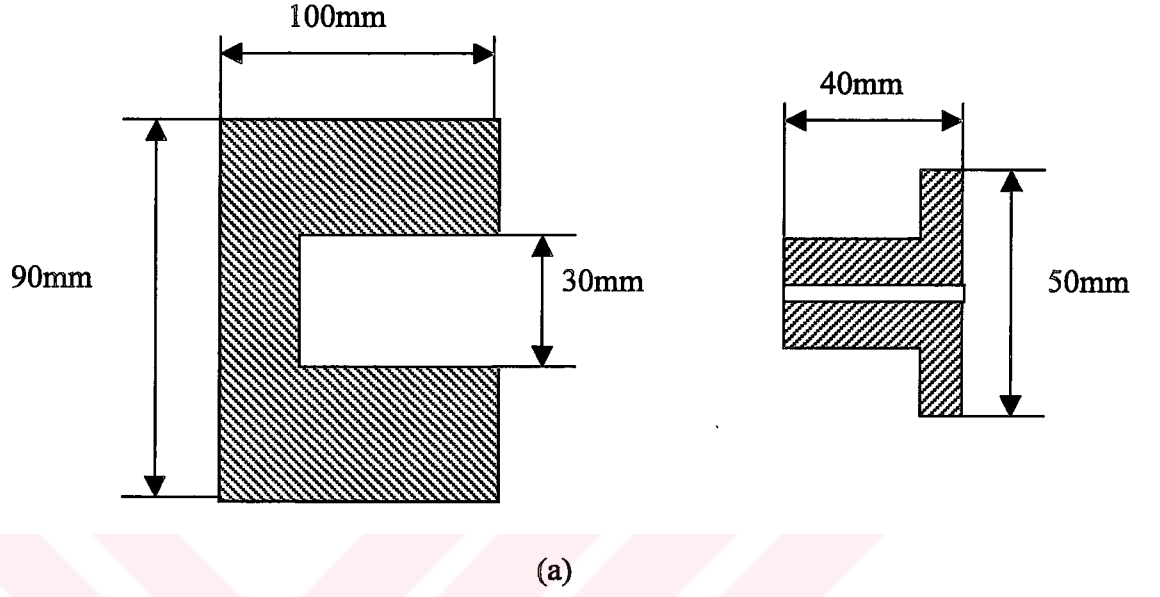


(d)



(e)

Şekil 4.2 Deney düzeneğini oluşturan elemanların fotoğrafları. (a) Genel görünüm, (b) gözenekli ortam kolon sisteminin yandan görünümü, (c) milimetrik düşey hareket adımını sağlayan mekanizma, (d) gözenekli ortam kolon sistemi, (e) kaynak ve dedektör ikilisinin içinde bulunduğu kolimatörleri taşıyan düşey plaka.



Şekil 4.3 Dar demet geometrisini oluşturan kolimatörler; (a) Kaynak tarafındaki, (b) dedektör tarafındaki kolimatörler.

(e) **Düşey hareket kolonu;** Taban plakasının ucunda yer alan bu kolon düşey yönde aşağı ve yukarı milimetrik olarak hareket adımına sahiptir. Kaynak-dedektör ikilisinin içinde bulunduğu kolimatörler düşey bir plaka üzerine monte edilmiştir ve bu plaka da düşey hareket kolonuna birleştirilmiştir. Böyle bir düzenleme, plakanın düşey yönde hareket ettirilmesi vasıtasıyla cam kolon boyunca istenilen yüksekliklerden sayım alınabilmesini sağlamaktadır.

4.2. DENEYLERDE KULLANILAN MALZEMELER

(a) **Gözenekli ortam;** Yapılan bütün deneylerde, gözenekli ortam olarak C778 Ottawa kumu (20-30 Mesh) (US Silica Company, Ottawa, Illinois) kullanılmıştır. Bu kuma ait özellikler Tablo 4.2 de verilmektedir. Bu kumun standart özelliklere sahip oluşu nedeniyle, endüstriyel alanlarda, özellikle boya üretim sanayinde kullanımı yaygındır. Ayrıca, literatürde yer alan gözenekli ortam ile ilgili bu tip çalışmaların büyük bir bölümünde temiz, ayırık tane yapısı ve tanelerin birbirine yapışma eğilimi göstermemesi nedeni ile Ottawa kumu kullanımı tercih edilmektedir.

Tablo 4.2 Deneylerde kullanılan gözenekli ortamın özellikleri

Kimyasal yapı	SiO_2
Yapı	Temiz, ayırık
Mesh (μm)	600-800
Ortalama tane çapı (μm)	720
Hacimsel yoğunluk (g/cm^3)	1.74
Parçacık yoğunluğu (g/cm^3)	2.82

(b) **Kullanılan sıvılar;** Deneylerde üç çeşit sıvı kullanılmıştır. Standart sıvı olarak damıtılmış su ile çalışılmıştır. Damıtılmış suyun dışında endüstriyel bir sıvı olan etanol ve yine hem endüstriyel bir sıvı ve hemde LNAPL olan toluen kullanılmıştır. Kullanılan sıvılara ait özellikler Tablo 4.3 de verilmektedir.

Tablo 4.3 Deneylerde kullanılan sıvıların 20⁰ C ve 1 atm basınçtaki özellikleri

Sıvılar	Su	Toluen (LNAPL)	Etanol
Moleküler formül	H_2O	$C_6H_5CH_3$	C_2H_5OH
Sıvı yoğunluğu (g/cm^3)	0.997	0.867	0.799
Arayüzey gerilimi (N/m)	0.073	0.0285	0.023

Etanol; Düşük alkoller sınıfına giren etanol endüstriyel olarak hayli önem taşımaktadır. Bu nedenle, etanolün kullanım alanları da geniş bir yelpazeye sahiptir. Kozmetik sanayisinde, tıpta insülin yapımında, gıda sanayinde ve 1985 yılından bu yana da benzin içerisinde bir çözücü bileşen olarak kullanımı, etanolün kullanım alanlarına dair bazı örneklerdir.

Toluen; Aromatik bileşikler sınıfına giren toluen, endüstriyel olarak kullanımı yaygın olan önemli bir kimyasal hammaddedir ve bunun yanı sıra organik bir kirleticidir. Bütün plastik, sentetik kauçuk ve sentetik fiber imalatının önemli bir kısmında aromatikler ve toluenin kullanımı yaygındır (Weissertel ve Arpe, 1997).

Bu çalışmada, suyun yanı sıra, endüstriyel kullanımı hayli yaygın olan etanol ve toluen gibi iki sıvı ile gözenekli bir ortamın doyma özellikleri, gama ışını zayıflatma tekniği kullanılarak incelenmiştir. Endüstriyel sıvıların çevreye ve özellikle gözenekli bir ortam olan toprağa yayılması olasılığı yüksektir. Literatürdeki diğer çalışmalarda olduğu gibi, bu tez çalışmasında da gözenekli ortam olarak kullanılan kum, toprağı temsil etmektedir. Etanol ve toluen sudan daha düşük yoğunluğa sahip sıvılardır, ayrıca toluen bir LNAPL dir. Yani toluen, gözenekli ortamda su ile karışmadan bir arada bulunabilir. Bir organik kirletici olan toluenin seçimi ile, su ve hava bulunan bir gözenekli ortamda bir LNAPL' in doyma halini, yani üç fazlı akışı incelemek mümkün olmuştur.

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, deneysel çalışmalar üç amaca yönelik olarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak gözenekli bir ortamın farklı sıvılar için gösterdiği doyma özellikleri incelenmiştir. Daha sonra, gözenekli bir ortamda çok fazlı akışın tanımlanması için önemli bir parametre olan kılcal basınç ile doyma arasındaki ilişkinin incelendiği deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu iki aşamada da gözenekli ortam içerisinde hava-su, hava-etanol ve hava-LNAPL şeklinde iki akışkan fazı birarada bulunmaktadır. Deneysel çalışmaların son aşamasında ise gözenekli ortam içerisinde birbirlerine karışmayan üç akışkanın bulunduğu üç fazlı akış incelenmiştir. Bu çalışmada gözenekli bir ortam içerisinde üç faz, hava-su-LNAPL akışkanlarıyla oluşturulmuştur.

5.1. GÖZENEKLİ ORTAMDA AKIŞKAN DOYMASININ İNCELENMESİ

Bu aşamadaki deneysel çalışmalarda akışkan doymasının yanısıra, gözenekli ortam ve kullanılan sıvılara ait 1332 keV enerjideki lineer zayıflatma katsayıları ve gözenekli ortamın gözenekliliği de gama zayıflatma bilgileri kullanılarak saptanmıştır. Lineer zayıflatma katsayıları bulunurken cam kolona konan su, etanol ve LNAPL belirli bir yükseklikten alınan sayımlar kullanılmıştır. Çalışmadaki tüm deneylerde her bir ölçüm noktası için 5 sayım alınıp ortalama değerleri kullanılmıştır. Sıvılar için tek noktadan gerçekleştirilen sayımlar alınırken, kuru kum için kolon boyunca belirlenen birkaç noktadan sayım alınmıştır. Her nokta için bulunan lineer zayıflatma katsayılarının ortalaması kumun lineer zayıflatma katsayısı olarak saptanmıştır. Deneylerde kullanılan, kimyasal yapısı bilinen tüm malzemeler için **Hubbell (1982)** tabloları kullanılarak, aşağıdaki denklem yardımı ile teorik lineer zayıflatma katsayıları da hesaplanmıştır.

$$\mu = \sum_i w_i \mu_i \quad (5.1)$$

Burada, w_i i .elementin ağırlıksal yüzdesi ve μ_i i . elementin lineer zayıflatma katsayısıdır. Tablo 5.1’ de kullanılan malzemeler için teorik ve deneysel lineer zayıflatma katsayıları verilmiştir. Deneysel ve teorik değerler arasındaki sayım istatistiği belirsizliğinden kaynaklanan sapma miktarı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (Baldha ve diğerleri, 1997).

$$\delta = \frac{\mu_{teo} - \mu_{den}}{\mu_{teo}} \quad (5.2)$$

Bu denklemde, δ sayım istatistiğindeki belirsizlikten kaynaklanan teorik değerden sapma miktarını, μ_{teo} teorik olarak hesaplanan ve μ_{den} deneysel olarak saptanan lineer zayıflatma katsayılarını ifade etmektedir. Tablo 5.1’ den görüleceği gibi 1332 keV enerjide malzemelere ait teorik ve deneysel zayıflatma katsayıları arasında oldukça düşük bir sapma miktarı mevcuttur.

Tablo 5.1 1332 kev enerjide malzemelere ait lineer zayıflatma katsayıları

Malzeme	$\mu(1/cm)$		
	Teorik, μ_{teo}	Deneysel, μ_{den}	Sapma miktarı, δ (%)
Kum	0.095	0.091	0.091 ± 4.10^{-3}
Su	0.0618	0.0659	0.0659 ± 4.10^{-3}
Etanol	0.0503	0.0536	$0.0536 \pm 3.3.10^{-3}$
LNAPL	0.0539	0.0531	0.0531 ± 8.10^{-4}

Gözenekli ortamda akışkan doymasının bulunması için yapılan deneyler üç aşamada gerçekleştirilmiştir: Birincil emme (primary imbibition), yerçekimine bağlı süzülme (gravity drainage) ve ikincil emme (secondary imbibition). Bu deneylerde, 50 cm uzunluğundaki cam kolon elekten itibaren 29 cm’ ye kadar kum ile doldurulmuştur. Gama ışını zayıflatma ölçümleri 29 cm’ lik kolondaki kum boyunca 9 noktadan alınmıştır. Polietilen rezervuardaki serbest sıvı seviyesi, elekten itibaren 15 cm’ ye ayarlanmıştır. Kılcal basıncın sıfır olduğu bu seviye sıfır referans noktası olarak alınmıştır ve bu seviyenin altında ölçüm alınmamıştır.

5.1.1. Birincil Emme Aşaması

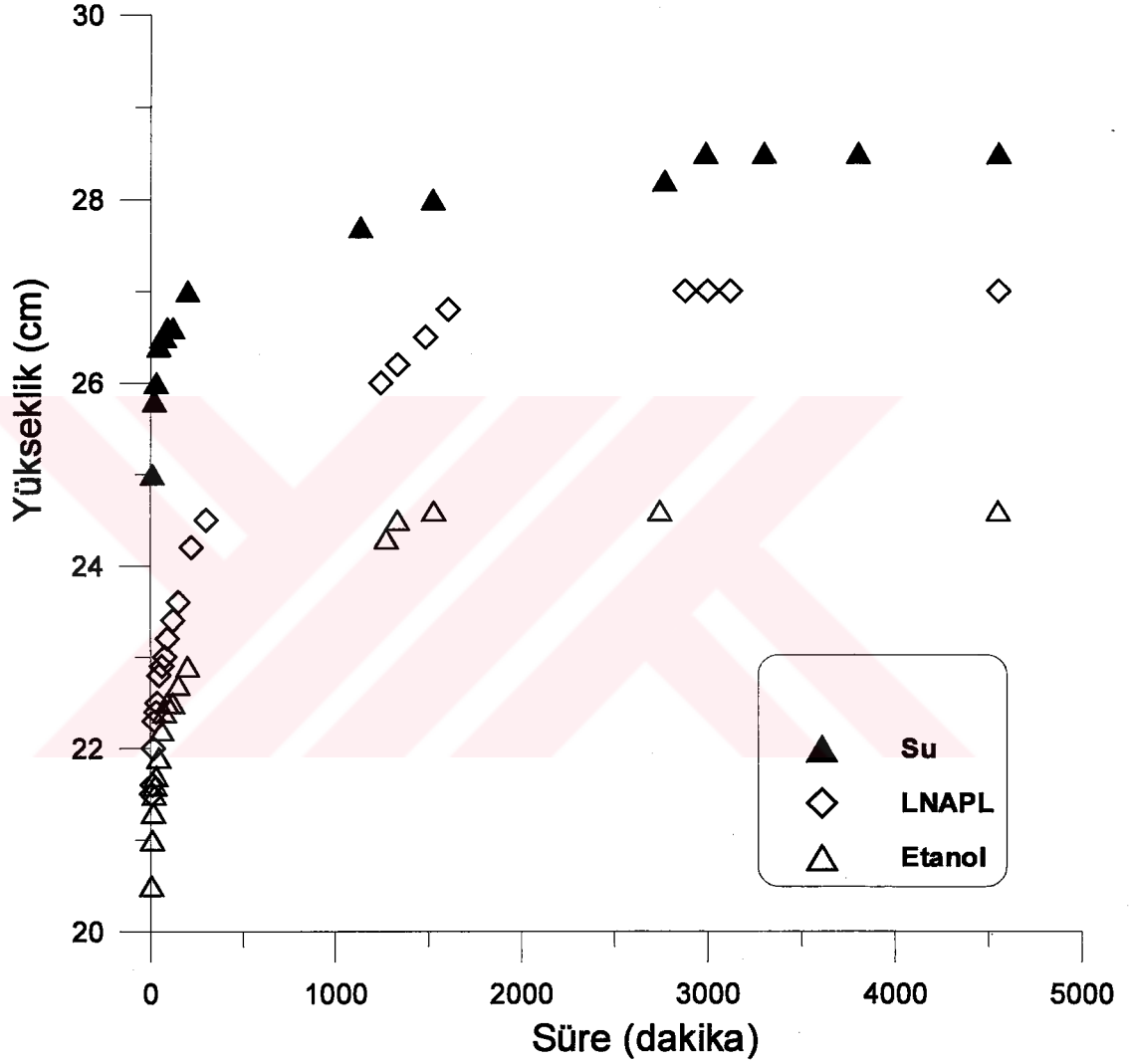
Ayrıntıları Bölüm 4’ de verilen deney düzeneğinde, rezervuarın vanası açılarak sıvıların kum ile dolu kolonun alt kısmından girmesi sağlanmıştır. Her üç sıvı da rezervuarın serbest sıvı seviyesine kadar kum ile dolu kolonda hızla yükselmiştir. Daha sonra, kılcal kuvvetlerin etkisi ile her sıvı farklı bir yüksekliğe kadar bir miktar yükselmiştir.

Şekil 5.1, birincil emme süreci boyunca kılcallık etkisiyle üç sıvının zamana bağlı olarak yükselmesini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi, bütün sıvılar için oluşan eğrilerin şekli karakteristiktir. Yine şekilden görüleceği üzere, sıvının yoğunluğu arttıkça kum içerisinde kılcallık yoluyla yükselmeleri artmaktadır. Deneylerde kullanılan sıvılar içerisinde yoğunluğu en az olan etanol dür ve en az yükselmeye sahiptir. Ayrıca, her bir sıvının yükselmesi belli bir süreden sonra asimptotik bir değere ulaşmaktadır. Öte yandan, sıvının yoğunluğu arttıkça, sıvı yüksekliği daha uzun bir sürede asimptotik değere varmaktadır. Kum kolonunda kılcallığın etkisi ile sıvıların yükselebildiği maksimum seviyeler su için 28.5 cm , etanol için 24.6 cm ve LNAPL için 27 cm dir. Bir sıvının kolondaki yükselmesi asimptotik bir değere ulaşsa bile kolondaki ortalama doyma değeri yükselmeye devam etmektedir. Çünkü zamana bağlı olarak, özellikle kolonun alt kısımlarında sıvı daha çok gözeneği doldurmaktadır.

Üç sıvının kılcallık yolu ile kum kolonunda yükselmesi ve doymaları, toplam 12 gün boyunca, belirli sürelerde kum kolonundan gama zayıflatma ölçümleri alınarak izlenmiştir. Gözeneklilik, doyma değerlerinin hesaplanması ve yerçekimine bağlı süzülme işleminin gerçekleştirilmesi için, gözenekli ortamın tamamen doyması gerekmektedir. Bu amaçla sıvıların kılcallıkla yükseleceği maksimum seviye elde edildikten sonra, her üç sıvı için de kum kolonu tamamen doyurulmuştur. Bu koşul, gözenekli ortamın üst kısmında yaklaşık 3-4 cm lik küçük bir gölet oluşuncaya kadar, sıvı rezervuarının yavaşça yükseltilmesi ile sağlanmıştır. Daha sonra kolon 24 saat bekletilmiş ve tamamen sıvı ile doymuş kum için gama zayıflatma ölçümleri yapılmıştır.

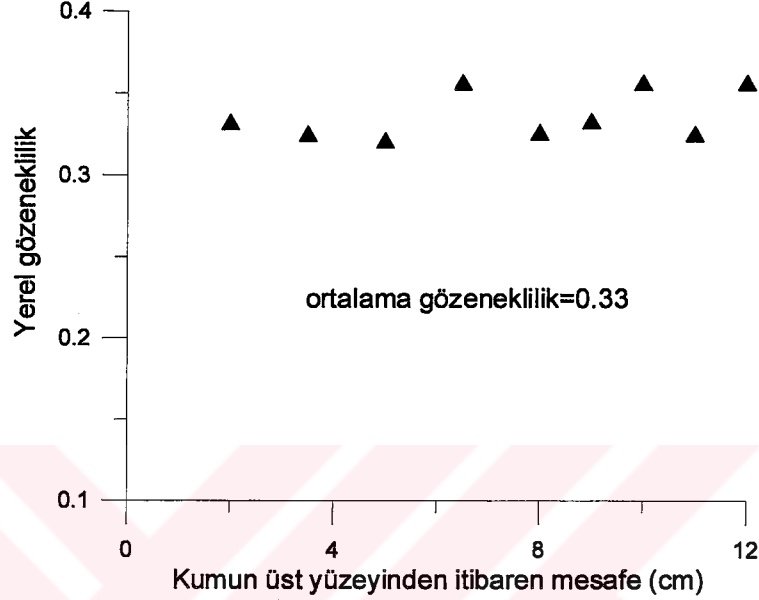
Bölüm 3.2’ de bahsedilen Denklem (3.4) ve (3.5) kullanılarak gözeneklilik aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$\phi = \left(1 + \frac{x_s \mu_l}{\ln(I_{ds}/I_{ss})} \right)^{-1} \quad (5.3)$$



Şekil 5.1 Sıvıların kum içerisinde kılcallığın etkisiyle zamana bağlı olarak yükselmesi (İshakoğlu ve Baytaş, 2002).

Şekil 5.2’ de ölçüm alınan 9 nokta için yerel gözeneklilik değerleri kumun üst yüzeyinden itibaren verilmiştir. Kum ile oluşturulan gözenekli ortamın gözenekliliği 0.33 ± 0.006 olarak bulunmuştur. Gözeneklilik bulunurken, kuru kum ve kumun sıvıya tamamen doyduğu gama zayıflatma değerleri kullanılmıştır. Gözeneklilik, ortamın bir özelliğidir ve ortamdaki sıvıya bağlı olarak değişmektedir.

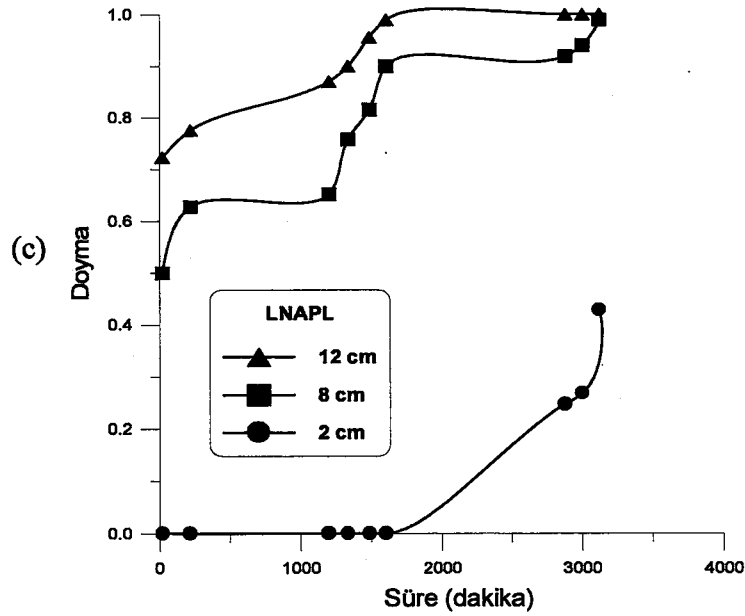
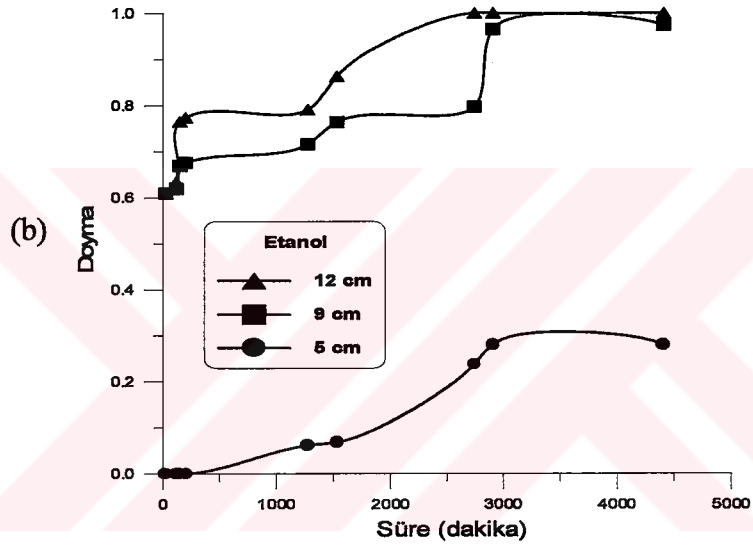
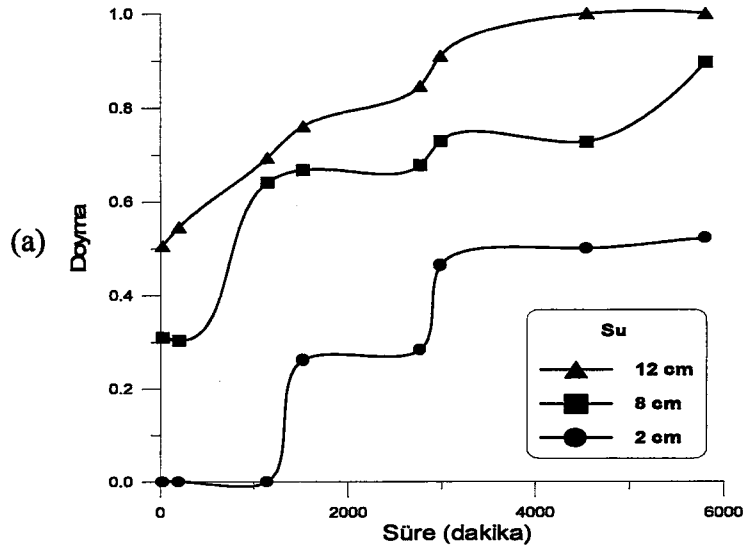


Şekil 5.2 Gözenekli ortama ait yerel gözeneklilik (İshakoğlu ve Baytaş, 2002).

Bölüm 3.2’ de yer alan (3.6), (3.7) ve (3.8) denklemleri biraraya getirilerek doyma, gama zayıflatma ölçümleri cinsinden aşağıdaki gibi bulunmuştur.

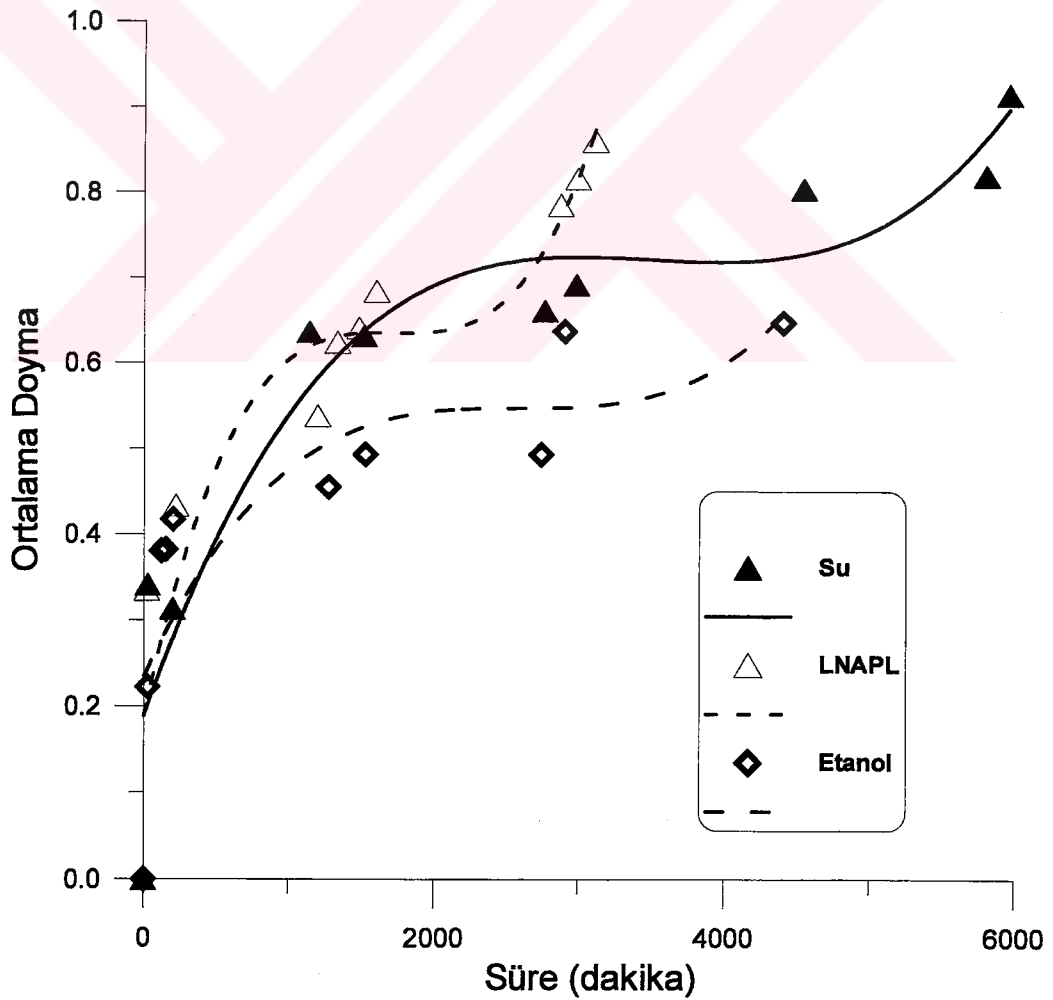
$$S_{lh} = \frac{\ln(I_{ds}/I_h)}{\ln(I_{ds}/I_{ss})} \quad (5.4)$$

Tüm kolondaki ortalama doyma halini incelemekten önce Şekil 5.3 de bütün sıvılar için, kolonda sıvının çıkabildiği maksimum seviye, kolonun orta bölgesi ve kolonda zayıflatma ölçümlerinin başlatıldığı en alt seviye için zamana bağlı doyma değişimleri verilmiştir. Söz konusu seviyeler kumun üst yüzeyinden itibaren temsil edilmişlerdir. Yani kolonun alt noktası 12 cm, orta bölgesi 8-9 cm ve üst noktası 2-5 cm dir. Doğal olarak kolonun alt bölgesi diğer bölgelere göre daha kısa sürede doyma haline ulaşmaktadır. Buna karşılık en üst bölge tüm ölçüm süresince düşük doyma değerlerinde kalmaktadır. Şekil 5.3 b ve Şekil 5.3 c’ den görüleceği gibi en üst bölgede suya nazaran etanol ve LNAPL için orta bölgeye daha yakın hızda doyma hali gerçekleşmektedir. Bununla beraber, kolonun en üst bölgesinde gözenekli ortamın suya doyması diğer iki sıvıya göre daha fazladır.



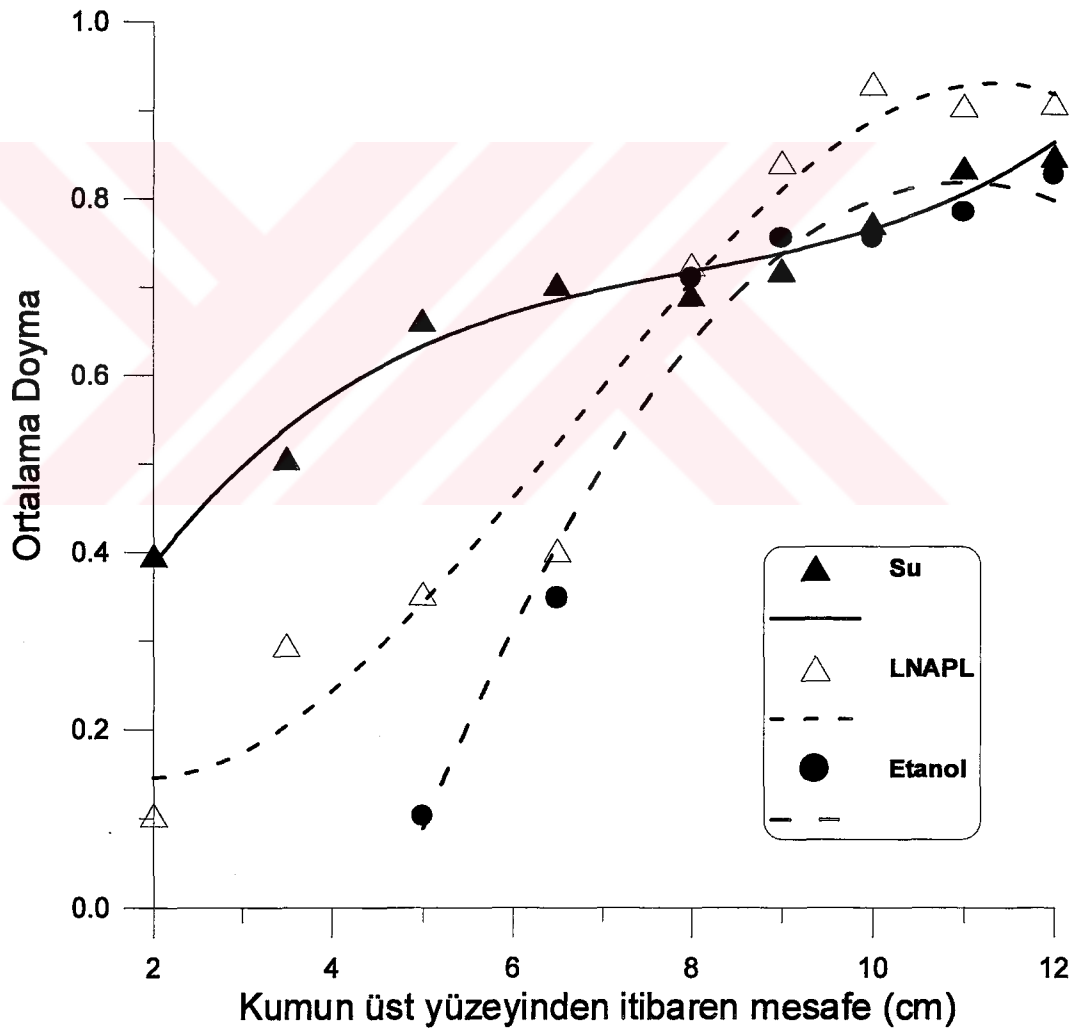
Şekil 5.3 Farklı ölçüm seviyelerinde doymanın (a) Su, (b) Etanol ve (c) LNAPL için zamana bağlı değişimi.

Şekil 5.4’ de ise kum kolonunun ortalama doyma değerlerinin zamana bağlı değişimi verilmiştir. Bu grafik oluşturulurken sayım alınan 9 nokta için belirli sürelerdeki doyma değerleri bulunmuş ve o andaki 9 noktanın doyma değerlerinin ortalaması alınmıştır. Kum kolonunda ortalama sıvı doyması artarken, kılcal kuvvetler etkisiyle kum kolonundaki bir sıvının yükselmesi asimptotik bir değere ulaşmaktadır. Bunun nedeni, kolon alt kısımlara doğru tam doymuş halde iken, daha üst kısımlarının sınırlı olarak doymaya sahip olmasıdır. Şekil 5.4’ de görüldüğü gibi her üç sıvı için zamana bağlı ortalama doyma eğrileri benzer karakteristiği göstermektedir. Kum kolonundaki doyma başlangıçta hızla artmaktadır, sonra belirli bir süre değişim göstermemektedir ve son aşamada doymada bir miktar artış görülmektedir. Bunun yanısıra, Şekil 5.4’ den görüleceği gibi gözenekli ortam en uzun sürede suya, en kısa sürede LNAPL’ e doymaktadır.



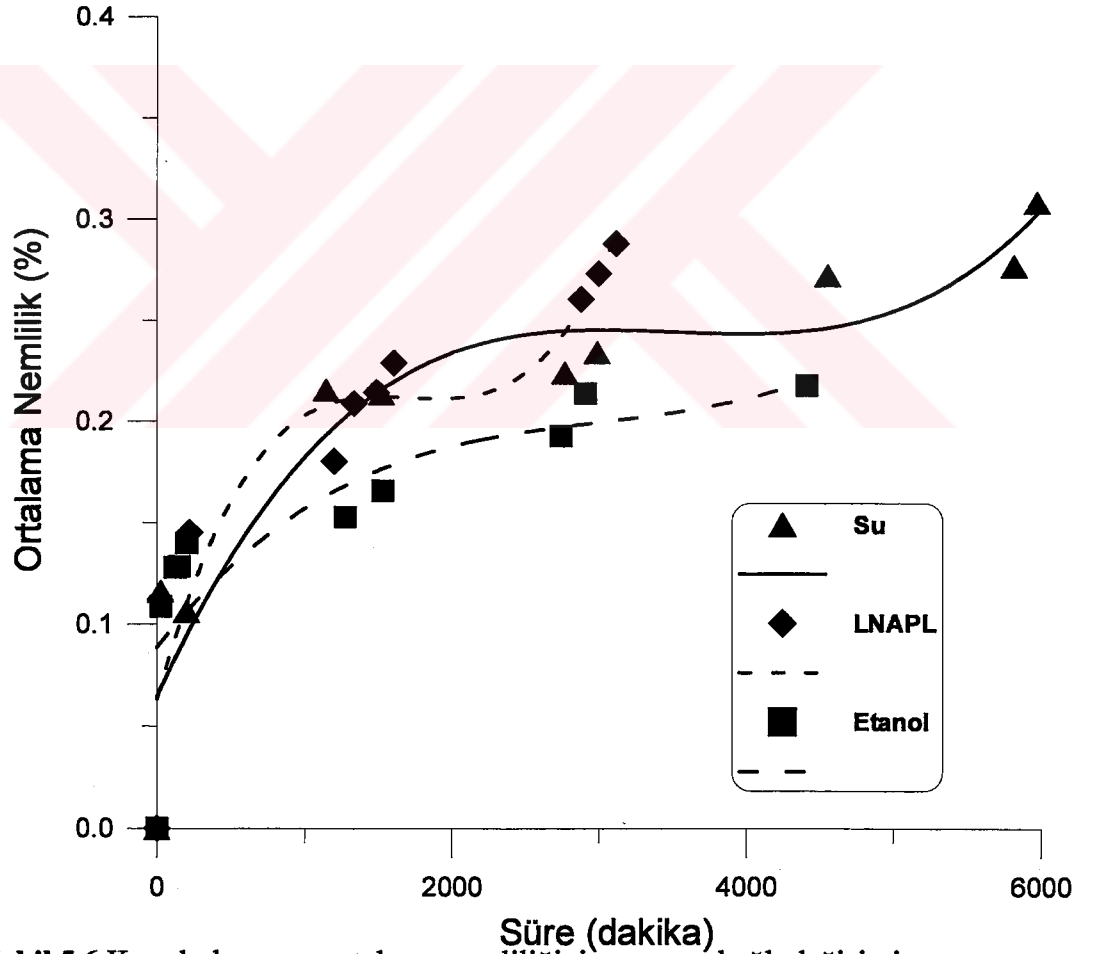
Şekil 5.4 Kum kolonunda ortalama doyma değerlerinin zamana bağlı değişimi (İshakoğlu ve Baytaş, 2002).

Kolondaki ıslatan akışkan doyması birincil emme sürecinin başlangıcında nispeten hızla artmaktadır ve bu artış hızı her üç sıvı için de daha sonra yavaşlamaktadır. Şekil 5.5’ de her üç sıvı için ortalama doyma değişimi, kumun üst yüzeyinden derinliğe bağlı olarak gösterilmiştir. Bu şekil, birincil emme aşamasının sonunda hazırlanmıştır. Şekil 5.5’ deki doyma değerleri, bütün birincil emme süreci boyunca sayım noktalarından alınan değerlerin ortalamasını göstermektedir. Şekil 5.5’ de görüldüğü gibi su için doyma azar azar artmaktadır, buna karşılık etanol ve LNAPL için doyma daha hızlı bir artış göstermektedir. Doğal olarak kum yüzeyinden itibaren derinlik arttıkça kolonun alt kısmına yaklaşılmakta ve doyma yüksek değerlere ulaşmaktadır.

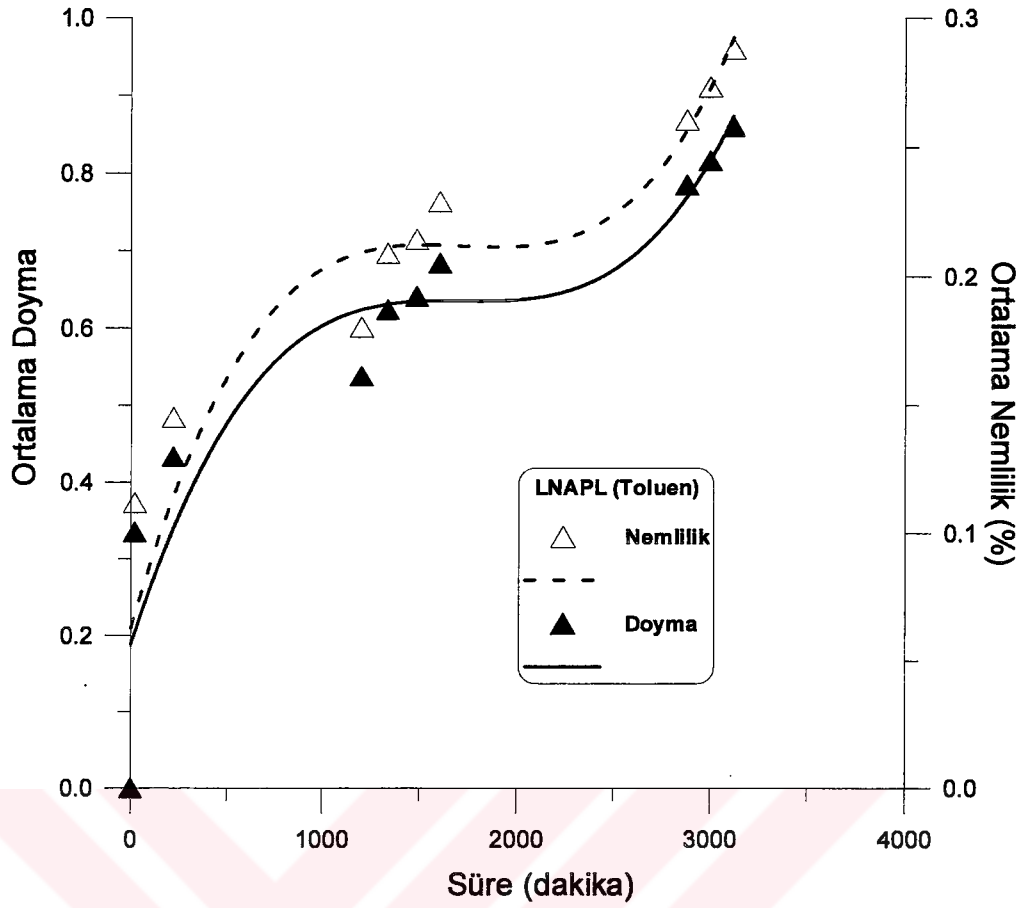


Şekil 5.5 Ortalama doymanın kum yüzeyinden itibaren derinliğe bağlı değişimi (İshakoğlu ve Baytaş, 2002).

Bölüm 2.4.1 den hatırlanacağı gibi gözenekli ortamda akışkan nemliliği, gözeneklilik ve doyma cinsinden Denklem (2.8) ile bulunmaktadır. Şekil 5.6 kum kolonunun ortalama nemliliğinin zamana bağlı değişimini göstermektedir. Bu grafiği oluşturan bilgiler, Şekil 5.4 deki bilgilerin gözeneklilik ile çarpılması ile oluşturulmuştur. Şekil 5.4 ve Şekil 5.6 karşılaştırıldığında her üç sıvı için de doyma değerlerinin nemlilikten daha büyük olduğu görülmektedir. Bu fark Şekil 5.7’ da LNAPL için aynı zaman ekseninde verilen doyma ve nemlilik eğrilerinden de açıkça görülmektedir. Bu da doğaldır, zira nemlilik gözenekli ortamın tuttuğu akışkan miktarı ile ilgilidir, doyma ise akışkan ile dolan gözenek miktarı ile ilgilidir. Örneğin tam doyma halinde, gözeneklere dolan akışkan miktarı az olabilir, ancak gözeneklerin hepsi akışkan ile dolduğu için doyma maksimum değere ulaşır.



Şekil 5.6 Kum kolonunun ortalama nemliliğinin zamana bağlı değişimi

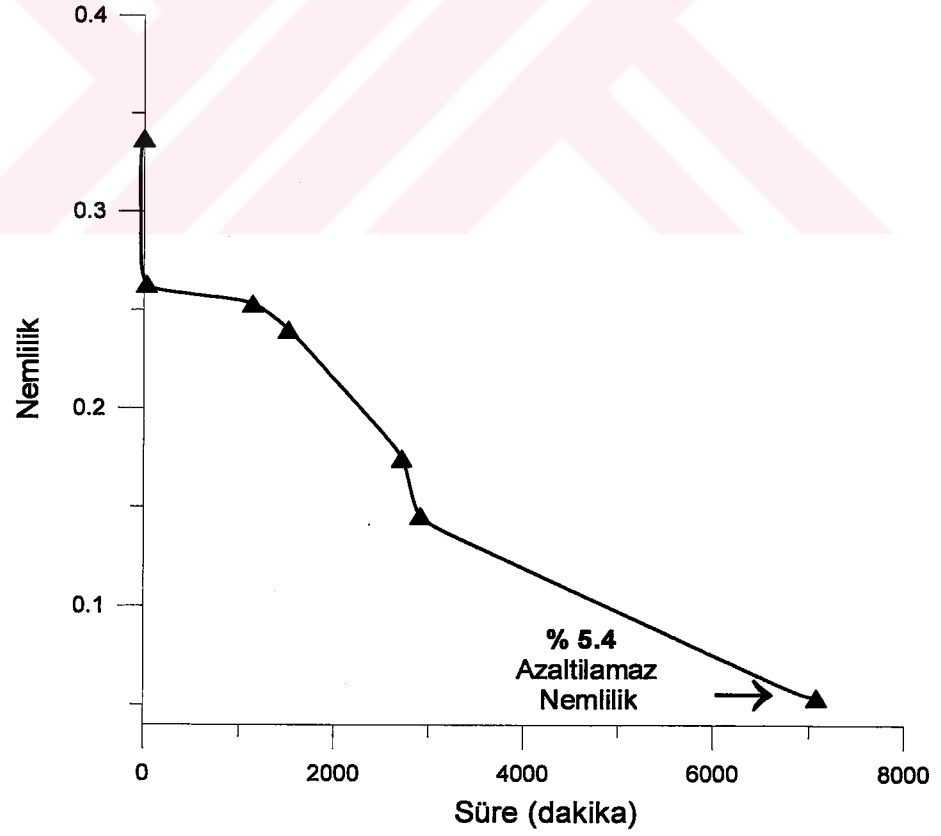
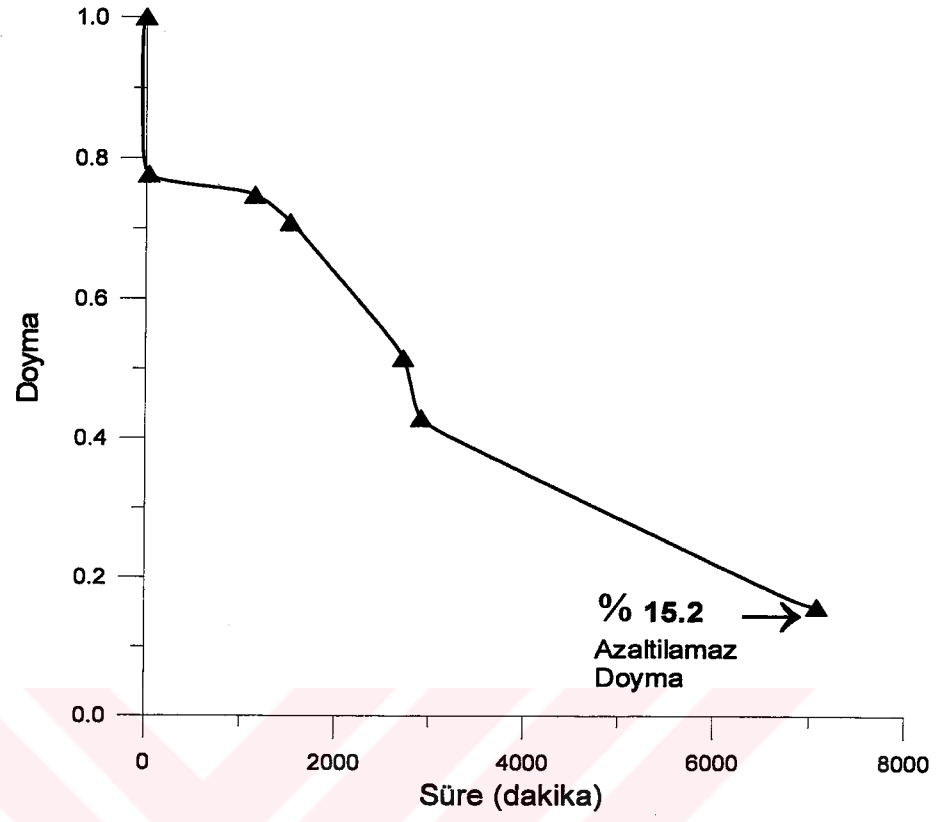


Şekil 5.7 Zamana bağlı doyma ve nemliliğin karşılaştırılması

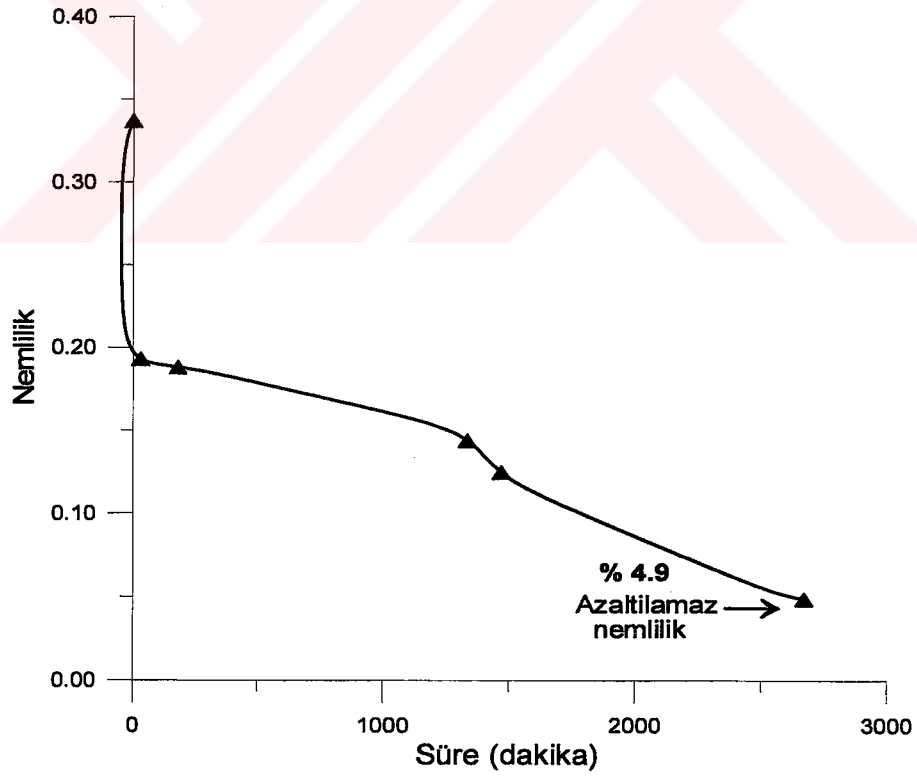
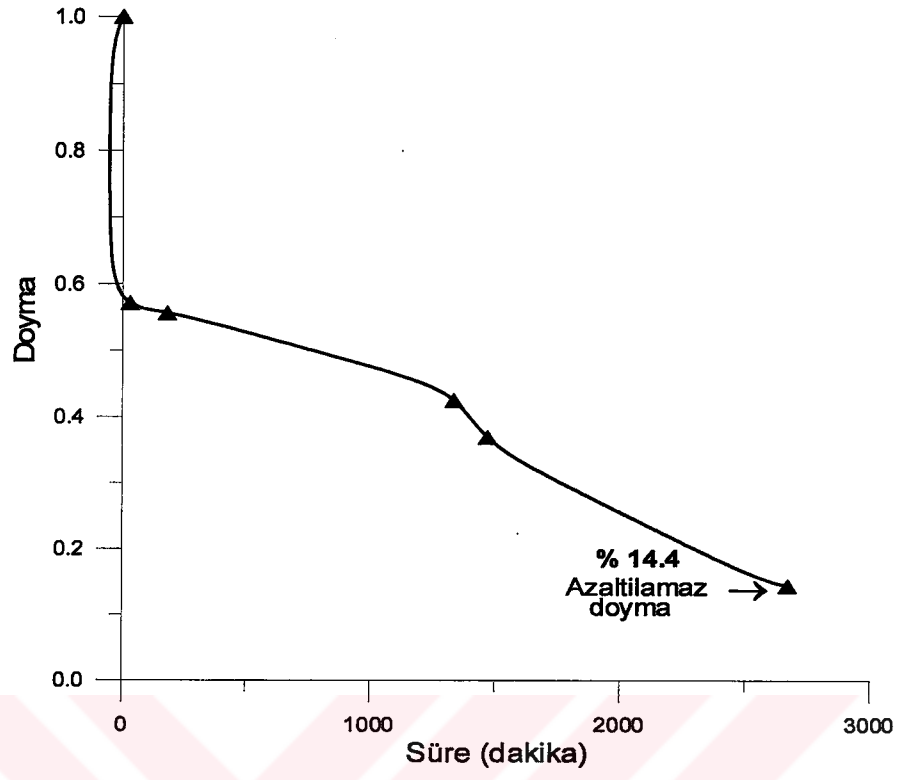
5.1.2. Yerçekimine Bağlı Süzülme Aşaması

Süzülme işlemine tamamen sıvıya doymuş kumun elde edildiği birincil emme aşamasının bitiminden sonra başlanmıştır. Süzülme aşamasında, tamamen doymuş kum kolonundan sıvının uzaklaştırılması gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, rezervuar seviyesi aşağıya indirilip sıvının kum kolonundan süzülmesi sağlanmıştır. Süzülme işlemi başlangıçta hızlı bir şekilde oluşmakta, ancak daha sonra sıvının gözenekli ortamdan süzülme hızı hayli yavaşlamaktadır. Süzülme deneyleri üç sıvı için gözenekli ortamda azaltılamaz ıslatan akışkan doyması S_{wo} ve azaltılamaz ıslatan akışkan nemliliği N_{wo} bilgilerini oluşturmak üzere gerçekleştirilmiştir. Üç sıvı için süzülme işlemi 12 gün sürmüştür ve bu süreç boyunca belirli sürelerde kum kolonundan gama zayıflatma ölçümleri tekrarlanmıştır.

Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10' da yerçekimine bağlı süzülme aşamasında sırasıyla su, etanol ve LNAPL doymaları için zamana bağlı değişimleri görülmektedir. Bu üç şekilden de görüleceği üzere, doyma beklendiği gibi sıfıra inmemekte ve bir miktar sıvı gözenekli ortamda tutulmaktadır.

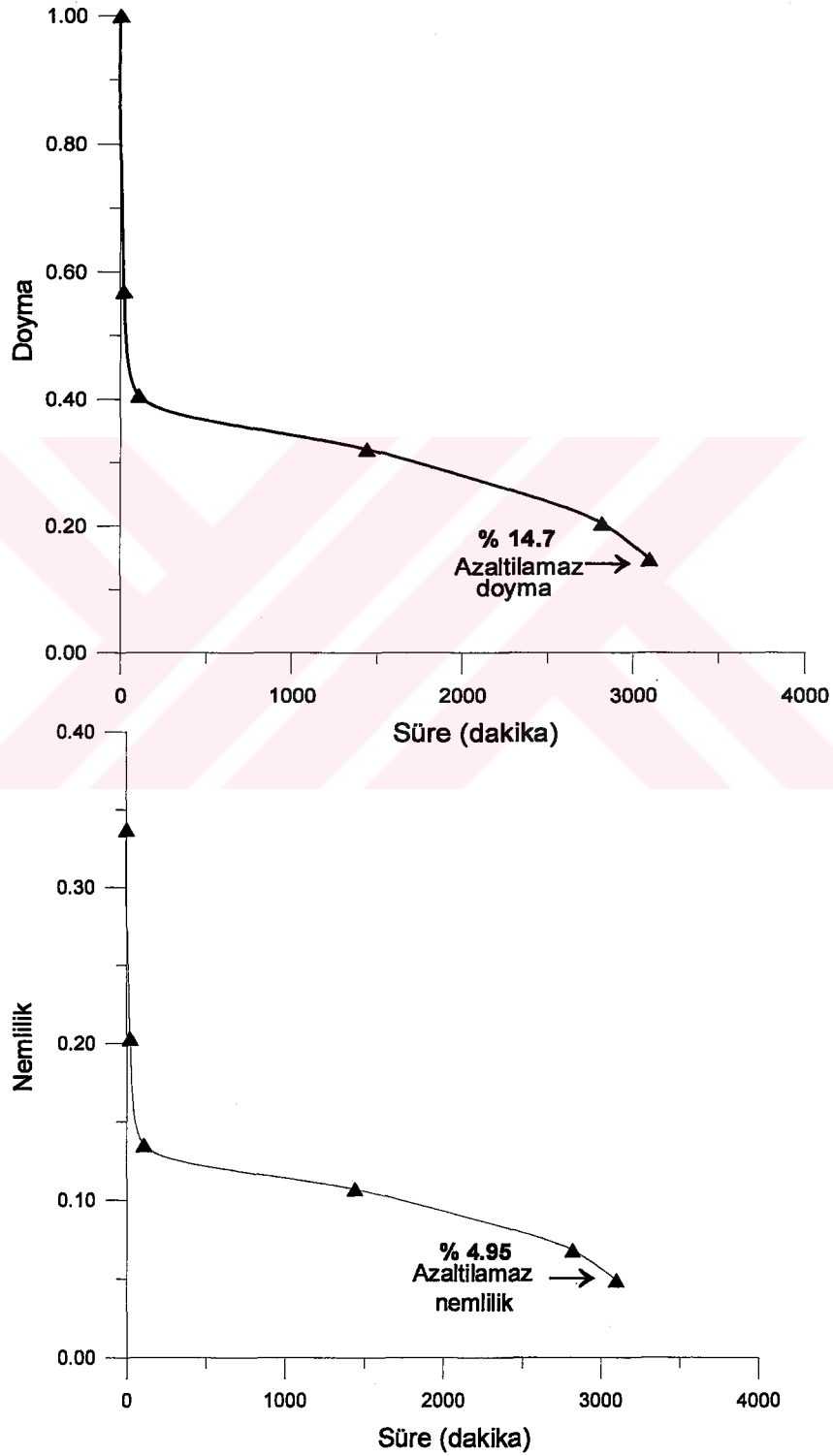


Şekil 5.8 Su için zamana bağlı olarak azaltılamaz doyma ve nemlilik



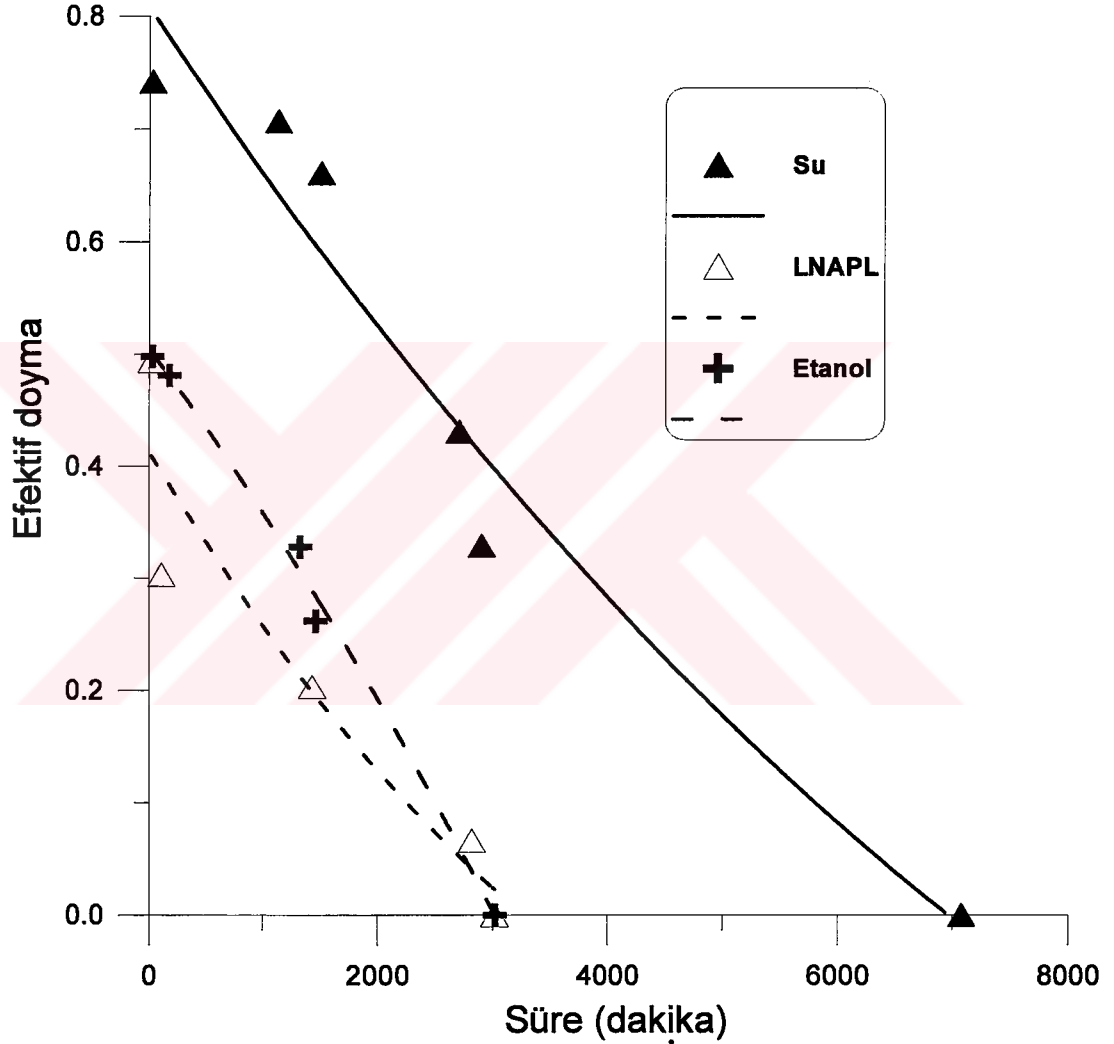
Şekil 5.9 Etanol için zamana bağlı olarak azaltılamaz doyma ve nemlilik

Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10' de doymanın beklendiği gibi sıfıra inmemesi ve bir miktar sıvının gözenekli ortamda tutulma miktarı yani azaltılamaz doyma ve nemlilik, Tablo 5.2.' den de görüleceği üzere, sıvı yoğunluğu azaldıkça daha küçük değerlere ulaşmaktadır. Yani, yoğunluğu fazla olan sıvı gözenekli ortamda daha çok tutulmaktadır.



Şekil 5.10 LNAPL için zamana bağlı olarak azaltılamaz doyma ve nemlilik

Şekil 5.11’ de yerçekimine bağlı süzülme süreci için, üç sıvının zamana bağlı efektif doymaları görülmektedir. Efektif doyma değerleri Denklem (2.18) kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 5.11’ de görüleceği üzere, her üç sıvının doyma eğrileri karakteristiktir. Ancak, suyun süzülme süresi, etanol ve LNAPL’e nazaran daha fazladır.



Şekil 5.11 Efektif doymanın zamana bağlı değişimi (İshakoğlu ve Baytaş, 2002).

5.1.3. İkincil Emme Aşaması

Bu aşamada, önce bir sıvıya doymuş ve sonra da tamamen süzölmüş olan kum kolonu tekrar aynı sıvıya doyurulmuştur. İkincil emme aşaması, birincil emme aşaması ile aynı şekilde gerçekleştirilmiştir. Rezervuarın vanası açılarak gözenekli ortamda sıvının kılcallık yoluyla yükselmesi beklenmiştir. Sıvılar kolonda yükselebilecekleri maksimum seviyeye ulaştıktan sonra, rezervuar yükseltilerek kolon tamamen doyurulmuştur. Ancak, aynı yöntemle birincil emme sonunda tam doyma gerçekleşirken, ikincil emme sonunda beklendiği gibi tam doyma sağlanamamıştır ve bir miktar hava (ıslatmayan akışkan) gözenekli ortam içerisinde kalmıştır. Bu miktar, yani artık ıslatmayan akışkan doyması, S_{no} ve nemliliği, N_{no} , Tablo 5.2’ de görüleceği üzere, sıvı yoğunluğu azaldıkça daha küçük değerlere ulaşmaktadır. Yani, yoğunluğu fazla olan sıvıya doymuş gözenekli ortamda ıslatmayan akışkan olan hava daha çok tutulmaktadır.

Tablo 5.2 Yerçekimine bağlı süzölme ve ikincil emme deneylerinin sonuçları (İshakoğlu ve Baytaş, 2002).

Sıvılar	Su	LNAPL	Etanol
Sıvı yoğunluğu (g/cm^3)	0.997	0.867	0.799
Azaltılamaz doyma, S_{wo}	0.158	0.147	0.144
Artık ıslatmayan akışkan doyması, S_{no}	0.074	0.064	0.053
Azaltılamaz nemlilik, N_{wo}	0.054	0.0495	0.0494
Artık ıslatmayan akışkan nemliliği, N_{no}	0.026	0.022	0.018

5.2. GÖZENEKLİ ORTAMDA İKİ FAZLI AKIŞ İÇİN KILCAL BASINÇ İLE DOYMA ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ

Bu aşamadaki deneysel çalışmalarda, gözenekli bir ortamda iki fazlı akış için kılcal basınç ile doyma profilleri yapılandırılmış ve incelenmiştir. Bu ilişkinin incelenmesinde, boyutsuz kılcal basınç fonksiyonu olan Denklem (2.23) deki Leverett-J fonksiyonu kullanılmıştır. Bu nedenle, kılcal basınç ile doyma verilerinin bağdaştırılması için kullanılan fiziksel parametreler, hava ve sıvı yoğunlukları, arayüzey gerilimi, gözeneklilik, geçirgenlik ve temas açısıdır. Bu çalışmada, bu fiziksel parametrelerden gözeneklilik ve doyma değerleri gama ışını zayıflatma tekniği ile deneysel olarak belirlenmiştir. Geçirgenlik bilgisi Denklem (2.22)' deki Carman-Ergun (C-E) bağıntısı vasıtasıyla teorik olarak belirlenmiştir. Temas açısı bilgisi de ileride tarif edileceği gibi yine deneysel olarak belirlenmiştir.

Deneysel aşamalarda, gözenekli ortamda iki akışkan fazı, Bölüm 5.1' de olduğu gibi hava-su, hava-etanol ve hava-LNAPL olarak oluşturulmuştur. Bu üç farklı iki fazlı ortam için kılcal basınç ve doyma profilleri iki aşama için hazırlanmıştır. Bunlar sırasıyla; birincil emme ve yerçekimine bağlı süzülme aşamalarıdır.

Deneyselerde, 50 cm uzunluğundaki cam kolon elekten itibaren 46 cm' ye kadar kum ile doldurulmuştur. Gama ışını zayıflatma ölçümleri 46 cm' lik kolon boyunca 1.5 cm'lik aralıklarla 20 noktadan alınmıştır. Ayrıca, 3 cm' lik aralıklarla 46 cm' lik kum boyunca 12 tane kılcal basınç noktası belirlenmiştir. Polietilen rezervuardaki serbest sıvı seviyesi elekten itibaren 15 cm olarak ayarlanmıştır. Kılcal basıncın sıfır olduğu bu seviye yüksekliği, sıfır referans olarak kullanılmıştır ve bu seviyenin altında ölçüm alınmamıştır. Sıvı rezervuarının deneysel aşamalarda yukarı ve aşağı doğru hareket ettirilmesi ile, kum ile dolu kolondaki kılcal basınç ve doyma verilerinin değişimi sağlanmıştır. 12 nokta için belirlenen kılcal basınç değerleri de Denklem (2.23) kullanılarak saptanmıştır.

5.2.1. Doyma Ölçümleri

(a) **Birincil emme aşaması;** Bütün birincil emme aşaması deneyleri için doyma profili, kuru kum dolu kolon ile başlayarak oluşturulmuştur. Cam kolon kum ile mümkün olduğu kadar uniform bir şekilde doldurulduktan sonra, kuru kum için

gama ışını zayıflatma ölçümleri belirlenmiş olan 20 noktadan alınmıştır. Daha sonra, rezervuarın vanası açılarak sıvının kuru kum ile dolu kolona alt kısımdan yukarı doğru emdirilmesi sağlanmıştır. Her üç sıvı da, rezervuardaki serbest sıvı yüzeyi seviyesine kadar kum kolonunda hızla yükselmiştir. Daha sonra sıvı rezervuarı, $h=15$ cm' den itibaren yavaşça 3 cm aralıklarla, sıvının kum yüzeyinin 2-3 cm üzerinde gölet oluşturması sağlanıncaya kadar yükseltilmiştir. Böylece, sıvı rezervuarı kum kolonundaki kılcal basıncı kontrol etmek için kullanılmıştır. Sıvı rezervuarının bu noktalara yükseltilmesi yaklaşık 45 dakikalık aralıklarla yapılmıştır. Dolayısıyla, kum ile dolu kolondaki sıvının yükselme hızı 4cm/saat' dir. Her bir adım boyunca, sıvı seviyelerinin değişimlerinden sonra ulaşılan statik denge durumunda yani 45 dakikalık bekleme sürecinden sonra, sıvı doymaları gama ışını zayıflatma ölçümü bilgilerinden yararlanılarak belirlenmiştir.

(b) Yerçekimine bağlı süzülme aşaması; Bütün süzülme deneylerinde doyma profili, sıvı ile tam olarak doymuş kum ile başlanmasıyla oluşturulmuştur. Bu nedenle, kolondaki sıvı yüzeyi seviyesi kumun birkaç santimetre üzerinde olacak şekilde hazırlanmıştır. Daha sonra, sıvı rezervuarı kolondaki sıvı doymasını düşürmek için birincil emme aşamasında olduğu gibi 4cm/saat' lik bir hızla yavaşça aşağı doğru indirilmiştir. Rezervuardaki sıvı seviyesi elekten itibaren 15 cm oluncaya kadar indirilmiştir. Bu sayede, bütün deneyler boyunca kum kolonunun bu seviye altında kalan kısmının sıvı ile tamamen doymuş ($S_w = 1$) olması sağlanmıştır. Bu süreç boyunca, birincil emme aşamasında olduğu gibi 20 noktadan gama ışını zayıflatma ölçümleri tekrarlanmıştır. Sıvı rezervuarındaki sıvı seviyesi elekten itibaren 15 cm' ye indirildikten sonra, kolon bir gece boyunca bekletilmiştir. Bu şekilde, hava-sıvı sistemli iki faz için statik dengeye ulaşılması sağlanmıştır. Bu süzülme periyodunun sonunda, her üç sıvı için azaltılamaz ıslatan akışkan doyması S_{wo} ' yu elde etmek amacıyla kolon boyunca gama ışını zayıflatma ölçümleri tekrarlanmıştır.

Deneysel aşamalarda statik denge oluşumunun vurgulanması önem taşımaktadır. Buradaki statik denge, hiçbir akışkan hareketinin olmayışı anlamına gelmektedir. Bu nedenle, deneysel aşamalarda elde edilmiş olan her bir nokta, akışkan hareketinin durduğu bir denge durumunu göstermektedir. Bu deneysel çalışmalarda denge halinin oluşumu iki şekilde belirlenmiştir. Bunlar;

(1) Alınan sayımlar doğrultusunda sıvı doymalarındaki ihmal edilebilir değişimler,

(2) Rezervuar ile kum kolonu arasında sıvı akışının olmamasıdır.

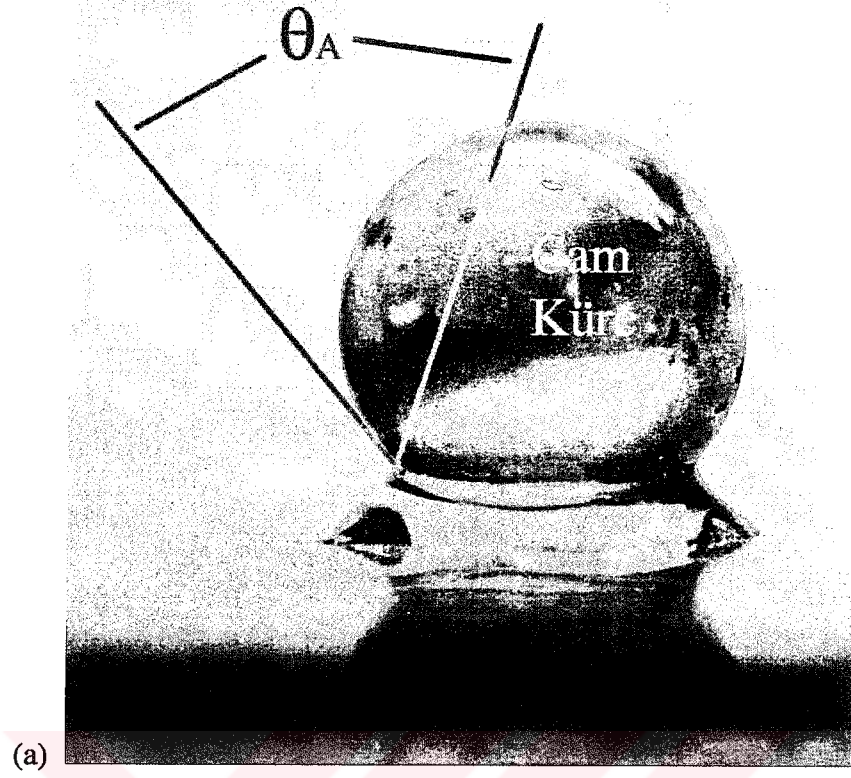
5.2.2. Temas Açısı Ölçümleri

Temas açısı tam olarak kesin, belirli bir değere sahip değildir. Temas açısı, sıvının kuru bir yüzey üzerinde ilerleme veya daha önceden ıslak yüzeyden geri çekilme eğilimine bağlı olarak iki uç değer arasında değere sahip olabilir. Bu nedenle, temas açısı kavramıyla birlikte bir önemli problem de ilerleme temas açısının geri çekilme temas açısına göre belirgin bir şekilde büyük oluşudur (Dullien, 1992). Bu çalışmada, kuru yüzey (ilerleme) ve ıslak yüzey (geri çekilme) temas açılarının belirlenmesi için mikroskopik gözlemlere dağılımı kullanılmıştır.

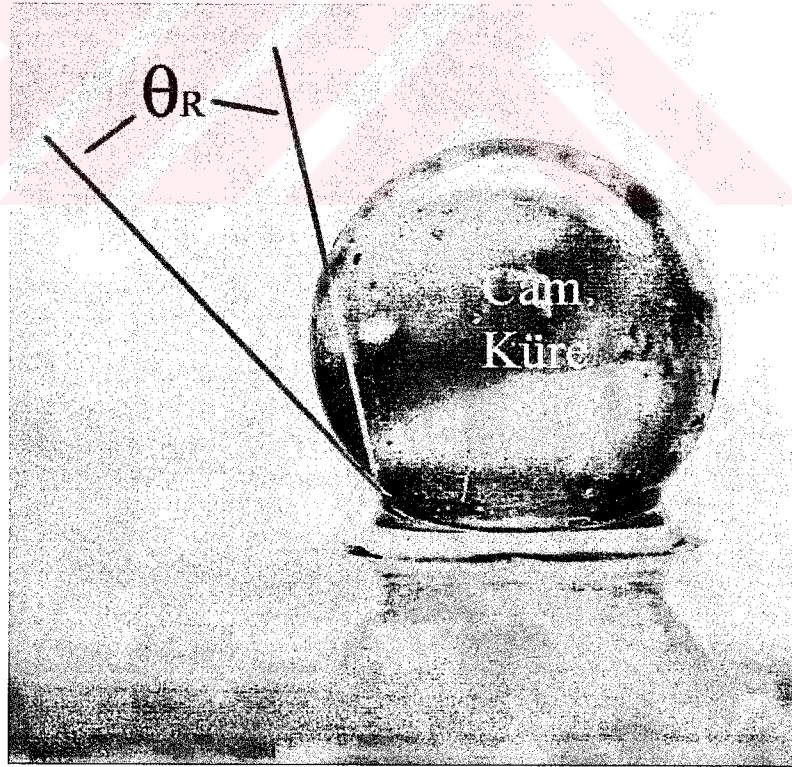
Temas açısı ölçümleri için cam küre, düz cam plaka ve şırınga kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan silika kumuyla aynı silisyum dioksit kompozisyona sahip olan cam kürelerin çapı yaklaşık olarak 2cm' dir. Cam küreler ve cam plaka aseton ile iyice temizlendikten sonra, küreler cam plakanın merkezine yerleştirilmiştir. Şırınga test sıvılarının küre ve plaka arasına verilmesi için kullanılmıştır. İlerleme temas açıları, kuru olan kürenin alt kısmına test sıvısının enjekte edilmesi ile sağlanmıştır. Geri çekilme açıları ise ıslak olan kürenin alt kısmından sıvının çekilmesi vasıtasıyla sağlanmıştır. Bu koşulların fotoğrafları makro lens fotoğrafı olarak elde edilmiştir. Şekil 5.12' de ilerleme ve geri çekilme temas açılarının saptanması görülmektedir. Şekilde gösterildiği gibi, sıvının küreye temas ettiği nokta ile sıvının küreye temas ettiği doğrultu arasındaki açının ölçülmesiyle temas açısı elde edilmiştir. Temas açısı ölçümlerinin sonuçları Tablo 5.3' de verilmiştir.

5.2.3. Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi

Her üç sıvı için Denklem (2.23) Leverett fonksiyonuna göre birincil emme doyma bilgileri Şekil 5.13 de verilmiştir. Şekil 5.13' de her bir sıvı ayrı ayrı ele alındığında, Leverett fonksiyonunun kılcıl basınç ile doyma arasındaki ilişkinin tanımlanmasında çok iyi sonuç verdiği görülmektedir. Ancak, her üç sıvı için Leverett fonksiyonu karşılaştırıldığında önemli bir farklılık yine Şekil 5.13' de açıkça görülmektedir. Bu farklılık her üç sıvının temas açılarındaki farklılıklarının bir sonucu olduğu sonucuna varılabilir.



(a)

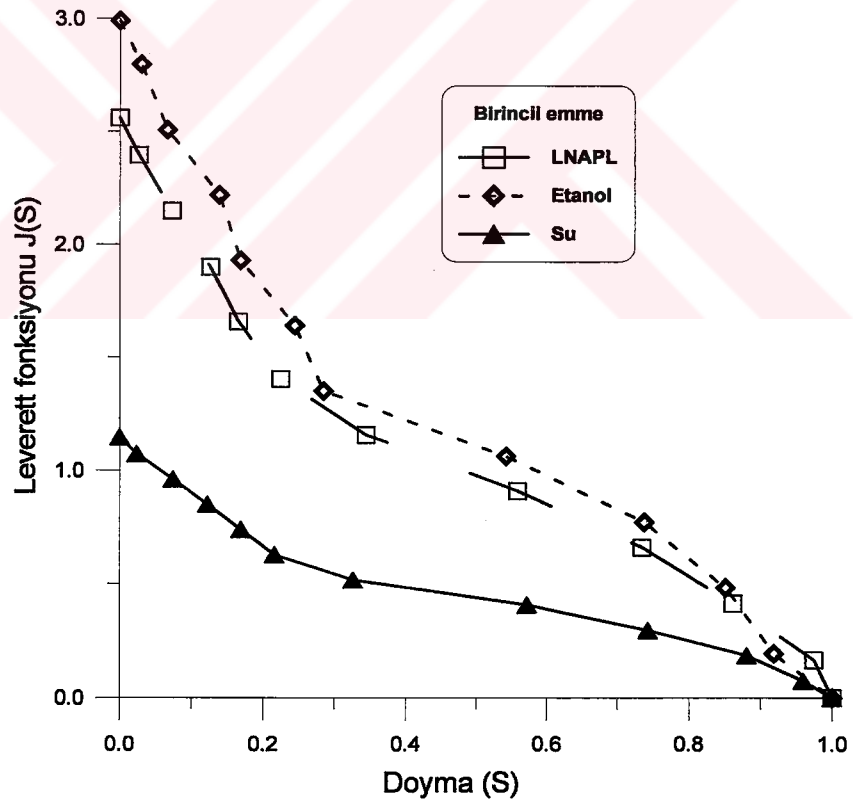


(b)

Şekil 5.12 Temas açısı deneylerinin fotoğrafları. (a) İlerleme, (b) geri çekilme temas açıları.

Table 5.3. Cam kürelerle üç sıvı için ölçümlenen temas açısı değerleri.

Sıvılar	Temas Açısı, θ , (Derece)	
	İlerleme, θ_A	Geri çekilme, θ_R
Su	61±4	27±3
LNAPL	49±2	23±3
Etanol	46±3	22±2



Şekil 5.13 Üç sıvı için Leverett fonksiyonuna göre birincil emme doyması

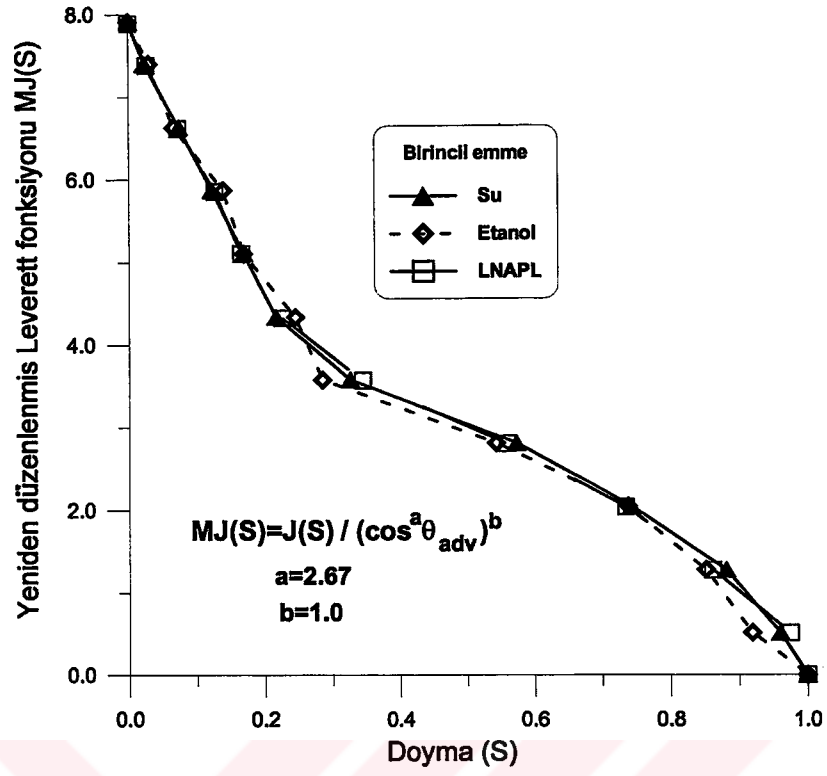
Demond ve Roberts (1991), kılcal basınç ile doymayı temas açıları kullanarak bağdaştırmışlardır. Bunun yanısıra, Leverett fonksiyonunun öncelikle temas açısının dahil edilip edilmemesinin belirlenmesi için denenmesini ve daha sonra eğer gerekli ise temas açısına bağlı olarak uygun fonksiyonel formun yapılandırılmasını önermişlerdir.

Bu çalışmada, Şekil 5.13' deki verilerin temel bir eğriye dönüştürülmesi için Leverett fonksiyonunda temas açısı bağımlılığı terimi kullanılmıştır. Tablo 5.3' deki gibi ilerleme ve geri çekilme temas açılarının karşılaştırıldığında, histeresiz etkisi açıkça görülmektedir. Kuru paketlenmedeki sıvının emmesi için akışkan-katı arayüzeyinde bir ilerleme temas açısının oluşacağı varsayımı kabul edilebilir (**Moseley ve Dhir, 1996**). Bu nedenle, bir sıvının emmesi için kılcal basınç ile doyma arasındaki ilişkinin geliştirilmesinde ilerleme temas açıları kullanılmıştır. Leverett fonksiyonu, üç sıvının emme doyması için aşağıdaki gibi yeniden düzenlenmiştir.

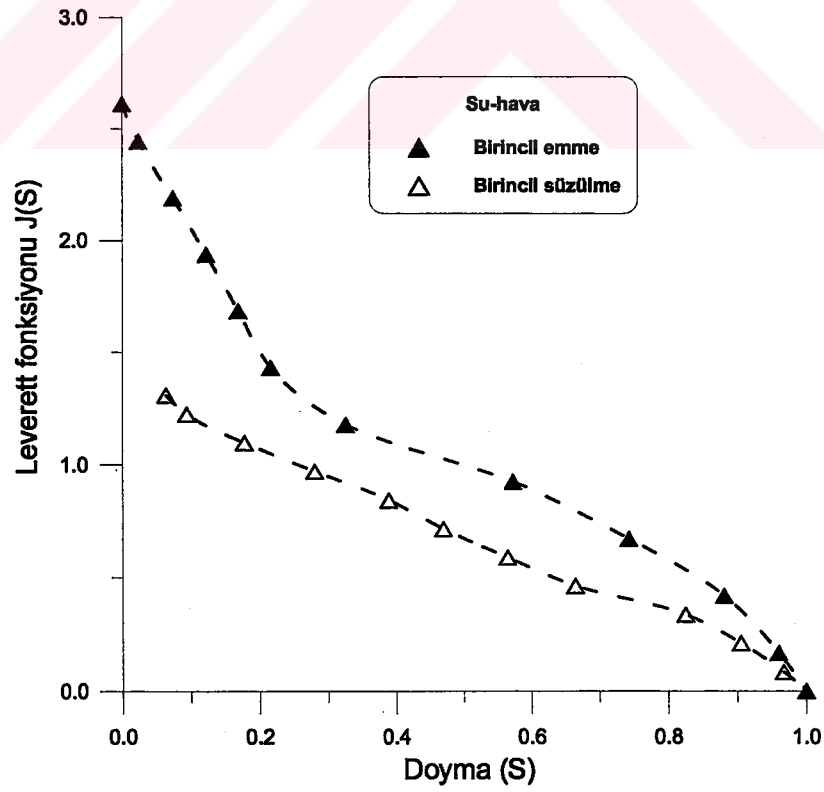
$$MJ(S) = \frac{J(S)}{(\cos^a \theta_A)^b} \quad 0 \leq S \leq 1 \quad (5.5)$$

Burada; θ_A ilerleme temas açısı ve a ile b ise en-iyi uyumlaştırma parametreleridir. Birincil emme için bu parametreler sırasıyla $a=2.67$ ve $b=1$ ' dir. Şekil 5.14' de her üç sıvının doyma emmeleri için yeniden düzenlenmiş kılcal basınç fonksiyonları görülmektedir. Şekil 5.14' den de görüleceği üzere, Denklem (5.5) ile verilen korelasyon ölçülebilir temas açılarına sahip 3 sıvı için doyma ve kılcal basınç arasında çok iyi bir ilişki sağlamıştır.

Şekil 5.15' de su için emme ve süzülme doyma verilerinin Leverett fonksiyonuna göre eğrileri görülmektedir. Bu eğrilerin şekilleri etanol ve LNAPL için de aynı karakteristiğe sahiptir. Şekil 5.15' de görüleceği gibi kılcal basınç ile doyma eğrileri emme ve süzülme süreçleri için birbirlerinden farklı olarak elde edilmiştir. Şekil 5.15' deki emme ve süzülme eğrilerindeki histeresizin nedeni temas açısı histeresizinden ve akışkan-akışkan arayüzeyindeki konfigürasyonların aynı kalmayışından kaynaklanmaktadır (**Greenkorn, 1983**).

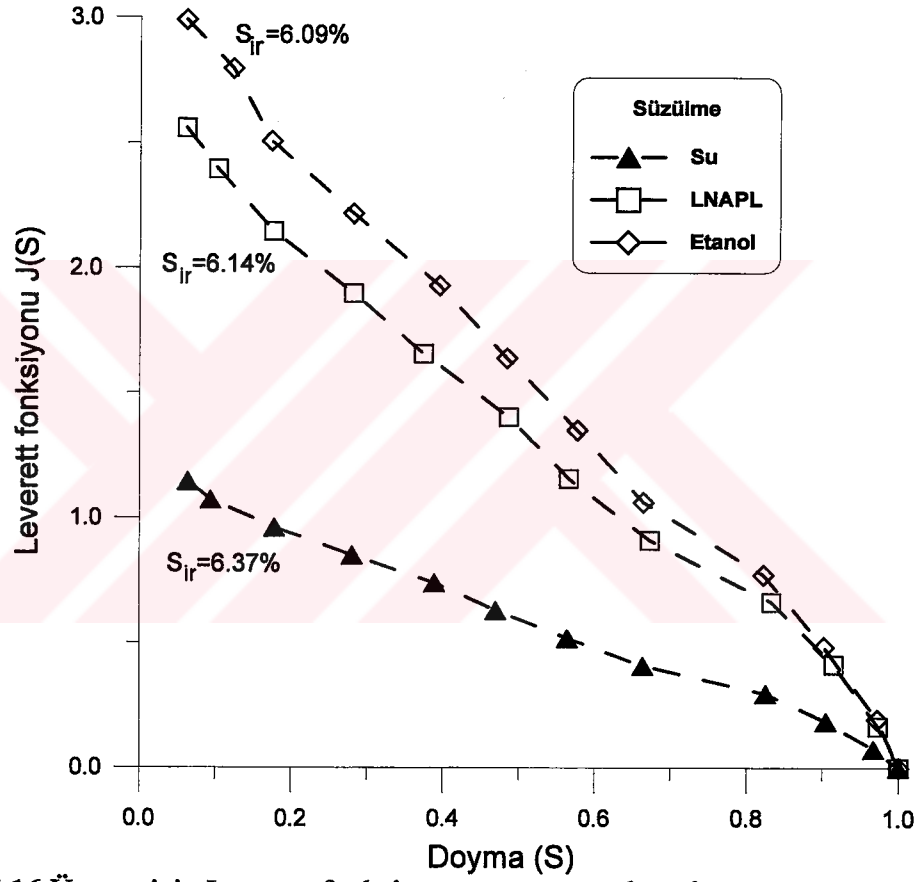


Şekil 5.14 Üç sıvı için yeniden yapılandırılmış Leverett fonksiyonuna göre emme doyması.



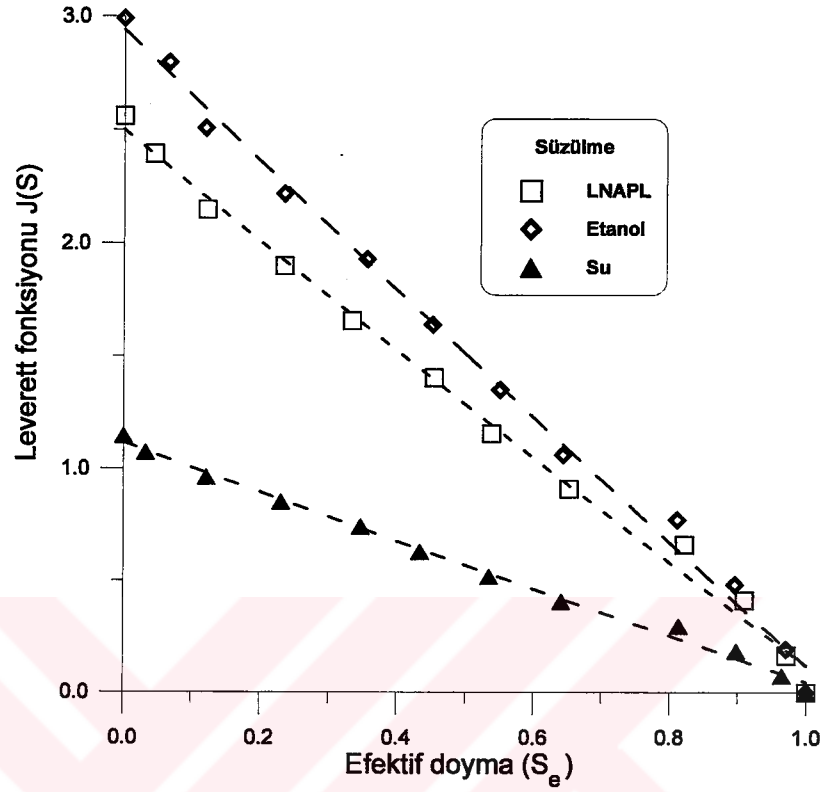
Şekil 5.15 Su için emme ve süzülme doymalarına göre Leverett fonksiyonu.

Leverett fonksiyonunun üç sıvı için süzülme doyma verisine göre eğrileri Şekil 5.16' de gösterildiği gibidir. Bu şekilden görüleceği üzere, emme aşamasındaki durum gibi, Leverett fonksiyonu belli bir sıvı için süzülme deneylerinde kılcal basınç ile doyma arasındaki ilişkinin tanımlanmasında gayet iyi sonuç vermiştir. Ancak, Leverett fonksiyonu üç sıvı için karşılaştırıldığında, emme aşamasında olduğu gibi önemli bir farklılık Şekil 5.16' de görülmektedir. Ayrıca, Şekil 5.16' de her üç sıvı için elde edilmiş olan azaltılamaz doyma değerleri birbirlerine çok yakındır.



Şekil 5.16 Üç sıvı için Leverett fonksiyonuna göre süzülme doyması

Şekil 5.17' de süzülme için Leverett fonksiyonuna göre üç sıvının efektif doymaları görülmektedir. Efektif doyma Denklem (2.18) ile hesaplanmıştır.

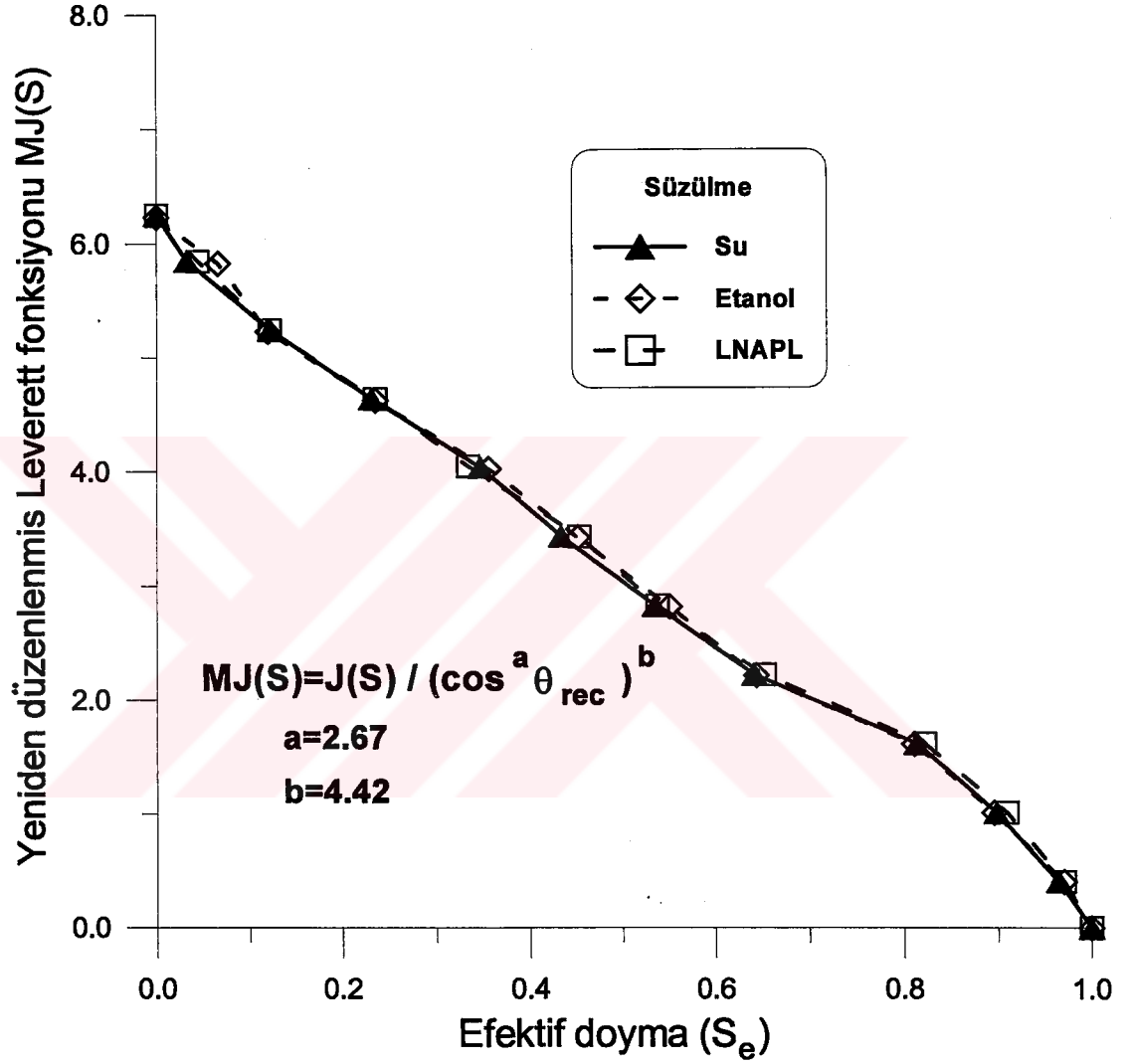


Şekil 5.17 Üç sıvı için Leverett fonksiyonuna göre efektif doyma

Denklem (5.5) de kılcal basınç-emme doyma profillerinin bağdaştırılmasında ilerleme temas açıları kuru bir ortama ilerleyen ıslatan sıvı olarak kullanılmıştır. Ancak, süzülme deneylerinde ıslatan sıvı başlangıçta doymuş olan bir ortamdan geri çekilmektedir. Dolayısıyla, Şekil 5.17' de gösterilen süzülme sonuçlarının bağdaştırılması için geri çekilme temas açıları, θ_R kullanılması daha uygun görülmektedir. Leverett fonksiyonu üç sıvının efektif doyma verilerine göre aşağıdaki gibi yeniden düzenlenmiştir.

$$MJ(S) = \frac{J(S)}{(\cos^a \theta_R)^b} \quad 0 \leq S_e \leq 1 \quad (5.6)$$

Burada; süzülme süreci için $a=2.67$ ve $b=4.42$ şeklinde elde edilmiştir. Üç sıvının efektif doymaları için yeniden düzenlenmiş kılcal basınç fonksiyonu Şekil 5.18' de verilmiştir. Bu şekilden de görüleceği gibi Denklem (5.6) ile verilen korelasyon 3 sıvı için kılcal basınç ve doyma arasında çok iyi bir ilişki sağlamıştır.



Şekil 5.18 Üç sıvı için yeniden düzenlenmiş Leverett fonksiyonuna göre efektif doyma.

5.3. ÜÇ AKIŞKAN İÇEREN GÖZENEKLİ ORTAMDA AKIŞKAN DOYMASI VE AKIŞKANLARIN ORTAM TARAFINDAN TUTULMALARININ İNCELENMESİ

Literatürde üç akışkan içeren gözenekli ortamlar incelenirken iki farklı prosedür kullanılmaktadır. Birinci prosedürde kuru kum ile dolu kolona su emdirilir ve doyma gerçekleştirildikten sonra kolon süzülür. Daha sonra LNAPL için emme ve süzülme işlemleri gerçekleştirilir. İkinci prosedürde ise su dolu kolona kum boşaltılır ve elde edilen doymuş kolon süzülür. Bundan sonraki işlem birinci prosedür ile aynıdır. Bu tez çalışmasında literatürde kullanılan her iki prosedür de, iki ve üç akışkan içeren gözenekli ortamı incelemek üzere gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bundan sonraki bölümlerinde söz konusu deneyler birinci ve ikinci prosedür başlıkları altında anlatılmıştır.

Her iki prosedür için yapılan deneylerde, 50 cm uzunluğundaki cam kolon elekten itibaren 46 cm' ye kadar kum ile doldurulmuştur. Gama ışını zayıflatma ölçümleri 46 cm' lik kolon boyunca 1.5 cm' lik aralıklarla 20 noktadan alınmıştır. Deneylerdeki kum yüksekliği ve ölçüm noktaları Bölüm 5.2 ile aynıdır. Yine aynı şekilde, polietilen rezervuardaki serbest sıvı seviyesi elekten itibaren 15 cm olarak ayarlanmıştır ve bu seviyenin altında ölçüm alınmamıştır. Ayrıca, bu sıvı rezervuarının deneysel aşamalarda yukarı ve aşağı doğru hareket ettirilmesi ile, kum ile dolu kolondaki doyma verilerinin değişimi sağlanmıştır.

5.3.1. Birinci Prosedür İle Yapılan İncelemeler

Bu kısımdaki deneysel aşamalarda, gözenekli ortamda üç akışkan fazı su-LNAPL-hava şeklinde oluşturulmuştur. Gözenekli ortamda üç akışkan sistemi oluşturmak için, başlangıçta suyu süzdürülmüş kolon kullanılmıştır. Bu nedenle kum kolonu öncelikle su ile tamamen doyurulmuştur. Bu koşul, gözenekli ortamın üst kısmında yaklaşık 2-3 cm lik küçük bir gölet oluşuncaya kadar, sıvı rezervuarının yavaşça yükseltilmesi ile sağlanmıştır. Daha sonra su, rezervuar seviyesinin yavaşça indirilmesi ile kolondan süzdürülmüştür. Kolon boyunca belirlenmiş olan 20 ölçüm noktasından, kuru kum, su ile tamamen doymuş kum ve sudan süzdürülmüş kum için gama zayıflatma ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerler vasıtasıyla Denklem (5.4) kullanılarak kum kolonundaki azaltılamaz su doyması belirlenmiştir.

Başlangıçta azaltılamaz su ve hava ihtiva eden gözenekli ortam için akışkan doyma verileri iki aşama için oluşturulmuştur. Bunlar sırasıyla; LNAPL için birincil emme, yerçekimine bağlı süzülme aşamalarıdır. Bu iki aşama için yapılan deneyler Bölüm 5.2.1 deki deneysel prosedürün aynısıdır.

Gözenekli ortamda iki akışkan (LNAPL-hava) ve üç akışkan (su-LNAPL-hava) bulunması halinde, LNAPL' in ortamda tutulma miktarının incelenmesi amacı ile Tablo 5.4 ve Tablo 5.5 düzenlenmiştir. Tablolarda gözönünde bulundurulmuş olan sekiz nokta, kolon boyunca 20 tane olan ölçüm noktalarının ve kolonun orta bölgesine karşılık gelmektedir. Tablo 5.4 ve Tablo 5.5 de gözönünde bulundurulan sekiz noktada süzülme aşamasında iki ve üç akışkanlı sistemler için azaltılamaz ıslatan akışkan nemlilik değerleri verilmektedir.

Tablo 5.4 Süzülme aşaması için iki akışkanlı LNAPL-hava sistemindeki azaltılamaz nemlilik değerleri.

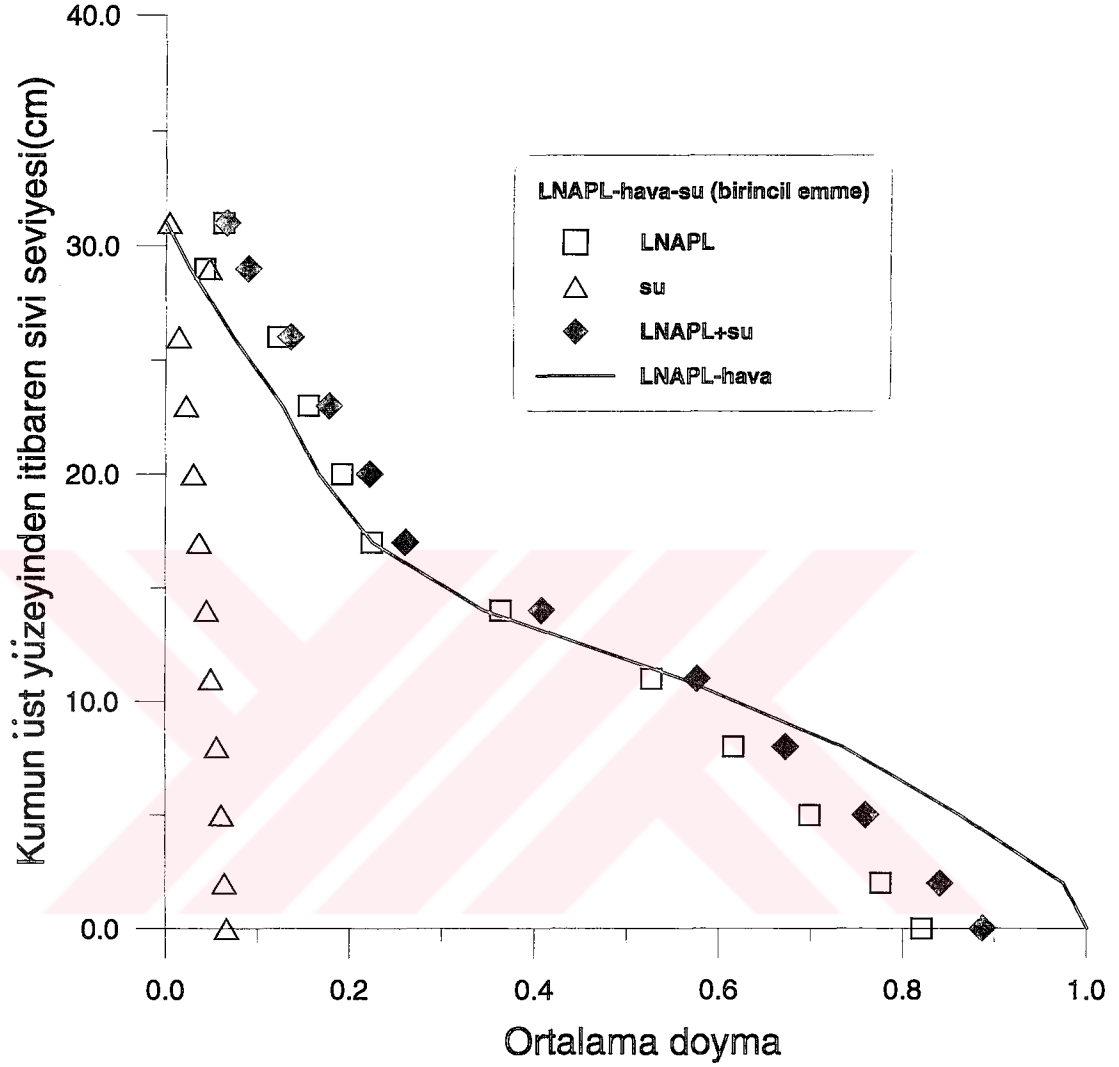
İki Akışkanlı Sistem		
$h(cm)$	ϕ	$N_{LNAPL(ir)}$
36.5	0.341	0.060
35	0.329	0.025
33.5	0.332	0.025
32	0.330	0.026
30.5	0.329	0.006
29	0.330	0.051
27.5	0.333	0.018
26	0.337	0.019
Ortalama	0.332	0.023

Tablo 5.5’ deki $N_{top(ir)}$ değeri, süzölmöş olan üç akışkanlı kolondan alınan gama zayıflatma ölçömleri ile bulunmuştur ve toplam azaltılamaz ıslatan akışkan nemliliğini (su+LNAPL) temsil etmektedir. Tablo 5.4 ve 5.5 karşılaştırıldığında, üç akışkanlı sistemdeki azaltılamaz LNAPL nemliliğinin iki akışkanlı sisteme göre daha yüksek değere sahip olduğu görölmektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda, süzölme aşamasında LNAPL’ in su ile nemli kum üzerindeki tutunumunun kuru kumdaki tutunumuna göre daha fazla olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 5.5 Süzölme aşaması için üç akışkanlı su-LNAPL-hava sistemindeki azaltılamaz nemlilik değeri.

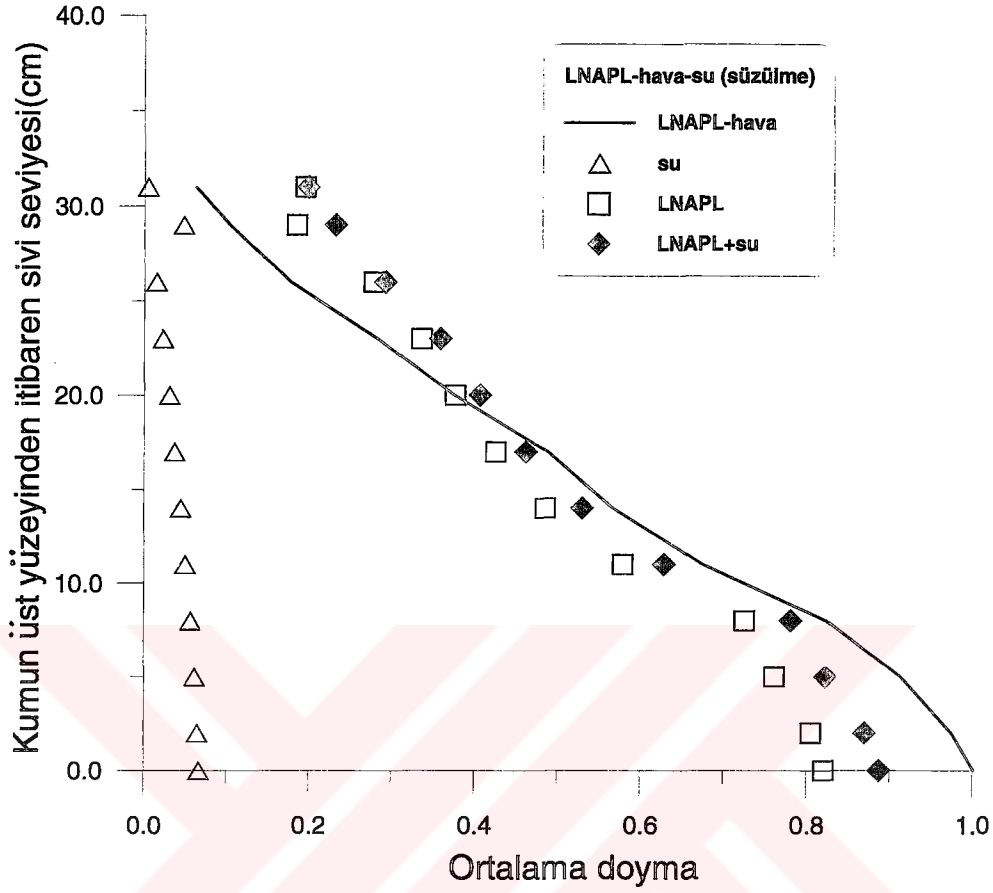
Üç Akışkanlı Sistem				
$h(cm)$	ϕ	$N_{top(ir)}$	$N_{su(ir)}$	$N_{LNAPL(ir)}$
36.5	0.332	0.065	0.025	0.040
35	0.333	0.059	0.021	0.038
33.5	0.339	0.061	0.017	0.044
32	0.336	0.069	0.032	0.037
30.5	0.332	0.064	0.021	0.043
29	0.333	0.060	0.020	0.040
27.5	0.333	0.061	0.023	0.038
26	0.338	0.065	0.024	0.041
Ortalama	0.334	0.062	0.022	0.040

Şekil 5.19’ da birincil emme aşamasında üç akışkanlı su-LNAPL-hava ve iki akışkanlı LNAPL-hava sistemleri için kumun üst yüzeyinden itibaren LNAPL seviyesine bağılı olarak kolon için ortalama doyma eğrileri verilmektedir. Buradaki eğrilerden, iki akışkanlı sistemde tam doymaya ulaşılırken, üç akışkanlı sistem için tam doymaya ulaşılmadığı bir miktar ıslatmayan akışkan (hava) doymasının oluştuğu görölmektedir. Ancak, her iki eğri de aynı karakteristiğe sahiptir.



Şekil 5.19 Birincil emme aşamasında iki ve üç akışkanlı sistem için doyma eğrileri.

Şekil 5.20' de süzülme aşamasında, üç akışkanlı su-LNAPL-hava ve iki akışkanlı LNAPL-hava sistemleri için kumun üst yüzeyinden itibaren LNAPL seviyesine bağlı olarak kolon için ortalama doyma eğrileri verilmektedir. Bu eğrilerde, azaltılamaz akışkan doymalarının iki akışkanlı sistem için yaklaşık %7, üç akışkanlı sistem için yaklaşık %20 olduğu görülmektedir. Bu aşamadaki eğri karakteristikleri de birbirleri ile aynıdır.



Şekil 5.20 Süzülme aşamasındaki iki ve üç akışkanlı sistem için doyma eğrileri.

Üç akışkanlı bir sistemde, bir NAPL' in su-hava arayüzündeki yayılma eğilimi yayılma katsayısı, C_s ile belirlenebilmektedir.

$$C_s = \sigma_{wn} - (\sigma_{ni} + \sigma_{iw}) \quad (5.7)$$

Burada; σ_{wn} ıslatan ve ıslatmayan akışkan arasındaki yüzey gerilimi, σ_{ni} ıslatmayan ve orta ıslatan akışkan arasındaki yüzey gerilimini ve σ_{iw} ise orta ıslatan ve ıslatan akışkan arasındaki yüzey gerilimini ifade etmektedir.

Ayrıca, NAPL' in suyun üzerine yayılma eğilimi bu katsayı ile orantılıdır. Örneğin, bir NAPL' in pozitif yayılma katsayısına sahip oluşu, bu NAPL' in suyun üzerine yayılma eğiliminde olduğunu ve sürekli bir film şeklinde form alacağını

göstermektedir. Öte yandan negatif yayılma katsayısına sahip bir NAPL' in ise su üzerinde sürekli film şeklinde yayılma eğilimi göstermediği, topaklaşma eğiliminde olduğu bilinmektedir (Bradford ve Leij, 1997).

Bu çalışmada kullanılan LNAPL için yayılma katsayısı, $C_s = 0.0095 \text{ N/m}$ bulunmuştur. Denklem (5.7) de yer alan LNAPL ve suyun hava ile arasındaki yüzey gerilimleri Tablo 4.3 de verilmiştir, LNAPL ile su arasındaki yüzey gerilimi ise 0.035 N/m dir. Sonuç olarak, kullanılan LNAPL pozitif bir yayılma katsayısına sahiptir ve dolayısıyla su üzerinde yayılma eğilimi vardır. Bu durum, Şekil 5.19 ve Şekil 5.20 de iki ve üç akışkanlı sistem için doyma eğrilerinin aynı karakteristiğe sahip olması ile de ortaya çıkmaktadır. LNAPL topaklaşma eğilimi gösterdiği takdirde eğri karakteristiklerinde de farklılık olması beklenmektedir. Ayrıca, Şekil 5.20 de görüldüğü gibi azaltılamaz LNAPL doyması üç akışkanlı sistemde, yani su ile nemlenmiş ortamda kuru kuma göre daha büyüktür. Yani, nemli ortamda LNAPL daha fazla tutulmuştur. Bu sonuç pozitif yayılma katsayısına sahip bir NAPL' in genel karakteristiğini yansıtmaktadır.

5.3.2. İkinci Prosedür İle Yapılan İncelemeler

Bu kısımdaki deneysel prosedürde kum önceden sıvı ile doldurulmuş olan cam kolona dökülmekte ve akışkan nemlilik değerleri elde edilmektedir. Dolayısıyla, iki akışkanlı LNAPL-hava ve üç akışkanlı su-LNAPL-hava sistemleri bu deneysel prosedür kullanılarak incelenmiştir.

5.3.2.1. İkinci Prosedür İçin Kullanılan Teorik Altyapı

Bu prosedürün kullanılmasıyla gözenekli ortama ait yerel hacimsel yoğunluk, ρ_d değerleri de elde edilebilmektedir. m bileşenli ($i = 1, m$) bir sistem için gama ışını zayıflatmasına dair eşitlik aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$I = I_0 \exp\left(\sum_{i=1}^m -\mu_i N_i x\right) \quad (5.8)$$

Burada; N_i i bileşeni için hacimsel nemlilikdir. Denklem (5.8) deki i bileşenleri çalışmanın bundan sonraki bölümlerinde katı (alt indis s), su (alt indis su), LNAPL

(alt indis $LNAPL$) ve sıvı (alt indis l) şeklinde ifade edilecektir. Gama ışını zayıflatması için gaz (hava) fazının etkisi ihmal edilmiştir.

(a) Gözenekli ortam için gözeneklilik ve hacimsel yoğunluğun belirlenmesi; Sadece sıvıyla dolu bir kolon için zayıflatma denklemi aşağıdaki gibidir.

$$I_{sd} = I_0 \exp(-\mu_l x) \quad (5.9)$$

Burada; I_{sd} sadece sıvıyla dolu kolonu geçen radyasyon şiddetidir. İçi sıvı dolu kolona kumun doldurulmasından sonra, sıvıya doymuş gözenekli ortam içeren kolon için radyasyon şiddeti, I_{ss} elde edilebilmektedir. Lineer zayıflatma katsayıları ve hacimsel nemlilik değerlerine bağlı olarak, radyasyon zayıflatma denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir (Oostrom ve diğerleri, 1998).

$$I_{ss} = I_0 \exp(-\mu_s N_s x - \mu_l \phi x) \quad (5.10)$$

Burada; N_s katı kesrini ifade etmektedir ve aşağıdaki gibi aşağıdaki gibi yoğunluğa bağlı olarak yazılabilmektedir.

$$N_s = \rho_d / \rho_p \quad (5.11)$$

Burada; ρ_p gözenekli ortamın parçacık yoğunluğudur ve piknometre veya su taşıma yöntemi ile belirlenebilir (Oostrom ve diğerleri, 1998). Doymuş gözenekli ortam için aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$N_s + \phi = 1 \quad (5.12)$$

Denklem (5.10) de ϕ yerine $1 - N_s$ yazarak, Denklem (5.9) ve (5.10) in kullanılmasıyla hacimsel katı kesri, N_s aşağıdaki gibi elde edilebilmektedir.

$$N_s = \frac{\ln(I_{sd}/I_{ss})}{x(\mu_s - \mu_l)} \quad (5.13)$$

Gama zayıflatma ölçüm değerleri ve lineer zayıflatma katsayıları kullanılarak Denklem (5.13) ile katı kesri bulunduktan sonra, hacimsel yoğunluk ve gözeneklilik değerleri Denklem (5.11) ve (5.12) kullanılarak hesaplanabilir.

(b) İki akışkanlı sistemde sıvı nemliliğinin belirlenmesi; Doymamış koşullar için, zayıflatma eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$I_{sh} = I_0 \exp(-\mu_s N_s x - \mu_l N_l x) \quad (5.14)$$

Burada; I_{sh} sıvı ve hava içeren doymamış kolonu geçen radyasyon şiddetini ifade etmektedir. Doymamış gözenekli bir ortam için gözeneklilik aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$N_l + N_{hava} = \phi \quad (5.15)$$

Burada; N_{hava} hava nemliliği ifade etmektedir. Denklem (5.15) de N_l yerine $\phi - N_{hava}$ yazarak, Denklem (5.10) ve (5.14) in kullanılmasıyla hava nemliliği değeri aşağıdaki gibi elde edilebilmektedir.

$$N_{hava} = \frac{\ln(I_{sh}/I_{ss})}{\mu_l x} \quad (5.16)$$

Daha sonra, sıvı nemliliği değerleri de $N_l = \phi - N_{hava}$ kullanılarak hesaplanabilir.

(c) Üç akışkanlı sistemde su ve LNAPL nemliliklerinin belirlenmesi; Üç akışkanlı sistemlerde gözenek uzayı genellikle su, LNAPL ve hava ile paylaşılmakta ve gözeneklilik de aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$N_{su} + N_{LNAPL} + N_{hava} = \phi \quad (5.17)$$

Toplam sıvı nemliliği, $N_{top} = N_{su} + N_{LNAPL}$ olmak üzere Denklem 5.17 aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir (Schroth ve diğerleri, 1998).

$$N_{top} + N_{hava} = \phi \quad (5.18)$$

Aşağıdaki eşitlik üç akışkan (su, LNAPL, hava) içeren gözenekli bir ortamı geçen gama ışını zayıflatma denklemidir.

$$I_{top} = I_0 \exp(-\mu_s N_s x - \mu_{su} N_{su} x - \mu_{LNAPL} N_{LNAPL} x) \quad (5.19)$$

Burada; I_{top} su, LNAPL ve hava içeren doymamış kolonu geçen radyasyon şiddetini ifade etmektedir. Gözenekli ortamın hacimsel yoğunluğunun zamanla değişmediği varsayılırsa Denklem (5.19) aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir (Lenhard ve diğerleri, 1988).

$$I_{top} = I_s \exp(-\mu_{su} N_{su} x - \mu_{LNAPL} N_{LNAPL} x) \quad (5.20)$$

Burada; $I_s = I_0 \exp(-\mu_s N_s x)$ dir. Denklem (5.21) in N_{LNAPL} için çözülmesi ile aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir.

$$N_{LNAPL} = \frac{\ln(I_s / I_{top})}{\mu_{LNAPL} x} - N_{su} \frac{\mu_{su}}{\mu_{LNAPL}} \quad (5.21)$$

Alan kapasitesi, genellikle aşağı doğru yerçekimi süzülmesinin bitiminden sonra kumun birim hacmindeki sıvı nemliliği değeri olarak ifade edilmektedir. Doymamış akış için alan kapasitesi ifadesi, azaltılamaz ıslatan akışkan nemliliği, N_{wo} ifadesi ile aynıdır. Alan kapasitesi değerinin tamamlayıcısı olan doymuş bir kumun birim hacminden süzölmüş akışkanın hacmi, efektif gözeneklilik olarak adlandırılmaktadır. Efektif gözeneklilik, ϕ_e aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir (Bear, 1979).

$$\phi_e = \phi - N_{wo} \quad (5.22)$$

5.3.2.2. İki ve Üç Akışkan İçeren Gözenekli Ortam İçin Deneylerin Yapılışları

Bu prosedür için deneyler iki akışkanlı LNAPL-hava ve üç akışkanlı su-LNAPL-hava sistemleri için yapılmıştır.

(a) İki akışkanlı sistem;

Bu bölümde, gözenekli ortamdaki iki akışkanlı LNAPL-hava deneyleri birincil süzölme ve emme aşamaları için yapılmıştır. Öncelikle, sıvı rezervuarı yavaşça yükseltilerek kolonun LNAPL ile dolması sağlanmıştır. Daha sonra, kum LNAPL ile dolu kolona dökülmüştür. Kumun LNAPL ile dolu kolona dökülmesiyle kolon içerisinde hava kabarcıklarının hapsolmaması sağlanmıştır. Kolon, LNAPL in doymuş kumun birkaç santimetre üzerinde olacak şekilde hazırlanmıştır. Dolum aşamasından sonra, hacimsel yoğunluk ve gözeneklilik değerlerinin ölçülmesi için 20 ölçüm noktasından gama ışını zayıflatma ölçümleri alınmıştır. 20 noktadaki hacimsel

yoğunluk ve gözeneklilik değeri Denklem (5.11), (5.12) ve (5.13) kullanılarak elde edilmiştir.

Daha sonra, sıvı rezervuarı Bölüm 5.2.1 de olduğu gibi rezervuardaki sıvı seviyesi elekten itibaren 15 cm oluncaya kadar 4cm/saat lik hızla yavaşça aşağı doğru indirilmiştir. Emme süreci içinde, sıvı rezervuarı aynı şekilde 4cm/saat lik hızla sıvının kum yüzeyinin birkaç santimetre üzerinde gölet oluşuncaya kadar yükseltilmiştir.

Emme ve süzülme süreçleri boyunca, gama ışını zayıflatma ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler vasıtasıyla Denklem (5.15) ve (5.16) kullanılarak LNAPL nemliliği ve hava içeriği değerleri elde edilmiştir. Sıvı rezervuarının süzülme ve emme aşamaları için son yüksekliklerine getirildikten sonra, kolon birer gece bekletilmiştir. Bu periyodun sonunda, sırasıyla azaltılamaz LNAPL nemliliği ve artık ıslatmayan akışkan (hava) nemliliği, N_{hava} değerlerini elde etmek amacıyla kolon boyunca gama ışını zayıflatma ölçümleri tekrarlanmıştır.

(b) Üç akışkanlı sistem;

Bu bölümde, üç akışkanlı su-LNAPL-hava sistemi için yapılan deneyler, sabit miktarda su içeren kumda LNAPL emmesi ve süzülmesi olarak iki kısımda yapılmıştır. Bu nedenle, kolon öncelikle su ile doldurulmuştur ve ardından kum dökülmüştür. Dolumdan sonra, hacimsel yoğunluk ve gözeneklilik değerleri gama ışını zayıflatma ölçümleri kullanılarak elde edilmiştir. Daha sonra, su süzdürülmüştür ve 20 ölçüm noktası için azaltılamaz su nemlilikleri, $N_{su(ir)}$ gama ışını zayıflatma ölçümleri vasıtasıyla Denklem (5.15) ve (5.16) kullanılarak elde edilmiştir. Ölçümlerden hemen sonra, LNAPL sıvı rezervuarının 4cm/saat lik hızla yükseltilmesiyle su ile nemli kolona emdirilmiştir. Ardından LNAPL in süzülme süreci de sıvı rezervuarındaki seviyesi elekten itibaren 15 cm oluncaya kadar 4 cm/h luk oranla aşağı doğru indirilmiştir. Bu süreçler boyunca, LNAPL nemlilikleri gama ışını zayıflatma ölçümleri alınarak Denklem (5.21) vasıtasıyla elde edilmiştir.

5.3.2.3. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bölüm 5.3.1 de olduğu gibi sekiz nokta için gözenekli ortamda iki akışkan (LNAPL-hava) ve üç akışkan (su-LNAPL-hava) bulunması halinde, LNAPL in ortamda tutulma miktarının incelenmesi amacıyla Tablo 5.6 ve Tablo 5.7 düzenlenmiştir.

Tablo 5.6 İki akışkanlı LNAPL-hava sistemi için gözenekli ortamda tutunum.

İki Akışkanlı Sistem				
$h(cm)$	$\rho_d(g/cm^3)$	ϕ	$N_{LNAPL(ir)}$	N_{hava}
36.5	1.866	0.338	0.019	0.033
35	1.872	0.336	0.018	0.030
33.5	1.878	0.334	0.024	0.031
32	1.892	0.329	0.020	0.036
30.5	1.864	0.339	0.023	0.042
29	1.872	0.336	0.028	0.034
27	1.883	0.332	0.022	0.037
26	1.883	0.332	0.027	0.030
Ortalama	1.876	0.334	0.022	0.034

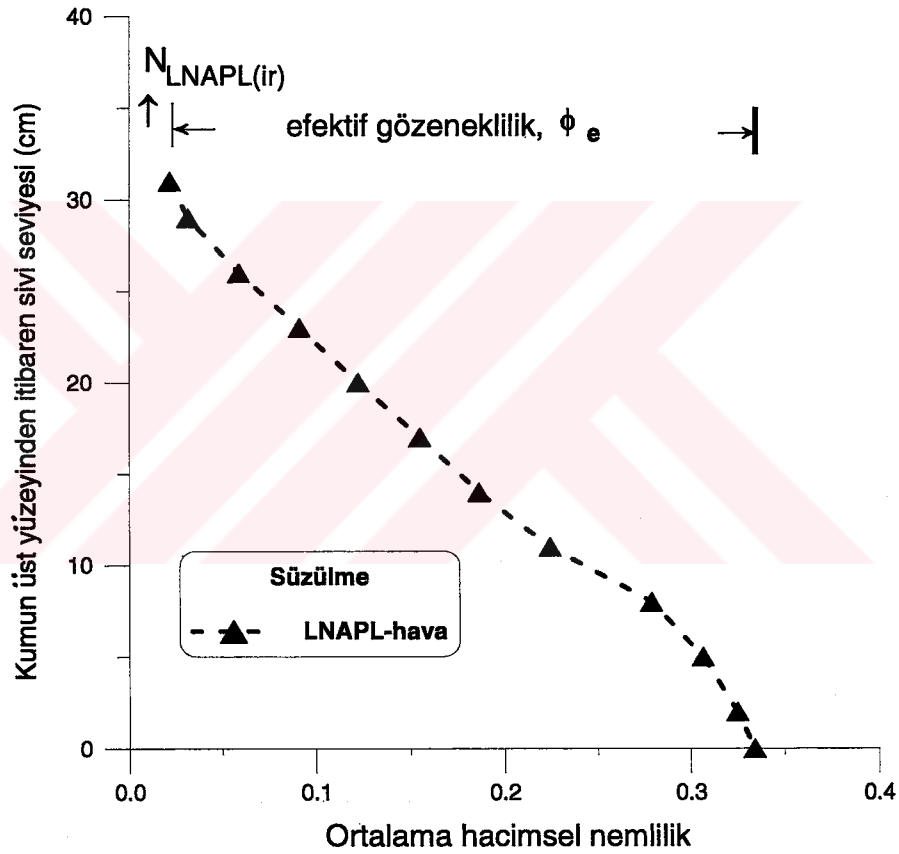
Tablo 5.6 ve Tablo 5.7 de iki ve üç akışkanlı sistemler için hacimsel yoğunluk ve gözeneklilik değerleri verilmektedir. Bunun yanı sıra, iki akışkanlı sistem için Tablo 5.6, LNAPL in süzülmesinden sonra elde edilen azaltılamaz LNAPL nemlilikleri, $N_{LNAPL(ir)}$ ve LNAPL emmesinden sonra elde edilen artık ıslatmayan akışkan (hava) nemliliği, N_{hava} değerlerini de içermektedir. Üç akışkanlı sistem için Tablo 5.7, suyun süzdürülmesinden sonra elde edilen azaltılamaz su nemlilikleri, $N_{su(ir)}$, LNAPL emmesinden sonra elde edilen artık ıslatmayan akışkan (hava) nemliliği, N_{hava} ve LNAPL in süzülmesinden sonra elde edilen azaltılamaz LNAPL, $N_{LNAPL(ir)}$ ve azaltılamaz toplam sıvı nemlilikleri, $N_{top(ir)}$ görülmektedir.

Tablo 5.7 Üç akışkanlı su-LNAPL-hava sistemi için gözenekli ortamda tutunum.

Üç Akışkanlı Sistem						
$h(cm)$	$\rho_d(g/cm^3)$	ϕ	$N_{su(ir)}$	$N_{LNAPL(ir)}$	$N_{top(ir)}$	N_{hava}
36.5	1.878	0.334	0.024	0.032	0.056	0.040
35	1.880	0.333	0.023	0.035	0.058	0.035
33.5	1.866	0.338	0.023	0.037	0.061	0.036
32	1.883	0.332	0.027	0.027	0.054	0.029
30.5	1.869	0.337	0.031	0.028	0.060	0.036
29	1.883	0.332	0.023	0.028	0.051	0.038
27.5	1.864	0.339	0.026	0.033	0.059	0.030
26	1.875	0.335	0.032	0.027	0.059	0.038
Ortalama	1.874	0.335	0.026	0.030	0.057	0.035

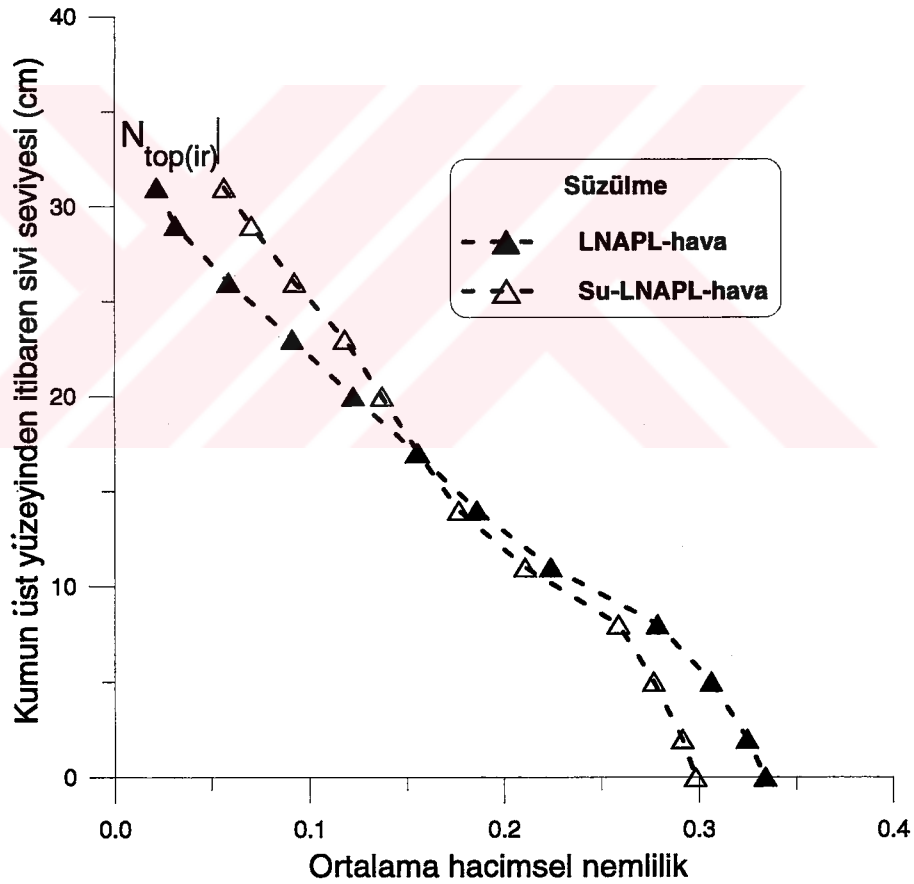
Tablo 5.6 ve Tablo 5.7 deki değerlerden görüleceği üzere, üç akışkanlı sistemdeki azaltılamaz LNAPL nemliliği iki akışkanlı sistemdekine nazaran daha yüksek değere sahiptir. Bu sonuçlar doğrultusunda, Bölüm 5.3.1 de olduğu gibi süzülme aşamasında LNAPL' in su ile nemli kum üzerindeki tutunumunun kuru kumdaki tutunumuna göre daha fazla olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 5.21 de birincil süzülme aşamasında iki akışkanlı LNAPL-hava sistemi için kumun üst yüzeyinden itibaren LNAPL seviyesine bağlı olarak kolon için ortalama hacimsel nemlilik eğrisi verilmektedir. Eğri üzerindeki her bir nokta, akışkan hareketinin olmadığı bir denge durumunu ifade etmektedir. Ayrıca, kum kolonunun ortalama hacimsel sıvı nemliliği, belli bir zamanda 20 ölçüm noktasının ortalamasıdır. Şekil 5.21 de görüldüğü gibi alan kapasitesi, $N_{LNAPL(ir)}$ 0.021 olarak bulunmuştur. Bu değere bağlı olarak, Denklem (5.22) kullanımıyla da efektif doyma değeri de 0.312 olarak bulunmuştur.



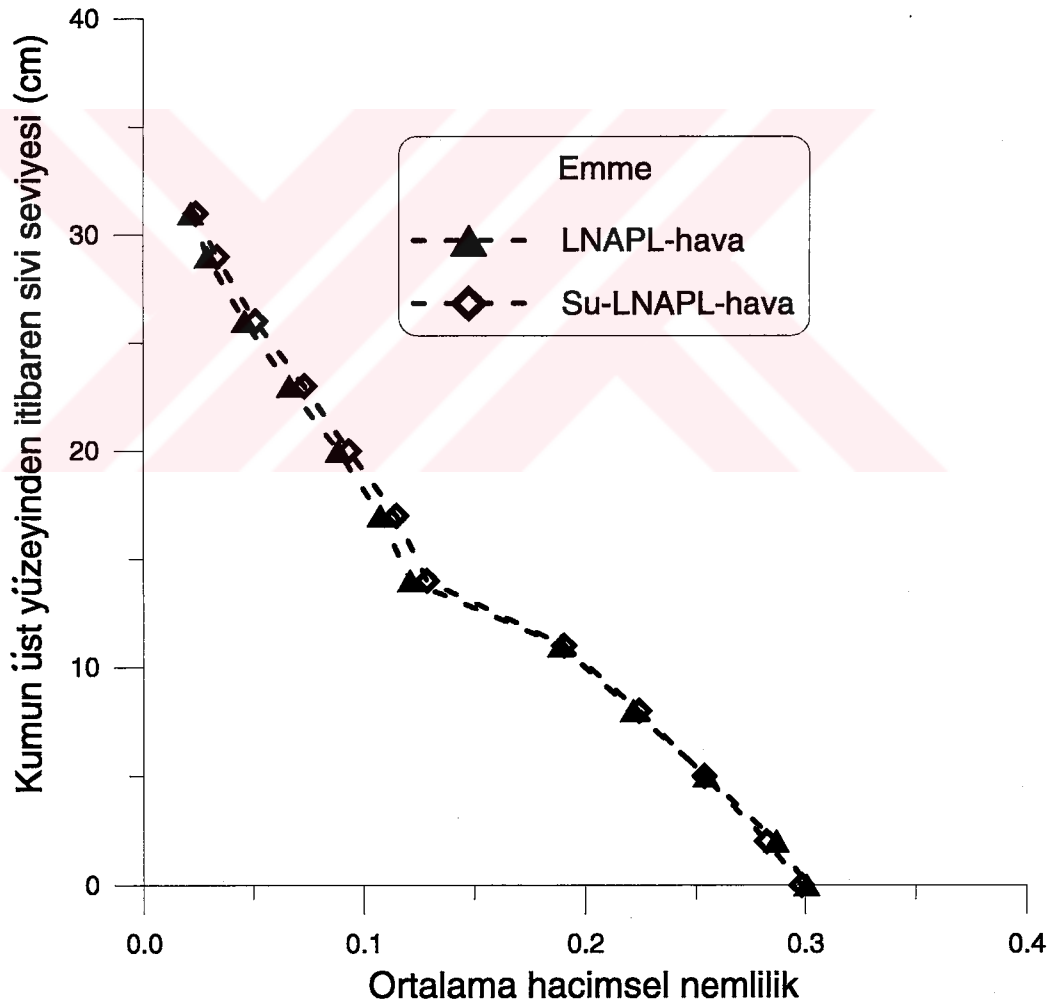
Şekil 5.21 Süzülme aşamasında iki akışkanlı LNAPL-hava sistemi için hacimsel nemlilik eğrisi.

Şekil 5.22 de üç akışkanlı su-LNAPL-hava sistemi için, sabit su nemlilik değerine sahip ($N_{su(ir)}=0.023$) kolondan LNAPL in süzülmesi sürecindeki ortalama toplam sıvı nemlilik eğrisi verilmektedir. Karşılaştırma için iki akışkanlı LNAPL-hava sistemindeki LNAPL süzülme nemlilik eğrisi de Şekil 5.22 ye dahil edilmiştir. Şekil 5.22 de görüldüğü gibi, iki ve üç akışkanlı sistemler için hacimsel sıvı nemlilik eğrileri aynı karakteristiği göstermektedirler ve bu sonuç doğrultusunda LNAPL in suyu ve katıyı aynı şekilde ıslattığı anlaşılmaktadır. Kullanılan LNAPL in pozitif yayılma katsayısına, $C_s = 0.0095 \text{ N/m}$ sahip olmasından dolayı LNAPL in su üzerinde sürekli bir film şeklinde yayılma eğilimi göstermektedir. Dolayısıyla, Şekil 5.22 deki hacimsel sıvı nemlilikleri arasındaki gibi bir ilişki beklenmektedir. Ayrıca, üç akışkanlı sistem için alan kapasitesi, $N_{top(ir)} = 0.056$ olarak bulunmuştur.



Şekil 5.22 Süzülme aşamasında iki ve üç akışkanlı sistem için hacimsel nemlilik eğrileri.

Şekil 5.23 de üç akışkanlı su-LNAPL-hava sistemi için, sabit su nemlilik değerine sahip kolona LNAPL emmesi sürecindeki ortalama toplam sıvı nemlilik eğrisi verilmektedir. Yine karşılaştırma yapmak amacıyla, iki akışkanlı LNAPL-hava sistemindeki LNAPL emme eğrisi de Şekil 5.23 de dahil edilmiştir. Şekil 5.23 de görüldüğü gibi hacimsel toplam nemlilik eğrisi LNAPL nemlilik eğrisine çok yakındır. Bu süreçteki deneylerde, LNAPL in sıvı ile nemli kuma emdirilmesi sonucunda bir miktar havanın ortamda hapsolması beklenen bir durumdur. Bu artık ıslatmayan akışkan (hava) nemlilik değerleri iki ve üç akışkanlı sistemler için sırasıyla 0.033 ve 0.036 olarak bulunmuştur. Bu değerlerin birbirlerine olan yakınlığı Şekil 5.23 de de görülmektedir.



Şekil 5.23 Emme aşamasında iki ve üç akışkanlı sistem için hacimsel nemlilik eğrileri.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Günlük yaşamımızda karşılaştığımız doğal ve yapay maddelerin büyük bir kısmı gözeneklidir. Bu nedenle mühendislikten tıbbı kadar geniş bir sahada yapılan çalışmalarda, problemler gerçek modellere yaklaşmak amacı ile gözenekli ortamlar kullanılarak incelenmektedir. Gözenekli ortamların çeşitli özelliklerinin bilhassa gözenekli ortamda akış parametrelerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisi gama ışını zayıflatma tekniğidir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında da gözenekli ortam özellikleri ^{60}Co (1332 keV) gama kaynağı ve dar demet geometrisi kullanılarak saptanmıştır. Gözenekli ortam, temiz, ayrık tane yapılı ve taneleri birbirine yapışma eğilimi göstermeyen C778 Ottawa kumu, 9.3 cm iç çapındaki bir cam kolona yerleştirilerek oluşturulmuştur. Sıvı olarak suyun yanısıra, endüstride yaygın olarak kullanılan etanol ve bir LNAPL olan toluen seçilmiştir.

Bu çalışmada amaç, gözenekli ortamın seçilen sıvılara karşı gösterdiği doyma özelliklerinin ve gözenekli ortamda çok fazlı akış için önemli olan kılcal basınç-doyma ilişkisinin incelenmesidir. Özellikle gözenekli ortamda akışkan doyması saptanırken, iki akışkanlı (sıvı-hava) ve üç akışkanlı (su-LNAPL-hava) sistemlerde deneyler gerçekleştirilmiştir. Gözenekli ortama ait gözeneklilik ve akışkan doyması değerleri kolon boyunca yapılan gama ışını zayıflatma ölçümleri ile saptanmıştır. Söz konusu amaçlara yönelik olarak yapılan deneysel çalışmalarda, deneyler birincil emme, yerçekimine bağlı süzülme ve ikincil emme aşamalarında gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmalar, iki akışkanlı sistemde gözenekli ortamın doyma özelliklerinin incelenmesi, yine iki akışkanlı sistemde kılcal-basınç-doyma ilişkisinin incelenmesi ve üç akışkanlı sistemde gözenekli ortamın LNAPL doyması ve tutunumunun saptanması şeklinde gruplandırılmıştır.

İlk grupta yer alan deneysel çalışmalarda, gözenekli ortamda su, etanol ve LNAPL in kılcal kuvvetlerin etkisi ile zamana bağlı olarak yükselmesi beklenmiş, daha sonra süzülme ve ikincil doyma aşamaları yine zamana bağlı olarak izlenmiştir. Kum dolu kolonda kılcallık yolu ile su 28.5 cm, LNAPL 27 cm ve etanol 24.6 cm yükselmiştir. Bu seviyelerden sonra gözenekli ortamda sıvılar yükselmese bile doymanın zamanla arttığı gözlenmiştir. Gama zayıflatma ölçümleri ile kum dolu kolona ait gözeneklilik ve doyma değerleri bulunmuştur. Doyma ve nemlilik her sıvı için zamana ve konuma bağlı olarak incelenmiştir. Sonuçlar yoğunluğu fazla olan sıvının gözenekli ortamda daha çok tutunduğunu ve kılcallıkla kolonda daha çok yükseldiğini göstermiştir. Kuru kum ve doymuş kum ölçümleri kullanılarak ortamın gözenekliliği 0.33 olarak bulunmuştur. Kılcal kuvvetlerin etkisi ile sıvının kolonda yükselmesine izin verildiği için doğal olarak kolonun alt kısmında doyma hızlı oluşmaktadır. Kolonun alt kısmının tamamen doyduğu bir anda kolonun üst kısmındaki kumun doyma değerleri hayli düşük olabilmektedir.

İkinci grupta yer alan çalışmalarda, gözenekli ortam su, etanol ve LNAPL için birincil emme ve süzülme aşamalarında kılcal basınç ve doyma arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Göz önünde bulundurulan deneysel aşamalarda, sıvı rezervuarı 4 cm/saat lik hızla aşağı ve yukarı doğru hareket ettirilerek kum ile dolu kolondaki kılcal basınç ve doyma verilerinin değişimi sağlanmıştır. Kum ile dolu kolona ait doyma ve gözeneklilik verileri gama zayıflatma ölçümleri ile elde edilmiştir. Kılcal basınç verilerinin elde edilmesi için de boyutsuz kılcal basınç fonksiyonu olan Leverett fonksiyonu kullanılmıştır. Ayrıca, Leverett fonksiyonunda yer alan geçirgenlik bilgisi Carman-Ergun (C-E) bağıntısı vasıtasıyla teorik olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, birincil emme ve süzülme aşamalarındaki doyma verilerine göre Leverett fonksiyonu, her bir sıvı ayrı ayrı ele alındığında kılcal basınç ile doyma arasındaki ilişkinin tanımlanmasında çok iyi sonuç vermiştir. Ancak, her üç sıvı için Leverett fonksiyonu karşılaştırıldığında, önemli bir farklılık açıkça görülmüştür. Bu nedenle, üç sıvıya ait eğriler arasındaki

farklılığı temel bir eğriye indirgemek amacıyla Leverett fonksiyonunda temas açısı terimi kullanılmıştır. Temas açısı bilgileri de deneylerde kullanılan silika kumuyla aynı silisyum dioksit kompozisyonuna sahip cam küreler kullanılarak, her üç sıvı için ilerleme ve geri çekilme temas açıları için, fotoğraf çekimi vasıtasıyla deneysel olarak elde edilmiştir. Birincil emme aşamasındaki kılcal basınç ile doyma verilerinin bağdaştırılmasında Leverett fonksiyonu ilerleme temas açıları kullanılarak düzenlenirken, süzülme aşaması için Leverett fonksiyonu geri çekilme temas açıları kullanılarak yeniden düzenlenmiştir. Sonuçlarda birincil emme ve süzülme aşamaları için geliştirilmiş olan korelasyonların üç sıvı için kılcal basınç ile doyma arasındaki ilişkinin bağdaştırılmasında çok iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Üçüncü grupta yer alan deneysel çalışmalarda, gözenekli ortamda üç akışkan bulunması durumunda LNAPL doyması ve tutunumu iki farklı prosedür kullanılarak incelenmiştir. İlk prosedürde gama ışını zayıflatma tekniği ile birincil emme ve süzülme aşamalarında elde edilen doyma verileri, Bölüm 5.2’de yer alan deneylerde kullanılmış olan deneysel prosedürün aynısı kullanılarak elde edilmiştir. Diğer deneysel prosedürde ise gözenekli ortamdaki akışkan nemlilik verileri elde edilmiştir. Bu prosedürü ilk prosedürden ayıran en önemli özellik, kumun önceden sıvı ile dolu cam kolona doldurulmuş olmasıdır. Ayrıca, ilk prosedürde gözenekli ortama ait gözeneklilik verileri elde edilirken, diğer prosedürde gözenekli ortamın gözeneklilik verilerinin yanısıra hacimsel yoğunluk verileri de elde edilmiştir. Her iki prosedür kullanılarak yapılan ölçümler sonucunda elde edilen gözenekli ortamın gözeneklilik değeri aynı şekilde 0.33 olarak bulunmuştur. İkinci prosedür kullanılarak elde edilen ortamın hacimsel yoğunluğu ise 1.87 g/cm^3 olarak bulunmuştur.

Her iki prosedür için de ölçüm noktaları aynıdır ve bu ölçüm noktalarının ve kolonun ortasına tekabül eden kısımda akışkan tutunumları incelenmiştir. Her iki prosedür için de yapılan incelemeler sonucunda, LNAPL in su ile ıslak kumda daha çok tutulduğu görülmüştür. Bunun yanısıra, emme ve süzülme aşamalarında iki ve üç akışkanlı sistemler için, ilk prosedür kullanılarak doyma eğrileri diğer prosedür kullanılarak da nemlilik eğrileri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalardan elde edilen sonuçlar doğrultusunda iki ve üç akışkanlı sistemler için doyma ve nemlilik eğrileri aynı karakteristiği göstermişlerdir. Bu durumun, çalışmada kullanılan LNAPL için

yayılma katsayısının pozitif olması nedeniyle elde edildiği sonucuna varılmıştır. Çünkü, deneysel süreçlerde elde edilen veriler ve eğriler, pozitif yayılma katsayısına sahip olan LNAPL in su ile ıslak kumun ve kuru kumun üzerinde sürekli bir film şeklinde form alarak ıslattığı sonucunu göstermiştir.

Sonuç olarak bu yüksek lisans tez çalışmasında, gözenekli bir ortamda yerçekimine ve kılcal kuvvetlere bağı akış özellikleri gama ışını zayıflatma tekniğı kullanılarak saptanmıştır. Bu çalışma, hem gözenekli ortamda akışkan akışının bir nükleer teknik ile incelenmesine örnek teşkil etmekte hem de toprağı temsil eden bir gözenekli ortamda çevre kirliliğine yol açan sıvıların ortamda ilerlemesi ve tutulmalarının incelenmesi açısından çevreye yönelik sonuçlar içermektedir.



KAYNAKLAR

- Baldha, G.J., Raval, D.A., Subbarao, M.V., and Kulkarni, R.G., 1997.** Attenuation coefficients of various gama radiations by solutions of cobalt sulphate, *Appl. Radiat. Isot.*, **48**, 1121-1124.
- Bear, J., 1979.** Hydraulics of groundwater, McGraw- Hill, New York.
- Bear, J. and Bachmat, Y., 1990.** Introduction to modelling of transport phenomena in porous media, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands.
- Bradford, S. A. and Leij, F. J., 1997.** Estimating interfacial areas for multi-fluid soil systems, *J. Contaminant Hydrology*, **27**, 83-105.
- Collins, E., Çeviri: Tuncay Saydam, 1973.** Akışkanların gözenekli ortamlardaki akışı, Çağlayan Basımevi.
- Çengel, A. Y. and Turner, R. H., 2001.** Fundamentals of thermal-fluid sciences, McGraw-Hill International Edition Mechanical Series, New York.
- Demond, A. H. and Roberts, P. V., 1991.** Effect of interfacial forces on two-phase capillary pressure-saturation relationships, *Water Resources Research*, **27(3)**, 423-437.
- Demond, A. H., Desai, F. N., and Hayes, K. F., 1994.** Effect of cationic surfactants on organic liquid-water capillary pressure-saturation relationships, *Water Resources Research*, **30**, 333-342.
- Dullien, F. A., 1992.** Porous media fluid transport and pore structure, Second edition, Academic Press. San Diego, California.
- Fenwick, D. H. and Blunt, J. M., 1998.** Three dimensional modeling of three phase imbibition and drainage, *Adv. Water Resources*, **21(2)**, 121-143.
- Ferrand, L. A., Milly, P. C. D., and Pinder, G. F., 1986.** Dual gamma attenuation for determination of porous medium saturation with respect to three fluids, *Water Resources Research*, **22**, 1657-1663.
- Greenkorn, R. A., 1983.** Flow Phenomena in porous media, Marcel Dekker Inc., New York.

- Hofstee, C., Dane, J. H., and Hill, W. E., 1997.** Three Fluid retention in porous media involving water, PCE and air, *J. Contaminant Hydrology*, **25**, 235-247.
- Hu, X. J., Du, J. H., Lei, S.Y., and Wang, B. X., 2001.** A model for the thermal conductivity of unconsolidated porous media based on capillary pressure- saturation relation, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **44**, 247-251.
- Hubbell, J. H., 1982.** Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, **33**, 1269-1290.
- İshakoğlu, A. and Baytaş, A. F., 2002.** Measurement and evaluation of saturations for water, ethanol and a light non-aqueous phase liquid in a porous medium by gamma attenuation, *Appl. Radiat. Isot.*, **56(4)**, 601-606.
- Kaviany, M., 1995.** Principles of heat transfer in porous media, Springer-Verlag, New York.
- Lago, M. and Araujo, M., 2001.** Capillary rise in porous media, *Physica A*, **289**, 1-17.
- Lenhard, R. J., Dane, J. H., Parker, J. C., and Kaluarachchi, J. J., 1988.** Measurement and simulation of one-dimensional transient three-phase flow for monotonic liquid drainage, *Water Resources Research*, **24(6)**, 853-863.
- Moseley, W. A. and Dhir, V. K., 1992.** Capillarity in porous media and the effect of wettability, *ASME, J. Heat Mass Transfer*, **216**, 1-7.
- Moseley, W. A. and Dhir, V. K., 1996.** Capillary pressure-saturation relations in porous media including the effect of wettability, *J. Hydrology*, **178**, 33-53.
- Nield, D. A. and Bejan, A., 1998.** Convection in porous media, Springer-Verlag, New York.
- Oostrom, M., Lenhard, R.J., 1998.** Comparison of relative permeability-saturation-pressure parametric models for infiltration and redistribution of a light nonaqueous-phase liquid in sandy porous media, *Adv. Water Resources*, **21(2)**, 145-157.
- Oostrom, M., Hofstee, C., Dane, J.H., and Lenhard, R.J., 1998.** Single-source gamma radiation procedures for improved calibration and measurements in porous media, *Soil Science*, **163(8)**, 646-656.

- Plumb, O. A.**, 1991. Drying complex porous materials-modelling and experiments, *Convective Heat and Mass Transfer in Porous Media*, Edited by S. Kakaç, B. Kılış, F. A. Kulachi and F. Arinç, Kluwer Academic, The Netherlands, 963-984.
- Reitsma, S. and Kueper, B. H.**, 1994. Laboratory measurement of capillary pressure-saturation relationships in a rock fracture, *Water Resources Research*, **30**, 865-878.
- Shyy, W.**, 1994. Computational modelling for fluid flow and interfacial transport, *Transport Processes in Engineering*, **5**, Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands.
- Schroth, M. H., Istok, J. D., and Selker, T. S.**, 1998. Three-phase immiscible fluid movement in the vicinity of textural interfaces, *J. Contaminant Hydrology*, **32**, 1-23.
- Walser, G. S., Illangasekare, T. H. and Corey, A. T.**, 1999. Retention of liquid contaminants in layered soils, *J. Contaminant Hydrology*, **39**, 91-108.
- Weissermel, K. and Arpe, H. J.**, 1997. Industrial organic chemistry, Wiley company, the Federal Republic of Germany.

ÖZGEÇMİŞ

1974 yılında İstanbul’ da doğdu. Orta öğrenimini tamamladıktan sonra İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik bölümüne girdi ve buradan 1998 yılında mezun oldu. 1998-1999 eğitim-öğretim döneminde İ.T.Ü. Nükleer Enerji Enstitüsünde yüksek lisans programına başladı. İ.T.Ü. Yabancı Diller Okulunda bir yıl süren hazırlık sınıfına devam etti. Ayrıca 1999-2000 döneminde İ.T.Ü. İşletme Fakültesi’ nin düzenlediği Endüstri ve İşletme Yöneticiliği Programına devam etmiş ve bu bölümü 1999-2000 yaz döneminde başarı ile tamamlayarak, İ.T.Ü. SEM Uzmanlık Sertifikasını almaya hak kazanmıştır. İngilizce bilmektedir. Science Citation Index tarafından taranan bilimsel dergilerde yayınlanmış 1 makalesi bulunmaktadır.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ