

**ZEMİNLERİN ŞİŞME ÖZELLİKLERİNE ETKİYEN TEMEL  
PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ VE MODELLENMESİ**

**Soner UZUNDURUKAN**

**Danışman : Prof. Dr. S. Nilay KESKİN**

**DOKTORA TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ISPARTA – 2006**

**T.C.  
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ZEMİNLERİN ŞİŞME ÖZELLİKLERİNE ETKİYEN TEMEL  
PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ VE MODELLENMESİ**

**Soner UZUNDURUKAN**

**Danışman : Prof. Dr. S. Nilay KESKİN**

**DOKTORA TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ISPARTA – 2006**

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER .....	i
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	5
2.1. Temel Kavramlar .....	5
2.1.1. Şişme Potansiyeli.....	5
2.1.2. Şişme Yüzdesi.....	5
2.1.3. Şişme Basıncı.....	7
2.1.4. Emme.....	8
2.2. Şişme Olayının Mekaniği.....	12
2.3. Şişme Davranışına Etki Eden Faktörler.....	15
2.3.1. Zemin Özellikleri.....	16
2.3.1.1. Kil Mineralojisi.....	16
2.3.1.2. Zemin Suyunun Kimyasal Bileşimi.....	22
2.3.1.3. Zemin Mikrostrüktürü ve Fabrik.....	26
2.3.1.4. Kıvam Limitleri.....	29
2.3.1.5. Aktivite.....	31
2.3.1.6. Kil Yüzdesi.....	33
2.3.1.7. Özgül Yüzey Alanı.....	35
2.3.1.8. Katyon Değişirme Kapasitesi (CEC).....	38
2.3.1.9. Kuru Birim Hacim Ağırlık.....	43
2.3.1.10. Zemin Emmesi.....	45
2.3.2. Çevresel Faktörler.....	49
2.3.2.1. Su Muhtevası.....	49
2.3.2.2. Nem Değişiklikleri.....	53
2.3.2.3. Sıcaklık.....	55
2.3.2.4. Kimyasal ve Organik Çevre.....	56
2.3.3. Gerilme Koşulları.....	57
2.3.3.1. Gerilme Tarihçesi.....	57
2.3.3.2. Jeolojik Yük.....	58
2.4. Şişen Zeminlerin Tanımlanması ve Sınıflandırılması.....	61
2.4.1. Doğrudan Yöntemler.....	61
2.4.1.1. Serbest Şişme İndisi Deneyi.....	62
2.4.1.2. Genişleme İndisi Deneyi.....	65
2.4.1.3. Linear Genişleyebilirlik Katsayısı (COLE).....	66
2.4.1.4. Potansiyel Hacim Değişirme (PVC) Deneyi.....	68
2.4.1.5. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR).....	68
2.4.2. Dolaylı Yöntemler.....	69
2.4.2.1. Kil Mineralojisi.....	69
2.4.2.2. İndeks Özellikleri.....	71

2.4.2.3. Zeminlerin Diğer Özellikleri.....	76
2.4.3. Ampirik İlişkiler .....	81
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	85
3.1. Çalışmada Kullanılan Zemin Numuneleri.....	85
3.1.1. X-Ray Difraksiyon Analizleri.....	86
3.1.2. Katyon Değişirme Kapasitesinin Belirlenmesi.....	87
3.2. Şişme Karakteristiklerinin Belirlenmesi.....	87
3.2.1. Serbest Şişme Ödometre Deneyleri.....	87
3.2.2. Sabit Hacim Ödometre Deneyleri.....	88
3.2.3. Serbest Şişme İndisi Belirleme Deneyleri.....	89
3.3. Emme Karakteristiklerinin Belirlenmesi.....	90
3.3.1. Saykrometrelerin Kalibrasyonu.....	92
3.3.2. Zemin Emme Deneyleri.....	96
3.4. Modelleme Çalışmaları.....	98
3.4.1. Yapay Sinir Ağları.....	98
3.4.2. Bulanık Mantık.....	99
3.4.2.1. Bulanık Kümeler ve Üyelik Dereceleri.....	100
3.4.2.2. Bulanık Mantık Kuralları.....	101
3.4.2.3. Bulanık Sonuç Çıkarma ve Bulanık Mantık Modelleme.....	102
3.4.2.4. Bulanıklaştırma.....	102
3.4.2.5. Bulanık Çıkarım.....	103
3.4.2.6. Durulaştırma.....	103
3.4.3. Adaptif Sinir Ağına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS).....	104
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	107
4.1. Zemin Numunelerinin Tanımlanması.....	107
4.2. Şişme ve Emme Deneyleri.....	108
4.2.1. Başlangıç Su Muhtevasının Şişme ve Emme Karakteristikleriyle İlişkisi.....	113
4.2.2. Başlangıç Kuru Birim Hacim Ağırlığının Şişme ve Emme Karakteristikleriyle İlişkisi.....	115
4.2.3. Emme Kapasitesi ile Zeminlerin Emme ve Şişme Karakteristikleri Arasındaki İlişkiler.....	117
4.2.4. Bağlı Su Muhtevası ile Zeminlerin Emme ve Şişme Karakteristikleri Arasındaki İlişkiler.....	120
4.3. Zeminlerin Bazı Fiziksel Özellikleri ile Emme ve Şişme Karakteristikleri Arasındaki İlişkiler.....	122
4.3.1. Plastisite İndisi ile Emme ve Şişme Karakteristikleri Arasındaki İlişkiler.....	122
4.3.2. Modifiye Serbest Şişme İndisi ile Emme ve Şişme Karakteristikleri Arasındaki İlişkiler.....	124
4.3.3. Katyon Değişirme Kapasitesi ile Emme ve Şişme Karakteristikleri Arasındaki İlişkiler.....	126
4.4. Emme ve Şişme Karakteristiklerinin ANFIS Yaklaşımıyla Tahmin Edilmesi.....	128
4.4.1. Şişme Yüzdesinin ANFIS ile Tahmin Edilmesi.....	129
4.4.2. Şişme Basıncının ANFIS ile Tahmin Edilmesi.....	135
4.4.3. Emme Basıncının ANFIS ile Tahmin Edilmesi.....	144

5.SONUÇLAR.....	150
KAYNAKLAR.....	155
EKLER.....	172
ÖZGEÇMİŞ.....	185

## ÖZET

Doktora Tezi

### ZEMİNLERİN ŞİŞME ÖZELLİKLERİNE ETKİYEN TEMEL PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ VE MODELLENMESİ

Soner UZUNDURUKAN

Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Juri:** Prof. Dr. Aziz ERTUNÇ  
Prof. Dr. S. Nilay KESKİN (Danışman)  
Prof. Dr. M. Erol KESKİN  
Doç. Dr. M. Hilmi ACAR  
Yrd. Doç. Dr. Serdal TERZİ

Şişen zeminlerin ıslanma – kuruma etkilerine maruz kalması sonucunda, üniform olmayan şişme – büzülme deformasyonları meydana gelmektedir. Bu deformasyonlar, bu tür zeminler üzerine oturan çeşitli mühendislik yapılarında, önemli hasarlara neden olmaktadır. Şişme – büzülme karakteristiklerinin uygun deneylerle belirlenmesi, gerekli önlemlerin alınması ve uygun temel sisteminin seçilmesi ile bu zemin probleminin etkilerini en aza indirmek mümkündür. Bununla birlikte, özellikle ülkemiz gibi gelişmekte olan ülkelerde, önemli bir zemin problemi olarak ortaya çıkan şişen zemin davranışı ve zemin-yapı etkileşimi, projelendirme ve uygulama aşamalarında, genellikle göz ardı edilmektedir.

Bu tez çalışmasında, killerin şişme davranışı üzerinde etkisi bulunan parametreler incelenmiş ve çalışmada elde edilen deneysel verilere bağlı olarak modelleme çalışmaları yürütülmüştür. Bu kapsamda; Ankara, Burdur ve Kütahya yörelerinden alınan doğal zemin numuneleri kullanılmıştır. Ayrıca doğal zeminlerden bazılarında belirli oranlarda bentonit ilave edilerek yeni numuneler hazırlanmıştır.

Öncelikle, zeminlerin bazı fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri ile farklı başlangıç koşullarındaki emme ve şişme karakteristikleri belirlenmiştir. Şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneylerinde ödometre deney ekipmanı kullanılmış; emme basınçlarının ölçülmesinde saykrometre tekniğinden yararlanılmıştır. Zemin numunelerinin mineralojik karakteristikleri, X-ray difraksiyon (kırınım) analizleri yapılarak elde edilmiştir. Ayrıca, serbest şişme indisi, katyon değiştirme kapasitesi gibi bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen veriler, uyarlanabilir sinir ağına dayalı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) ile değerlendirilerek, zeminlerin emme ve şişme davranışları modellenmeye çalışılmıştır. Modelleme çalışmalarının sonunda, ANFIS yönteminin, şişme yüzdesi, şişme basıncı ve emme basıncı tahminlerinde oldukça uyumlu sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Şişen zeminler, emme basıncı, şişme basıncı, şişme yüzdesi, ANFIS.

**2006, 185 sayfa**

## **ABSTRACT**

**Ph.D. Thesis**

### **DETERMINING AND MODELLING OF PRINCIPAL PARAMETERS AFFECTING SWELLING PROPERTIES OF SOILS**

**Soner UZUNDURUKAN**

**Suleyman Demirel University Graduate School of Applied and Natural Sciences  
Civil Engineering Department**

**Thesis Committee:** Prof. Dr. Aziz ERTUNÇ  
Prof. Dr. S. Nilay KESKİN (Supervisor)  
Prof. Dr. M. Erol KESKİN  
Assoc. Prof. Dr. M. Hilmi ACAR  
Asst. Prof. Dr. Serdal TERZİ

Non-uniform swelling-shrinkage deformations in expansive soils are observed as a result of climatic wetting - drying cycles. These deformations cause some significant damages in engineering structures founded on expansive soils. It is possible to minimize the effects of the swelling problems by conducting appropriate tests for determining the swelling-shrinkage properties, taking necessary cautions and designing suitable foundation systems. However, it is a fact for developing countries such as Turkiye that, expansive soil behaviour and soil structure interaction are not considered in the design and application stage.

In the present dissertation, the parameters affecting the clays swelling are investigated and a modelling study is pursued related with the obtained experimental results. In this content the samples from Ankara, Burdur and Kutahya are used. Besides, with adding bentonite in particular proportion to some of these samples, new samples are prepared.

First, physical, chemical, mineralogical properties and suction-swelling characteristics at different initial conditions of soils are determined. Odometer test equipment is used for swelling percentage and swelling pressure tests. For total suction measurement the Psychrometer technique is applied. To determine the mineralogical characteristics of soil samples, X-Ray diffraction analyses are carried out. Some chemical and physical properties of soils such as free swelling index and cation exchange capacity are determined. The obtained results are evaluated with adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS) methodology, suction and swelling behaviour of soils is modelled. As a result of this modelling study, ANFIS methodology give good results fitting with experimental results for estimating swell percent, swelling pressure and suction.

**Key Words:** Expansive soils, suction, swelling pressure, swell percent, ANFIS.

**2006, 185 pages**

## TEŞEKKÜR

Akademik hayata başladığım ilk günden bu yana; her alanda verdiği destek, değerli görüşleri ve önerileri için danışmanın Sayın Prof. Dr. S. Nilay KESKİN'e şükranlarımı sunarım.

927-D-04 numaralı Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında hazırlanan bu tez çalışması için verdikleri maddi destek nedeniyle Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimine teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmalar sırasındaki yardımları nedeniyle Arş. Gör. T. Selçuk GÖKSAN, Okutman M. Çağrı BAYRAK, Teknisyen Erol YILMAZ ve Teknik Öğretmen M. Bünyamin KARAKAYA'ya; X-ray difraksiyon deneylerinin yapılması ve değerlendirilmesi sırasındaki yardımları nedeniyle Sayın Prof. Dr. Nevzat ÖZGÜR ve Jeotermal Enerji, Yeraltı Suyu ve Mineral Kaynakları Araştırma ve Uygulama Merkezi çalışanlarına teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının başlangıcından sonuna kadar; verdiği destek, gösterdiği anlayış ve tezin yazılması sırasındaki yardımlarından dolayı eşim Esra UZUNDURUKAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 1.1. Betonarme kolondaki hasar.....	2
Şekil 1.2. Karayolu üst yapısında meydana gelen hasar.....	2
Şekil 2.1. Kil – su sistemi .....	13
Şekil 2.2. (a) Silis levhasının strüktürü (b) Silis levhasının basitleştirilmiş çizimi .....	17
Şekil 2.3. (a) Oktahedral levhanın strüktürü (b) Oktahedral levhanın basitleştirilmiş çizimi.....	17
Şekil 2.4. Kaolinit-Serpantin grubu minerallerin yapısı.....	18
Şekil 2.5. Kaolinitin elektron fotomikrografı.....	18
Şekil 2.6. Smektit minerallerin yapısı.....	19
Şekil 2.7. Montmorillonitin tipik elektron fotomikrografı.....	19
Şekil 2.8. Mika benzeri kil minerallerinin yapısı.....	20
Şekil 2.9. İllitin tipik elektron fotomikrografı.....	20
Şekil 2.10. Klorit minerallerinin yapısı.....	21
Şekil 2.11. Boşluk sıvısındaki tuz konsantrasyonunun şişme potansiyeli ve şişme basıncı üzerindeki etkisi.....	24
Şekil 2.12. Elektrolit konsantrasyonunun illit-bentonit karışımlarının serbest şişme boşluk oranı üzerindeki etkisi.....	25
Şekil 2.13. Killerde muhtemel tane dizilim şekilleri .....	27
Şekil 2.14. Kil aktivitesi ile şişme yüzdesi arasındaki ilişki .....	33
Şekil 2.15. Kil yüzdesinin şişme yüzdesi üzerindeki etkisi.....	34
Şekil 2.16. Kil yüzdesinin şişme basıncı üzerindeki etkisi.....	35
Şekil 2.17. Özgül yüzey alanı ve şişme yüzdesi arasındaki ilişki.....	37
Şekil 2.18. Metilen mavisi değeri ile şişme yüzdesi arasındaki ilişki.....	38
Şekil 2.19. Katyon değiştirme reaksiyonu.....	39
Şekil 2.20. Katyon değiştirme ortamı.....	39
Şekil 2.21. Katyon tipi, pH ve başlangıç koşullarının şişme basıncı üzerindeki etkisi .....	42
Şekil 2.22. Başlangıç kuru birim hacim ağırlığının şişme yüzdesi üzerindeki etkisi .....	44
Şekil 2.23. Farklı zemin türleri için tipik zemin – su karakteristik eğrileri .....	46
Şekil 2.24. Zemin emmesi ve şişme potansiyeli arasındaki ilişki .....	48
Şekil 2.25. Başlangıç zemin emmesi ile şişme yüzdesi arasındaki ilişki .....	48
Şekil 2.26. Başlangıç su muhtevasının şişme üzerindeki etkisi .....	50
Şekil 2.27. Başlangıç su muhtevasının şişme basıncı üzerindeki etkisi.....	51
Şekil 2.28. Şişen killi zeminlerde su muhtevası – boşluk oranı ilişkisi .....	52
Şekil 2.29. Şişmenin yorulması.....	53
Şekil 2.30. Bir kuruma – ıslanma eğrisi.....	54
Şekil 2.31. Fo-Ca kilinin şişme basıncı ve konsolidasyon basıncı arasındaki ilişki .....	58
Şekil 2.32. Sürşarj basıncının aynı başlangıç koşullarına sahip numunelerin şişme yüzdesi üzerindeki etkisi .....	59
Şekil 2.33. Bir boyutlu düşey serbest şişme – jeolojik yük ilişkisi .....	60
Şekil 2.34. Katyon aktivitesi ve asimetreye bağlı olarak mineraloji ve şişme potansiyelinin tahmini .....	71

Şekil 2.35.	Kil yüzdesi ve aktiviteye bağlı şişme potansiyeli kartı.....	72
Şekil 2.36.	Kil yüzdesi ve plastisite indisine bağlı şişme potansiyeli kartı .....	73
Şekil 2.37.	Plastisite indisi ve likit limite bağlı şişme potansiyeli kartı.....	74
Şekil 2.38.	Şişme potansiyeli kartı .....	75
Şekil 2.39.	Kil yüzdesi ve plastisite indisine bağlı şişme potansiyeli tanımlama kartı .....	75
Şekil 2.40.	Kil mineralojisinin katyon değiştirme kapasitesi ve aktiviteye bağlı olarak belirlenmesi .....	76
Şekil 2.41.	Şişme potansiyelinin kil yüzdesi ve COLE değerine bağlı olarak belirlenmesi .....	77
Şekil 2.42.	COLE bölgelerinin ve zemin şişme potansiyelinin aktivite ve katyon değiştirme kapasitesine bağlı olarak belirlenmesi .....	77
Şekil 2.43.	Emme basıncı - su muhtevası ilişkisine dayanan şişme potansiyeli kartı .....	78
Şekil 2.44.	İki farklı kil için büzülme deneyi sonucu.....	80
Şekil 3.1.	PAN alytical X'Pert Pro MPD X-ray Difraktometresi.....	86
Şekil 3.2.	Serbest şişme indisi deneyi .....	89
Şekil 3.3.	Wescor PST-55 model saykrometre.....	90
Şekil 3.4.	Wescor HR33T Microvoltmetre .....	91
Şekil 3.5.	Saykrometre deney sistemi .....	92
Şekil 3.6.	46177 numaralı saykrometrenin kalibrasyon eğrisi.....	94
Şekil 3.7.	46258 numaralı saykrometrenin kalibrasyon eğrisi.....	94
Şekil 3.8.	46280 numaralı saykrometrenin kalibrasyon eğrisi.....	95
Şekil 3.9.	46282 numaralı saykrometrenin kalibrasyon eğrisi.....	95
Şekil 3.10.	46284 numaralı saykrometrenin kalibrasyon eğrisi.....	96
Şekil 3.11.	Saykrometre deney numunelerinin hazırlanması.....	97
Şekil 3.12.	Saykrometre deney grafiği .....	97
Şekil 3.13.	Basit nöron modeli .....	98
Şekil 3.14.	Klasik mantıkta bitişik dikdörtgen gösterim .....	101
Şekil 3.15.	Bulanık mantıkta örtüşmeli üçgen gösterim .....	101
Şekil 3.16.	ANFIS mimarisi .....	104
Şekil 4.1.	Başlangıç su muhtevasının şişme yüzdesi üzerindeki etkisi .....	113
Şekil 4.2.	Başlangıç su muhtevasının şişme basıncı üzerindeki etkisi .....	114
Şekil 4.3.	Başlangıç su muhtevasının emme basıncı üzerindeki etkisi .....	114
Şekil 4.4.	Başlangıç kuru birim hacim ağırlığının şişme yüzdesi üzerindeki etkisi .....	115
Şekil 4.5.	Başlangıç kuru birim hacim ağırlığının şişme basıncı üzerindeki etkisi .....	116
Şekil 4.6.	Başlangıç kuru birim hacim ağırlığının emme basıncı üzerindeki etkisi .....	117
Şekil 4.7.	Emme kapasitesi ile şişme arasındaki ilişki .....	118
Şekil 4.8.	Emme kapasitesi ile şişme basıncı arasındaki ilişki .....	118
Şekil 4.9.	Emme kapasitesi ile emme basıncı arasındaki ilişki .....	119
Şekil 4.10.	Emme kapasitesi ile emme basıncı arasındaki ilişki.....	119
Şekil 4.11.	Bağıl su muhtevası ve şişme yüzdesi arasındaki ilişki.....	120
Şekil 4.12.	Bağıl su muhtevası ve şişme basıncı arasındaki ilişki.....	121
Şekil 4.13.	Bağıl su muhtevası ve emme basıncı arasındaki ilişki.....	121
Şekil 4.14.	Plastisite indisi ile şişme yüzdesi arasındaki ilişki .....	122

Şekil 4.15.	Plastisite indisi ile şişme basıncı arasındaki ilişki .....	123
Şekil 4.16.	Plastisite indisi ile şişme basıncı arasındaki ilişki .....	123
Şekil 4.17.	Plastisite indisi ile emme basıncı arasındaki ilişki .....	124
Şekil 4.18.	Modifiye serbest şişme indisi ile şişme yüzdesi arasındaki ilişki ...	125
Şekil 4.19.	Modifiye serbest şişme indisi ile şişme basıncı arasındaki ilişki ....	125
Şekil 4.20.	Modifiye serbest şişme indisi ile emme basıncı arasındaki ilişki ....	126
Şekil 4.21.	Katyon değiştirme kapasitesi ile şişme yüzdesi arasındaki ilişki ....	127
Şekil 4.22.	Katyon değiştirme kapasitesi ile şişme basıncı arasındaki ilişki .....	127
Şekil 4.23.	Katyon değiştirme kapasitesi ile emme basıncı arasındaki ilişki ....	128
Şekil 4.24.	Şişme tahmini amacıyla kurulan Model 1' in mimarisi.....	130
Şekil 4.25.	Plastisite indisi için üyelik fonksiyonu grafiği.....	130
Şekil 4.26.	Katyon değiştirme kapasitesi için üyelik fonksiyonu grafiği.....	130
Şekil 4.27.	Bağıl su muhtevası için üyelik fonksiyonu grafiği.....	131
Şekil 4.28.	Başlangıç kuru birim hacim ağırlığı için üyelik fonksiyonu grafiği.	131
Şekil 4.29.	Başlangıç su muhtevası için üyelik fonksiyonu grafiği.....	131
Şekil 4.30.	Eğitim aşaması için deneysel sonuçlar ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 1).....	132
Şekil 4.31.	Test aşaması için deneysel sonuçlar ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 1).....	132
Şekil 4.32.	Model sonuçları ile deneysel şişme yüzdesi sonuçları arasındaki ilişki.....	132
Şekil 4.33.	Şişme tahmini amacıyla kurulan Model 2' nin mimarisi.....	133
Şekil 4.34.	Eğitim aşaması için deneysel sonuçlar ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 2).....	133
Şekil 4.35.	Test aşaması için deneysel sonuçlar ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 2) .....	134
Şekil 4.36.	Şişme tahmini amacıyla kurulan Model 3' ün mimarisi.....	134
Şekil 4.37.	Eğitim aşaması için deneysel sonuçlar ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 3) .....	135
Şekil 4.38.	Test aşaması için deneysel sonuçlar ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 3) .....	135
Şekil 4.39.	Şişme basıncı tahmini amacıyla kurulan Model 1' in mimarisi.....	136
Şekil 4.40.	Plastisite indisi için üyelik fonksiyonu grafiği.....	136
Şekil 4.41.	Katyon değiştirme kapasitesi için üyelik fonksiyonu grafiği.....	137
Şekil 4.42.	Bağıl su muhtevası için üyelik fonksiyonu grafiği.....	137
Şekil 4.43.	Kuru birim hacim ağırlık için üyelik fonksiyonu grafiği.....	137
Şekil 4.44.	Su muhtevası için üyelik fonksiyonu grafiği.....	137
Şekil 4.45.	Eğitim aşaması için deneysel şişme basıncı değerleri ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 1).....	138
Şekil 4.46.	Test aşaması için deneysel şişme basıncı değerleri ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 1).....	138
Şekil 4.47.	Model sonuçları ile deneysel şişme basıncı sonuçları arasındaki ilişki.....	139
Şekil 4.48.	Şişme basıncı tahmini amacıyla kurulan Model 2' nin mimarisi.....	139
Şekil 4.49.	Eğitim aşaması için deneysel şişme basıncı değerleri ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 2).....	140
Şekil 4.50.	Test aşaması için deneysel şişme basıncı değerleri ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 2).....	140

Şekil 4.51.	Şişme basıncı tahmini amacıyla kurulan Model 3' ün mimarisi.....	141
Şekil 4.52.	Eğitim aşaması için deneysel şişme basıncı değerleri ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 3).....	141
Şekil 4.53.	Test aşaması için deneysel şişme basıncı değerleri ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 3).....	141
Şekil 4.54.	Şişme basıncı tahmini amacıyla kurulan Model 4' ün mimarisi.....	142
Şekil 4.55.	Eğitim aşaması için deneysel şişme basıncı değerleri ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 4).....	142
Şekil 4.56.	Test aşaması için deneysel şişme basıncı değerleri ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 4).....	143
Şekil 4.57.	Model 4 tahminleri ile deneysel şişme basıncı sonuçları arasındaki ilişki.....	143
Şekil 4.58.	Emme basıncı tahmini amacıyla kurulan Model 1' in mimarisi.....	144
Şekil 4.59.	Eğitim aşaması için deneysel emme basıncı değerleri ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 1).....	145
Şekil 4.60.	Test aşaması için deneysel emme basıncı değerleri ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 1).....	145
Şekil 4.61.	Model 1 tahminleri ile deneysel emme basıncı değerleri arasındaki ilişki.....	145
Şekil 4.62.	Emme basıncı tahmini amacıyla kurulan Model 2' nin mimarisi....	146
Şekil 4.63.	Katyon değiştirme kapasitesi için üyelik fonksiyonu grafiği.....	147
Şekil 4.64.	$D_{60}$ için üyelik fonksiyonu grafiği.....	147
Şekil 4.65.	Kuru birim hacim ağırlık için üyelik fonksiyonu grafiği.....	147
Şekil 4.66.	Su muhtevası için üyelik fonksiyonu grafiği.....	147
Şekil 4.67.	Eğitim aşaması için deneysel emme basıncı değerleri ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 2).....	148
Şekil 4.68.	Test aşaması için deneysel emme basıncı değerleri ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 2).....	148
Şekil 4.69.	Model 2 tahminleri ile deneysel emme basıncı değerleri arasındaki ilişki.....	149

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Zemin emmesinin ölçülmesinde kullanılan yöntemler.....	12
Çizelge 2.2. Şişme potansiyelini etkileyen zemin özellikleri .....	15
Çizelge 2.3. Şişme potansiyelini etkileyen çevresel faktörler.....	16
Çizelge 2.4. Gerilme koşullarının şişme potansiyeli üzerindeki etkisi....	16
Çizelge 2.5. Bazı kil mineralleri için tipik aktivite değerleri.....	32
Çizelge 2.6. Özgül yüzey alanının kil mineralinin cinsi ve boyutuna bağlı olarak değişimi.....	36
Çizelge 2.7. Çeşitli kil mineralleri için katyon değiştirme kapasitesi değerleri.....	40
Çizelge 2.8. İki farklı bentonit için katyon değiştirme kapasitesi ve değişebilir katyonların zeminin şişmesi üzerindeki etkisi....	43
Çizelge 2.9. Modifiye serbest şişme indisi ve şişme potansiyeli arasındaki ilişki.....	63
Çizelge 2.10. Serbest şişme indisi ile zemin şişme potansiyeli tahmini....	64
Çizelge 2.11. Çökelti hacim oranı ile şişme potansiyeli tahmini.....	65
Çizelge 2.12. Genişleme indisine bağlı olarak zeminin genişleme potansiyelinin sınıflandırılması.....	66
Çizelge 2.13. Şişme – büzülme potansiyelinin lineer genişleyebilirlik katsayısı ve lineer genişleyebilirlik yüzdesine bağlı olarak sınıflandırılması.....	67
Çizelge 2.14. Şişme – büzülme potansiyelinin PVC deneyi sonuçlarına bağlı olarak sınıflandırılması.....	68
Çizelge 2.15. Kil mineralleri ile şişme potansiyeli arasındaki ilişki .....	69
Çizelge 2.16. Şişen zeminlerin, rötre limiti ve lineer rötreye bağlı olarak sınıflandırılması.....	71
Çizelge 2.17. Şişen zeminlerin, kolloid içeriği, plastisite indisi ve rötre limitine bağlı olarak sınıflandırılması.....	72
Çizelge 2.18. Şişme potansiyelinin plastisite indisine bağlı olarak tahmini	73
Çizelge 2.19. Zemin emmesi ile ilişkili zemin özelliklerine bağlı şişme potansiyeli sınıflandırması .....	78
Çizelge 2.20. Şişen zemin indisine (ESI) bağlı sınıflandırma.....	79
Çizelge 2.21. Şişme büzülme indisine bağlı olarak şişme potansiyelinin sınıflandırılması.....	80
Çizelge 3.1. Kullanılan zeminlerin bazı özellikleri.....	85
Çizelge 4.1. İncelenen zeminlerin şişme potansiyelleri.....	108
Çizelge 4.2. Zemin numunelerinin şişme indisi ve katyon değiştirme kapasitesi değerleri.....	108
Çizelge 4.3. Numune 1 için farklı başlangıç koşullarındaki emme ve şişme karakteristikleri.....	109
Çizelge 4.4. Numune 2 için farklı başlangıç koşullarındaki emme ve şişme karakteristikleri.....	109
Çizelge 4.5. Numune 3 için farklı başlangıç koşullarındaki emme ve şişme karakteristikleri.....	110
Çizelge 4.6. Numune 4 için farklı başlangıç koşullarındaki emme ve şişme karakteristikleri.....	110

Çizelge 4.7.	Numune 5 için farklı başlangıç koşullarındaki emme ve şişme karakteristikleri.....	111
Çizelge 4.8.	Numune 6 için farklı başlangıç koşullarındaki emme ve şişme karakteristikleri.....	111
Çizelge 4.9.	Numune 7 için farklı başlangıç koşullarındaki emme ve şişme karakteristikleri.....	112
Çizelge 4.10.	Numune 8 için farklı başlangıç koşullarındaki emme ve şişme karakteristikleri.....	112
Çizelge 4.11.	Modellerin test aşamasında kullanılan deneysel sonuçlar....	129

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$a$	Denklem sabiti
$A$	Aktivite
$a_i$	Çan eğrisi şekilli üyelik fonksiyonun sigması
$A_i$	Bulanık küme parametresi
$b$	Denklem sabiti
$b_i$	Çan eğrisi şekilli üyelik fonksiyonun eğimi
$B_i$	Bulanık küme parametresi
$c$	Çözünenlerin konsantrasyonu
$C$	Kil yüzdesi
$c_i$	Çan eğrisi şekilli üyelik fonksiyonun merkezi
$CBR$	Kaliforniya taşıma oranı
$CEA$	Katyon değiştirme aktivitesi
$CEC$	Katyon değiştirme kapasitesi
$COLE$	Lineer genişleyebilirlik katsayısı
$D_0$	Numunenin başlangıç çapı
$D_1$	Numunenin şiştikten sonraki çapı
$D_{60}$	Zemin tanelerinin ağırlıkça %60'ının büyük olduğu çap
$DFSI$	Diferansiyel serbest şişme indisi
$e$	Boşluk oranı
$e_0$	Başlangıç boşluk oranı
$e_{maks}$	Maksimum boşluk oranı
$e_{min}$	Minimum boşluk oranı
$E_{25}$	25 °C için düzeltilmiş saykrometre okuması
$E_T$	Saykrometre okuması
$EI$	Genişleme indisi
$ESI$	Şişen zemin indisi
$f$	Aktivasyon fonksiyonu
$FS$	Serbest şişme
$FSI$	Serbest şişme indisi
$F$	No 4 eleğinden geçen zemin yüzdesi
$G_s$	Özgül ağırlık
$H$	Bağıl nem
$H_0$	Numunenin başlangıç yüksekliği
$H_1$	Şişme sonrasındaki numune yüksekliği
$H_t$	Zemin emmesi
$I_{ss}$	Şişme-büzülme indisi
$I_L$	Likidite indisi
$LEP$	Lineer genişleyebilirlik yüzdesi
$LL$	Likit limit
$MCP$	Su muhtevası değişim potansiyeli

$MD$	Su eksikliği
$MFSI$	Modifiye serbest şişme indisi
$n$	Bir mol tuz için molekül sayısı
$N$	Molalite
$O_{ij}$	Hücre çıktısı
$P_a$	Atmosfer basıncı
$p_i$	ANFIS için model parametresi
$P_s$	Şişme basıncı
$pF$	Log kPa cinsinden emme birimi
$PI$	Plastisite indisi
$PVC$	Potansiyel hacim değişimi
$q_i$	ANFIS için model parametresi
$R$	Üniversal gaz sabiti
$R^2$	Determinasyon katsayısı
$r$	Korelasyon katsayısı
$r_i$	ANFIS için model parametresi
$RM$	Bağlı su muhtevası
$S$	Şişme yüzdesi
$S_v$	Doygunluk katsayısı
$S_r$	Doygunluk derecesi
$SI$	Şişme indisi
$SL$	Rötre limiti
$SSP$	Doygunluk su muhtevası
$T$	Mutlak sıcaklık
$u_a$	Boşluk hava basıncı
$u_w$	Boşluk su basıncı
$V$	Şişme sonrası zemin hacmi
$V_0$	Kuru zemin hacmi
$V_d$	Saf suda çökelen zemin hacmi
$V_k$	Kerosen veya $CCl_4$ içerisinde çökelen zemin hacmi
$V_s$	Zemin tanelerinin hacmi
$w$	Su muhtevası
$w_0$	Başlangıç su muhtevası
$W_{em}$	Emme kapasitesi
$w_f$	Nihai su muhtevası
$w_{maks}$	Maksimum su muhtevası
$w_{min}$	Minimum su muhtevası
$w_{ij}$	Ağırlık katsayısı
$w_{sh}$	Büzülme testi sonucunda elde edilen büzülme limiti
$w_{sw}$	Serbest şişme ödometre deneyinde elde edilen şişme limiti
$x_j$	Girdi değeri



$Y_j$	Nöronun çıktısı
$\Delta L/\Delta L_D$	Kuru boyutlara bağlı lineer deformasyon
$\Delta H$	Yükseklikteki değişim
$\gamma_{kM}$	33 kPa emmede numunenin kuru birim hacim ağırlığı
$\gamma_{kD}$	Fırında kurutulmuş numunenin kuru birim hacim ağırlığı
$\gamma_k$	Kuru birim hacim ağırlık
$\mu_{A_i}$	$A_i$ küme parametresi için üyelik derecesi
$\mu_{B_i}$	$B_i$ küme parametresi için üyelik derecesi
$v_{w0}$	Suyun özgül hacmi
$\theta_j$	Sapma
$u$	Aktivitenin belirlenmesinde kullanılan katsayı (doğal zeminlerde 5, yoğrulmuş zeminlerde 10)
$\omega_v$	Su buharının moleküler kütlesi
$\Psi$	Toplam emme
$\Psi_a$	Pnömatik potansiyel
$\Psi_g$	Gravitasyonel potansiyel
$\Psi_m$	Matris emme
$\Psi_p$	Basınç potansiyeli
$\Psi_{\Pi}$	Ozmotik emme

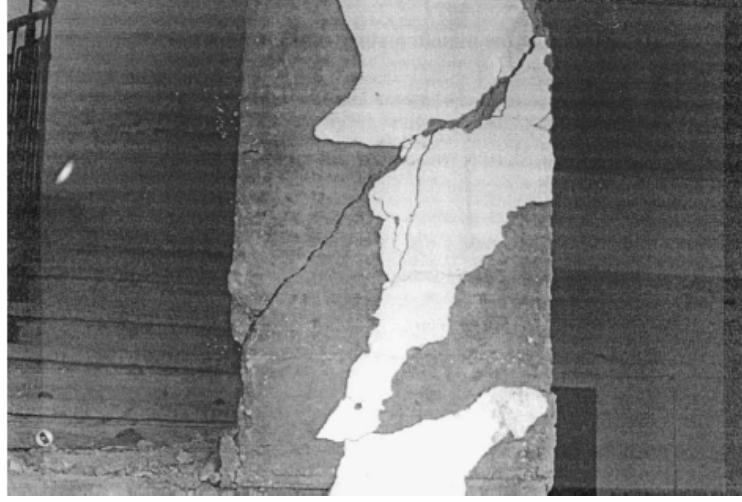
## 1. GİRİŞ

Zeminler, çeşitli kayaç ve minerallerin çevresel faktörlerin etkisiyle ayrışması sonucunda; katı tanelerden ve bu tanelerin arasındaki boşlukları dolduran sıvı ve gazlardan oluşan doğal malzemelerdir. Zeminlerin mekanik özellikleri, bu fazların birbirleriyle ve gerilme, sıcaklık farkı, elektriksel potansiyel, hidrolik seviye gibi faktörlerle etkileşimi sonucunda değişebilmektedir. Zemin terimi; çok yumuşak, organik çökellerden – killere ve kumlardan – yumuşak kayalara kadar geniş bir aralığı kapsayan ve bu nedenle çok farklı mühendislik davranışları gösterebilen malzemeleri ifade etmektedir. Şişen zemin terimi ise, şişen su muhtevası koşulları altında, hacim değiştirme (şişme – büzülme) potansiyeline sahip olan zeminler için kullanılmaktadır.

Kuru bir zemin, boşluklarındaki hava ile suyun yer değiştirmesi sonucunda, hacim değiştirmeksizin su alabilir. Bu durum genellikle kumlu ve siltli zeminlerde meydana gelmektedir. Şişme ise, su muhtevasının artması sonucunda, kil tanelerini birbirlerinden uzaklaştırarak hacmi artıracak bir itki kuvvetini gerektirmektedir (Yong ve Warkentin, 1975).

Şişme, sadece su varlığı nedeniyle hacimdeki artış eğilimini değil, suyun kaybolması sonrasında hacimdeki azalmayı veya büzülme de vurgulamaktadır. Şişme olayının gerçekleşebilmesi için üç şartın birlikte bulunması gerekir. İlk olarak, su muhtevası arttığında hacminde artış meydana gelen taneleri içeren bir zemin mevcut olmalıdır. İkinci olarak, zemin, su alma eğilimine sahip olduğu bir şartta ve gerilme durumunda bulunmalıdır. İlk iki durum sağlandığında, potansiyel olarak şişen bir zemin mevcuttur. Son olarak, zeminin su alma ihtiyacını karşılayacak su, ortamda mevcut olmalıdır. Kurak ve yarı kurak bölgelerde, çoğu zeminin doğal su muhtevası, şişme meydana getirebilecek su muhtevası aralığının içindedir ve eğer bu bölgelerde şişen zeminler de mevcutsa, nem değişiklikleri hacim değişikliklerini beraberinde getirir. Yağış ve nem açısından büyük mevsimsel değişikliklere maruz bu bölgelerde, şişen zeminler üzerine oturan çeşitli yapılarda; önemli hasarlar meydana gelebilir (Dif ve Bluemel, 1991; Hardcastle, 2003).

Bu hasarlar genellikle, üniform olmayan, yani zeminlerin farklı şişme veya büzülmesi nedeniyle meydana gelen, zemin deformasyonlarından kaynaklanmaktadır. Özellikle, az katlı binalar, karayolu ve havaalanı kaplamaları gibi hafif yapılarda; su, kanalizasyon ve doğal gaz şebekelerini içine alan yer altı boru hatları, sulama kanalları, istinat yapıları vb. mühendislik yapılarında, önemli hasarlarla karşılaşılabilir (Şekil 1.1. ve 1.2.).



Şekil 1.1. Betonarme kolondaki hasar (Al-Shamrani ve Dhowian, 2003)



Şekil 1.2. Karayolu üst yapısında meydana gelen hasar (Al-Shamrani ve Dhowian, 2003)

Şişen zemin problemleri ve bu zeminlerin yol açtığı hasarlarla ilgili olarak farklı ülkelerde bir çok çalışma yayınlanmıştır (Jones ve Holtz, 1973; Ruwaih, 1987; Chen, 1988; Nelson ve Miller, 1992). Bu çalışmalarda ifade edilen ortak bir görüş, bu zemin problemi nedeniyle tüm dünyada yılda milyarlarca dolarlık hasarın meydana geldiğidir. Şişme problemi nedeniyle meydana gelen hasarın; deprem, tayfun ve taşkınları içine alan doğal afetlerden daha büyük boyutta olduğu belirtilmektedir. Bu zemin problemi nedeniyle meydana gelen ekonomik kaybın büyüklüğüne rağmen; şişen zemin davranışı ve zemin-yapı etkileşimi, projelendirme ve uygulama aşamasında, genellikle göz ardı edilmektedir.

Diğer taraftan, tehlikeli ve nükleer atık sahalarında kirleticinin taşınmasını veya su akışını engellemek için yapılan bariyerlerde kullanılan bentonitin şişmesi ise şişmenin avantaj haline dönüştüğü bir nokta olarak düşünülebilir (Gajo ve Loreto, 2003).

Şişme; litolojiye, kil kısmın yüzdesine, kil kısmın mineralojik bileşimine ve bu minerallerin kil zemin içerisindeki dizilim veya yönelimine bağlı olarak değişebilir. Ayrıca, değişebilir katyonların bileşimi, karbonatların oranı, su muhtevası, strüktür ve mikrostrüktür, suyun kimyasal bileşimi ve kil taneleri arasındaki çimentolanma bağları gibi pek çok faktörden de etkilenmektedir. Bu nedenle, hiçbir özellik tek başına tüm zeminlerin şişme – büzülme davranışlarını tam olarak tahmin edebilmek için yeterli değildir. Şişme – büzülme davranışının en iyi biçimde belirlenebilmesi için, fiziksel kimyasal ve mineralojik zemin özelliklerinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Thomas, 1998).

Bir zeminin şişme potansiyelinin doğru şekilde tahmin edilmesi; şişme nedeniyle meydana gelebilecek hasarların engellenebilmesi için gerekli tasarım kriterlerinin veya zemin iyileştirme yönteminin seçilmesinde en önemli aşamadır (Mohan vd., 1973; Popescu, 1979; Chen, 1988).

Bu tez çalışmasında, killerin şişme davranışı üzerinde etkisi bulunan parametreler incelenmiş ve deneysel verilere bağlı olarak modelleme çalışmaları yürütülmüştür.

Bu amaçla, çeşitli yörelere ait farklı mühendislik özelliklerine sahip doğal kil numuneleri kullanılmıştır. Ayrıca bazı numunelere belirli oranlarda bentonit ilave edilerek yeni zemin numuneleri hazırlanmıştır. Elde edilen tüm numuneler üzerinde, standart zemin mekaniği deneylerinin yanı sıra; farklı başlangıç koşulları altında, şişme yüzdesi, şişme basıncı ve emme basıncı değerleri belirlenmiştir. Şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneylerinde ödometre ekipmanı, emme basıncı deneylerinde ise ısı çift saykrometre tekniği kullanılmıştır. İncelenen numunelerin serbest şişme indisi ve katyon değiştirme kapasitesi değerleri belirlenmiştir. Ayrıca, X-ray difraksiyon (kırınım) analizleri yapılarak numunelerin bazı mineralojik karakteristikleri elde edilmiştir. Öncelikle, zeminlerin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri ile başlangıç koşullarının; şişme yüzdesi, şişme basıncı ve emme basıncı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar üzerinde, uyarlanabilir sinir ağına dayanan bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) yöntemi uygulanarak, zeminlerin şişme yüzdesi, şişme basıncı ve emme basıncı değerleri tahmin edilmiştir. Modelleme çalışmalarının sonunda, ANFIS yöntemi kullanılarak tahmin edilen şişme yüzdesi, şişme basıncı ve emme basıncı değerlerinin, deneysel sonuçlarla uyum içinde olduğu görülmüştür.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

### 2.1. Temel Kavramlar

#### 2.1.1. Şişme Potansiyeli

Zemin ortamında, su muhtevası ve gerilme koşullarındaki değişikliklerin bir sonucu olarak ortaya çıkan hacim artışı, şişme olarak tanımlanmaktadır. Şişme potansiyeli, genel olarak, zeminlerin şişme yeteneğini ifade eden bir kavram olarak kullanılmaktadır. Literatürde, şişme potansiyelinin belirlenmesi ve tanımlanması açısından tam bir fikir birliği bulunmamaktadır. Bununla birlikte, şişme potansiyeli; genellikle, zeminlerin hem şişme yüzdesini hem de şişme basıncını kapsayan bir terim olarak kabul edilmektedir (Sridharan vd.1986; Shuai, 1996).

#### 2.1.2. Şişme Yüzdesi

Şişme yüzdesi, örselenmemiş veya istenilen herhangi bir başlangıç koşulunda sıkıştırılarak hazırlanan zemin numunesinin su altında bırakılması sonucu hacminde meydana gelen artışın, başlangıç hacmine göre yüzdesini ifade etmektedir. Zemin numunesinin ıslanması (su altında bırakılması) sonrasında, yanal deformasyonların engellenmesi durumunda (bir boyutlu ödometre koşullarında) meydana gelen düşey boy değişimi veya aksel deformasyonların engellenmesi durumunda (üç eksenli koşullarında) meydana gelen yanal çap değişimi şeklinde belirlenebilmektedir (Keskin vd., 1992).

Bir boyutlu ödometre koşullarında, numunenin kesit alanı sabit tutulduğu için, şişme yüzdesinin hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır.

$$S = \frac{H_1 - H_0}{H_0} \times 100\% \quad (2.1)$$

Burada,

$S$  - Şişme yüzdesi,

$H_0$  - Numunenin başlangıç yüksekliği,

$H_1$  - Şişme sonrasındaki numune yüksekliğidir.

Üç eksenli koşullarında numunenin yüksekliğinin sabit tutulması durumunda, yanal çap değişimi cinsinden şişme yüzdesi ise Eşitlik 2.2 kullanılarak hesaplanabilir.

$$S = \frac{D_1^2 - D_0^2}{D_0^2} \times 100\% \quad (2.2)$$

Burada,

$S$  - Şişme yüzdesi,

$D_0$  - Numunenin başlangıç çapı,

$D_1$  - Şişme sonrasındaki numune çapıdır.

Literatürde, farklı araştırmacıların çalışmalarında, şişme yüzdesinin belirlenmesinde; kullanılan deney sistemi ve izlenen prosedür açısından önemli farklılıklar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda; örselenmemiş zemin numuneleri, örselenmemiş ancak havada kurutulmuş su muhtevası düşürülmüş zemin numuneleri yada istenilen su muhtevası ve birim hacim ağırlık koşullarında sıkıştırılarak hazırlanan zemin numuneleri kullanılmaktadır. Numuneleri istenilen başlangıç koşullarında hazırlamak için statik yada dinamik sıkıştırma yöntemleri uygulanmaktadır. Yükleme koşulları açısından; 1 kPa, 7 kPa, 10 kPa vb. sürşarj yükleri altında veya zeminin arazide maruz kalacağı yüke eşdeğer sürşarj altında deneyler yapılmaktadır. Ayrıca, deneylerin uygulanması sırasında numuneler, tamamen su altında bırakılmakta veya kapiler yolla su emmeleri sağlanarak şişmelerine izin verilen teknikler uygulanmaktadır.

Örneğin, Holtz ve Gibbs (1956) zeminin şişme potansiyelini, bir zeminin kuru halden, 7kPa sürşarj yükü altında doymuş hale gelmesi sırasında meydana gelen toplam hacim değişikliği olarak tanımlamışlardır.

Seed vd. (1962) şişme yüzdesini, standart AASHTO su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırılmış zemin numunesinin, ödometre koşullarında 7 kPa sürşarj basıncı altında, su altında bırakılması sonucu meydana gelen düşey boy değiştirmesinin başlangıç numune yüksekliğine oranı olarak tanımlamışlardır.

Snethen (1984) ise şişme yüzdesini, örselenmemiş zemin numunesinin ödometre koşullarında, arazide maruz kalacağı yüke eşdeğer sürşarj yükü altında ıslatılması sonucunda nihai denge doğunluk durumuna kadar meydana gelen hacim değişiminin, başlangıç numune yüksekliğine oranı olarak tanımlamıştır.

### **2.1.3. Şişme Basıncı**

Şişen zeminlerin, suyla temasa geçmeleri sonucunda, matris emmedeki azalma nedeniyle ortaya çıkan hacim artışları engellenmeye çalışıldığında, bir basınç meydana gelmekte ve bu basınç şişme basıncı olarak isimlendirilmektedir. Sridharan ve Choudhury (2002) şişme basıncını, kilin su veya elektrolit absorbe etmesine izin verilmesi halinde, kil – su sistemini istenen boşluk oranında tutmak için gerekli basınç olarak tanımlamışlardır. Zeminin şişme basıncının, üzerindeki yapının ağırlığından daha büyük olduğu ve yapının farklı zemin tabakaları üzerine oturduğu durumlarda, mühendislik yapılarında önemli hasarlar meydana gelmektedir. Şişen zeminler üzerinde yapılmış olan, karayolu ve havaalanı kaplamaları, hafif binalar, istinat yapıları, bahçe duvarları, boru hatları vb. yapılarda, yüksek şişme basınçları nedeniyle önemli zorlanmalar, çatlaklar, kırılmalar meydana gelebilmektedir. Woollorton (1954) çalışmasında, Nijerya'da 1100 kPa (110 t/m<sup>2</sup>) büyüklüğünde şişme basınçları ölçtüğünü belirtmiştir (Shuai, 1996).

Şişme basıncının ölçülmesi için, farklı araştırmacılar tarafından birçok yöntem geliştirilmiştir. Genellikle ödometre deney ekipmanının kullanıldığı bu yöntemler, esasen iki grupta incelenebilir:



Sabit Yük dometre Deneyleri;

Serbest Şişme dometre Deneyi (Sridharan vd., 1986; Shuai ve Fredlund, 1998).

Çift dometre Deneyi (Jennings vd., 1973; Shuai, 1996)

Yüklü Şişme dometre Deneyi (Skempton, 1961; Matyas, 1969)

Chinese Yöntemi (Feng, 1995; Shuai, 1996)

Sabit Hacim dometre Deneyleri;

Sabit Hacim dometre Deneyi (Sridharan vd., 1986; Fredlund vd.,1980)

Deformasyon Kontrollü Deney Yöntemi (Porter ve Nelson, 1980)

Ölçülen Şişme basınçları ve tahmin edilen kabarma miktarı, zeminlerin Şişme özelliklerini ölçmek için kullanılan yöntemden önemli ölçüde etkilenmektedir. Sridharan vd. (1986), esas kil mineral tipi montmorillonit olan black cotton zeminlerinde, Şişme basınçları üzerine etki eden faktörleri incelemişlerdir. Araştırmacılar, Şişme basınçlarını üç farklı yöntemle (I – Serbest Şişme dometre deneyi, II – yüklü Şişme deneyi, III – sabit hacim deneyi) belirlemiŐler ve sonuçları karŐılaŐtırmıŐlardır. Buna göre, I. metot Şişme basıncı için en büyük değeri II. metot ise en düşük değeri vermektedir. III. metodun ise iki metottan elde edilenler arasında bir değer verdiği gözlenmiştir.

#### **2.1.4. Emme**

Zemin emmesi; belirli su muhtevasına sahip bir zeminin, boşluk suyunu adsorbe etme ve tutma potansiyelini tanımlayan fiziksel bir özelliktir. Emme ile ilgili temel kavramlar, ilk olarak zemin bilimciler tarafından tarımsal amaçlarla ortaya atılmıştır. Bununla birlikte emmenin, doygun olmayan zeminlerin nem koşullarını tanımlayan ve mühendislik davranışlarını önemli ölçüde etkileyen temel parametrelerden biri olduğunun anlaŐılmasıyla; emme kavramı geoteknik mühendisliği alanında yaygın olarak kullanılmaya baŐlanmıŐtır (Bulut vd., 2000; 2001; Likos ve Lu, 2003).

Toplam emme terimi, zeminin su tutma davranışını etkileyen tüm mekanizmaların toplam katkılarını ifade eder. Toplam emme (zemin su potansiyeli,  $\Psi$ ) aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır (Yong ve Warkentin, 1975):

$$\Psi = \Psi_m + \Psi_{\Pi} + \Psi_g + \Psi_a + \Psi_p \quad (2.3)$$

Burada,

$\Psi_m$  - Zemin suyu ve zemin taneleri arasındaki sorbsiyon kuvvetleri ile ilgili olan matris potansiyel,

$\Psi_{\Pi}$  - Çözünenler ve su molekülleri arasındaki etkileşim kuvvetlerini ifade eden ozmotik potansiyel,

$\Psi_g$  - Gravitasyonal alandaki pozisyonu ifade eden gravitasyonal potansiyel,

$\Psi_a$  - Hava fazındaki basınçlarla ilişkili olan pnömatik (hava) potansiyeli,

$\Psi_p$  - Zemin – su sistemine dışarıdan uygulanan basınçtan doğan basınç potansiyelidir.

Toplam emme, boşluklarda tutulan zemin suyunun enerjisinin ölçümü veya zemin kütlesi tarafından zemin suyuna uygulanan çekme gerilmesinin ölçümüdür. Zemin suyunun kısmi buhar basıncı ve zemin emmesi arasında Eşitlik 2.4' te verilen termodinamik bağıntı yazılabilir (Edlefsen ve Anderson, 1943; Richards, 1965).

$$\Psi = \frac{R T}{v_{w0} \omega_v} \ln H \quad (2.4)$$

Burada,

$\Psi$  - Zemin emmesi (kPa),

$R$  - Üniversal gaz sabiti (8.31432 J/ (mol K),

$T$  - Mutlak sıcaklık (K),

$v_{w0}$  - Suyun özgül hacmi ( $m^3/kg$ ),

$\omega_v$  - Su buharının moleküler kütlesi (18.016 kg/mol),

$H$  - Bağıl nemdir.

Tam doygun durumda bağıl nem %100 olmakta ve bu durumda zemin emmesi 0 olmaktadır. Yani, zemin emmesi, %100 den küçük bağıl nem değerleri için söz konusudur (Leong vd., 2003).

İzotermal koşullar altında ve dış etkilerin olmaması durumunda; zeminlerin su tutma kapasitesinden sorumlu olan toplam emmenin, matris ve ozmotik bileşenlerinin, kısmi doygun su hareketinin tanımlanmasında yeterli olduğu düşünülmektedir (Yong, 1999).

Bu nedenle, literatürde toplam emmenin genellikle, matris ve ozmotik emme olmak üzere iki bileşenden oluştuğu kabul edilmektedir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

$$\Psi = \Psi_m + \Psi_{\Pi} \quad (2.5)$$

Burada,  
 $\Psi$  - Toplam emme,  
 $\Psi_m$  - Matris emme,  
 $\Psi_{\Pi}$  - Ozmotik emmedir.

Ridley (1993) toplam emmeyi, bir su molekülünü zemin matrisinden buharlaşma yolu ile uzaklaştırmak için gerekli enerji ölçümü; matris emmeyi ise, bir su molekülünün durum değiştirmeksizin, zemin matrisinden uzaklaştırılması için gerekli enerji ölçümü olarak tanımlamıştır.

Matris emme bileşeni (Eşitlik 2.6), zeminin geometrik konfigürasyonu, strüktür, kil tanelerinin su çekme kuvvetleri ile suyun yüzey geriliminden doğan kapilarite olayıyla ilişkilidir ve boşluk suyu basıncı ile ilişkili olduğu kabul edilir. Dolayısıyla zeminin iç yapı özelliklerini ve tane yüzeylerindeki absorpsiyon kuvvetlerini yansıtmaktadır (Edil ve Motan, 1984; Wray, 1984). Kısmi doygun zeminlerde; matris emme, zemin emmesinin en büyük bileşenidir. Zeminin toplam emmesinde meydana gelen değişiklikler, genellikle matris emmedeki değişikliklerden kaynaklanmaktadır (Krahn ve Fredlund, 1972).

$$\Psi_m = (u_a - u_w) \quad (2.6)$$

Burada,

$\Psi_m$  - Matris emme,

$u_a$  - Boşluk hava basıncı,

$u_w$  - Boşluk su basıncıdır.

Ozmotik emme (Eşitlik 2.7) ise boşluk suyundaki çözülmüş tuzlardan kaynaklanmaktadır ve basınçtan bağımsızdır (Edil ve Motan, 1984; Wray, 1984).

$$\Psi_{\Pi} = n \cdot R \cdot T \cdot c \quad (2.7)$$

Burada,

$\Psi_{\Pi}$  - Ozmotik emme,

$n$  - Bir mol tuz için molekül sayısı,

$R$  - Ünlversal gaz sabiti (8.31432 J/ (mol K)),

$T$  - Mutlak sıcaklık (K),

$c$  - Çözünenlerin konsantrasyonudur.

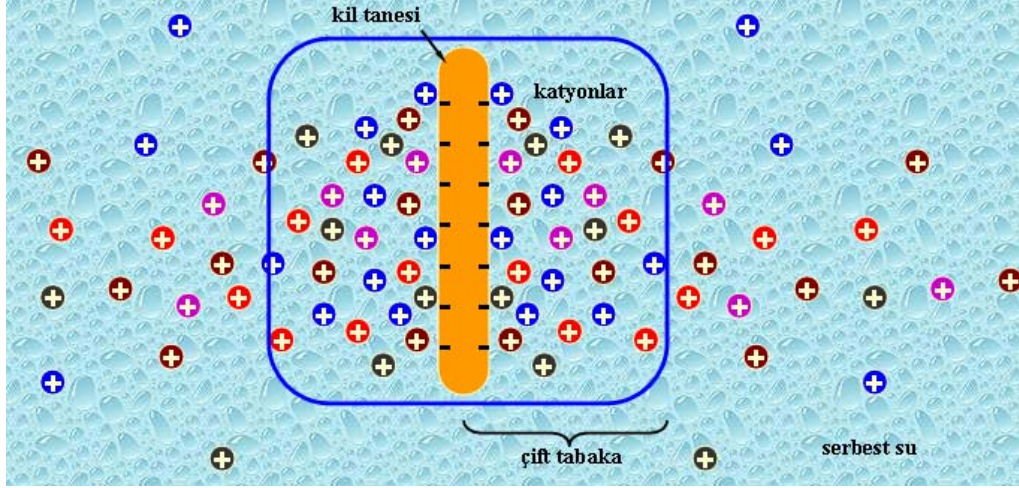
Zemin emmesinin ölçülmesi amacıyla bir çok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler, doğrudan ve dolaylı ölçüm teknikleri olarak gruplandırılabilir. Doğrudan ölçüm tekniklerinde, nem dengelenmesi için herhangi bir dış ortam kullanmaksızın zemin-su sisteminin denge durumu ölçülürken; dolaylı ölçüm tekniklerinde, nem dengelenmesi için bir dış ortam kullanılmaktadır. Bahsedilen dış ortam; filtre kağıdı, jips blok ve diğer gözenekli malzemeler gibi nem absorbe eden malzemelerden meydana gelmektedir. Bu nedenle, tensiyometreler, basınç plakası vb. metotlar, doğrudan ölçüm teknikleri; filtre kağıdı tekniği, saykrometre tekniği, elektriksel ve termal iletkenlik ölçerler ise, dolaylı ölçüm teknikleri içerisinde yer almaktadır. Bu yöntemlerden hiçbiri, tüm şartlar altında tek başına yeterli sonuçlar vermeyebilir ve her bir yöntemde bazı kısıtlamalar mevcuttur. Çizelge 2.1.'de zemin emmesinin ölçümü için kullanılan teknikler verilmiştir (Guan, 1996; Bulut ve Leong, 2005).

Çizelge 2.1. Zemin emmesinin ölçülmesinde kullanılan yöntemler

Yöntemler	Emme Bileşeni	Ölçüm aralığı
Tensiyometre ve Emme Plakası	Matris	0 – 100 kPa
Ozmotik Tensiyometre	Matris	0 – 2000 kPa
Basınç Membranı	Matris	0 – 2000 kPa
Basınç Plakası	Matris	0 – 15000 kPa
Filtre Kağıdı	Matris	50-30000 kPa
	Toplam	
Saykrometre	Toplam	100 – 30000 kPa
Elektriksel İletkenlik Ölçerler	Matris	0 – 1500 kPa
Isıl İletkenlik Ölçerler	Matris	0 – 400 kPa
Boşluk Suyu Sızdırıcı	Ozmotik	-

## 2.2. Şişme Olayının Mekanîği

Kilin şişmesi esas olarak; kil yüzeyi, iyonlar ve su arasındaki etkileşim kuvvetlerinin dengelenmesi olayıdır (Mc Bride, 1989). Kil taneleri, yüzeylerinde negatif elektrik yükü olan, pozitif yüklü köşelere sahip plakacıklardır. Negatif yükler, elektriksel kuvvetler ve plakaların yüzeyine bağlı olan zemin suyundaki katyonlar ile dengededir. Şişme, zemin-su sisteminde (Şekil 2.1. ) içsel gerilme dengesini bozan bir takım değişikliklerin sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Sıvı miktarının veya kimyasal bileşimin değişmesi sonucunda, zemin su kimyası değişmekte ve bu durum iç kuvvetleri etkilemektedir. İç elektro-kimyasal kuvvet sistemi, zemin suyundaki kapiler gerilme (matris emme) ve dışarıdan uygulanan gerilmeler arasındaki denge bozulduğunda; denge yeniden sağlanıncaya kadar, zeminde hacim değişikliği (şişme – büzülme) meydana gelmektedir (Nelson ve Miller, 1992).



Şekil 2.1. Kil – su sistemi (Sivakugan, 2001)

İç kuvvetler, kil – su sisteminde ortaya çıkan itme ve çekim kuvvetleridir. Çekim kuvvetleri; London – van der Waals kuvvetleri, negatif ve pozitif yüklü yüzeyler arasındaki Coulomb kuvvetleri, tane – katyon – tane bağları, hidrojen bağları ve çimentolanma bağlarından ileri gelmektedir. Coulomb kuvvetleri, levhalar arasındaki mesafenin karesiyle; van der Waals kuvvetleri ise mesafenin küpüyle ters orantılı olarak değişmektedir. Çekim kuvvetleri, zemin boşluklarındaki ortamdan da (dielektrik sabiti) etkilenmektedir. İtme kuvvetleri ise, adsorbe su iyonları ve su molekülleri arasındaki çift tabaka etkileşimleri ile tane yüzeyleri ve tabakalar arasındaki katyonların hidrasyonu sırasında meydana gelen hidrasyon enerjilerinden kaynaklanmaktadır. Hidrasyon kuvvetleri, moleküler düzeydeki mesafelerde etkili olmaktadır. İtme kuvvetleri, kil mineralinin yüzeyindeki değişebilir katyonların boyutundan, değerliğinden ve zemin boşluklarındaki ortamdan (dielektrik sabiti ve boşluk suyunun elektrolit konsantrasyonu) etkilenmektedir. (Van Olphen, 1963; Mesri ve Olson, 1971; Sridharan vd., 1986).

Kil mineralinin levhaları arasında bulunan adsorbe su ile kil mineralleri arasındaki etkileşim, aşağıda belirtilen birkaç farklı mekanizmayla gerçekleşmektedir (Keren ve Shainberg, 1975; Dakshanamurthy, 1978; Sposito ve Prost, 1982; Low, 1992; Komine ve Ogata, 1994,1996).

- Su, kil minerallerinin negatif yüklü silikat yüzeyleriyle etkileşir ve silikat oksijenleri ile oksijen bağları meydana gelir.
- Su, negatif yüklü kil yüzeylerine çekilen katyonlarla etkileşir. Silikat yüzeylerindeki katyonların hidrasyonu sonucunda suyun serbest enerjisi azalır. Bu suyun aktivitesi veya kimyasal potansiyeli, serbest suyunkine eşit olana kadar, su adsorpsiyonuna ve şişmeye neden olan bir itme kuvveti oluşur.
- Negatif yüklü kil yüzeylerine yaklaşıldıkça, katyon konsantrasyonu artmaktadır. Elektrostatik çekimin bir sonucu olarak, iyonların difüzyonundaki sınırlanma ve artan konsantrasyon nedeniyle, su molekülleri konsantrasyonu dengelemek için yüzeye yayılır. Suyun bu şekildeki ozmotik hareketi, bazen çift tabaka şişmesi olarak ta isimlendirilmektedir.

Sposito (1973), şişme basıncının katyonlar tarafından ortaya çıkarılan ozmotik basınçlarla ve bu nedenle çift tabaka teorisi ile ilişkili olduğunu belirtmiştir. Bununla birlikte Low ve Marqheim (1979), şişme basıncının esasen tabakalar arası suyun, komşu kil tabakasının yüzeyleriyle etkileşiminin bir sonucu olarak potansiyel enerjisindeki azalmadan ileri geldiğini ve ozmotik basınçların etkisinin düşük olduğunu öne sürmüşlerdir.

Borchardt (1989), yüksek su muhtevasına ve büyük tabakalar arası mesafeye sahip ortamlarda, çift tabaka teorisinin zemin şişmesini en iyi açıklayan teori olduğunu ileri sürmüştür. Bununla birlikte, düşük – orta tabakalar arası mesafelerde, büyük ölçüde değişen yük yoğunluklarına sahip birkaç montmorillonit, potansiyel enerji azalma teorisini destekleyen şekilde hemen hemen aynı şişme basınçları üretmişlerdir (Viani vd. 1983; Oloo ve Fredlund, 1995).

Tabakalar arası katyonların rehidrasyonu sırasında binlerce bar (1 bar = 1.0194 kg/cm<sup>2</sup>) mertebesinde basınç meydana gelebilmektedir. Tabakalar arasına üç-dört su tabakası girdikten sonra, yani tabakalar arası mesafe 1nm (10<sup>-9</sup>m-10Å)' yi aştığında

yüzey hidrasyonunun önemi azalmakta ve elektriksel çift tabaka etkisi en önemli şişme mekanizması haline gelmektedir (Van Olphen, 1963; Bradbury ve Baeyens, 2003).

Literatürde, zeminlerin hacim artışı ile ilgili olarak verilen diğer mekanizmalar ise; yük boşalması sonucunda kristallerin elastik esnemesi nedeniyle meydana gelen genişleme ve zeminde ıslanmanın ilerlemesi sırasında sıkışan havadaki basınçtan ileri gelen şişme olarak sıralanabilir (Terzaghi, 1927; Emerson, 1964; Parker vd., 1980;1982).

### 2.3. Şişme Davranışına Etki Eden Faktörler

Bir zeminin şişme davranışını etkileyen faktörler, esasen üç farklı grupta ele alınmaktadır. Bunlar, içsel kuvvet alanının esas doğasına etki eden zemin özellikleri, içsel kuvvet sisteminde meydana gelen değişimlere etki eden çevresel faktörler ve gerilme durumu olarak sıralanabilir. Nelson ve Miller (1992) zeminlerin şişme potansiyeli üzerinde etkili olan bu faktörleri, Çizelge 2.2., 2.3. ve 2.4.'te görüldüğü şekilde özetlemişlerdir.

Çizelge 2.2. Şişme potansiyelini etkileyen zemin özellikleri (Nelson ve Miller, 1992)

<i>Faktör</i>	<i>Tanım</i>
Kil mineralojisi	Zemin hacim değişikliklerine neden olan mineraller, genellikle, montmorillonitler, vermikülitler vb. minerallerdir. İllit ve kaolinitler genellikle, tane boyutlarının çok küçük olduğu durumlarda şişebilirler.
Zemin su kimyası	Artan katyon konsantrasyonu ve katyon değeri, şişmeyi engeller. Örneğin, zemin suyu içerisindeki $Mg^{2+}$ katyonları, $Na^+$ katyonlarından daha az şişmeye neden olur.
Zemin strüktürü ve fabrik	Floküle olmuş killer ayrık killerden daha fazla şişme eğilimindedir. Çimentolanma şişmeyi azaltır. Yüksek su muhtevalarında sıkıştırma veya yoğurma sonucunda fabrik ve strüktür değişir. Yoğurarak sıkıştırma, düşük su muhtevalarında statik olarak sıkıştırmadan daha düşük şişme potansiyeli ile ayrık strüktürler oluşturduğu göstermiştir.
Zemin emmesi	Zemin emmesi, doymamış zeminlerde negatif boşluk basıncıyla ifade edilen, bağımsız efektif gerilme değişkenidir. Doğunluk, yer çekimi, boşluk boyutu ve şekli, yüzey gerilmesi, zemin tanelerinin elektriksel ve kimyasal karakteristikleri ve suya bağlıdır.
Plastisite	Genel olarak, geniş bir su muhtevası aralığında plastik davranış gösteren ve yüksek likit limite sahip zeminler daha yüksek şişme ve büzülme potansiyeline sahiptir.
Kuru birim hacim ağırlık	Yüksek birim hacim ağırlıklar, tanelerin birbirine yaklaştığını gösterir ki bu da taneler arasında daha büyük itki kuvvetleri ve daha yüksek şişme potansiyeli anlamına gelir.



Çizelge 2.3. Şişme potansiyelini etkileyen çevresel faktörler (Nelson ve Miller, 1992)

<i>Faktör</i>	<i>Tanım</i>
Başlangıç nem durumu	Kurumuş şişebilen bir zeminin suya eğilimi veya emmesi, yüksek su muhtevasındaki aynı zeminden daha fazladır.
Nem değişimleri	Nemdeki değişiklikler, esas olarak iklim, yeraltı su seviyesi, drenaj ve yapay su kaynakları, bitkiler, permeabilite ve sıcaklıktan etkilenir.

Çizelge 2.4. Gerilme koşullarının şişme potansiyeli üzerindeki etkisi (Nelson ve Miller, 1992)

<i>Faktör</i>	<i>Tanım</i>
Gerilme tarihçesi	Aşırı konsolidasyon oranı, tekrarlı ıslanma-kuruma ve yaşlanmanın, şişme üzerinde önemli etkileri vardır.
Arazi şartları ve zemin profili	Bir zemindeki başlangıç gerilme durumunun, şişme potansiyeline sahip tabakaların yeri ve kalınlığının, zeminin şişmesi üzerinde önemli etkileri vardır.
Yükleme	Sürşarj yükü, taneler arası itki kuvvetlerini dengelemeye çalışır ve şişmeyi azaltır.

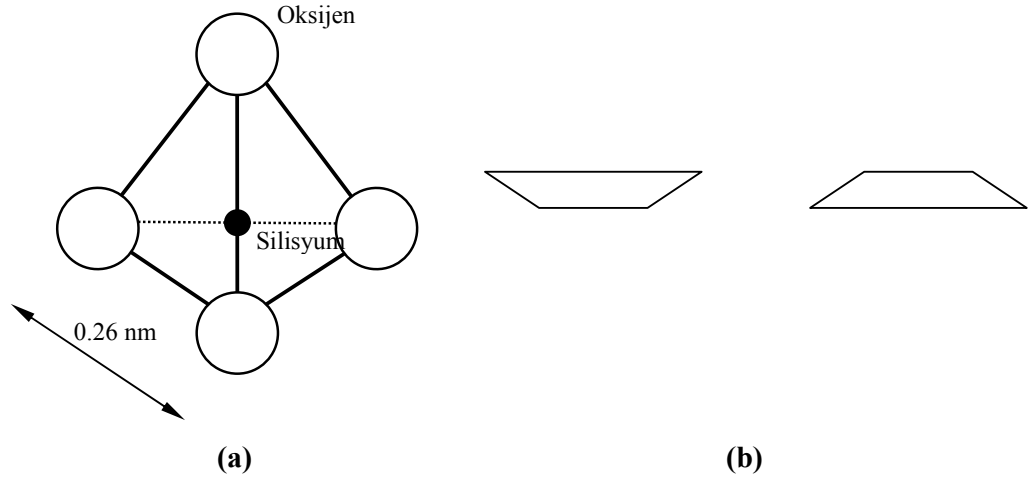
### 2.3.1. Zemin Özellikleri

#### 2.3.1.1. Kil Mineralojisi

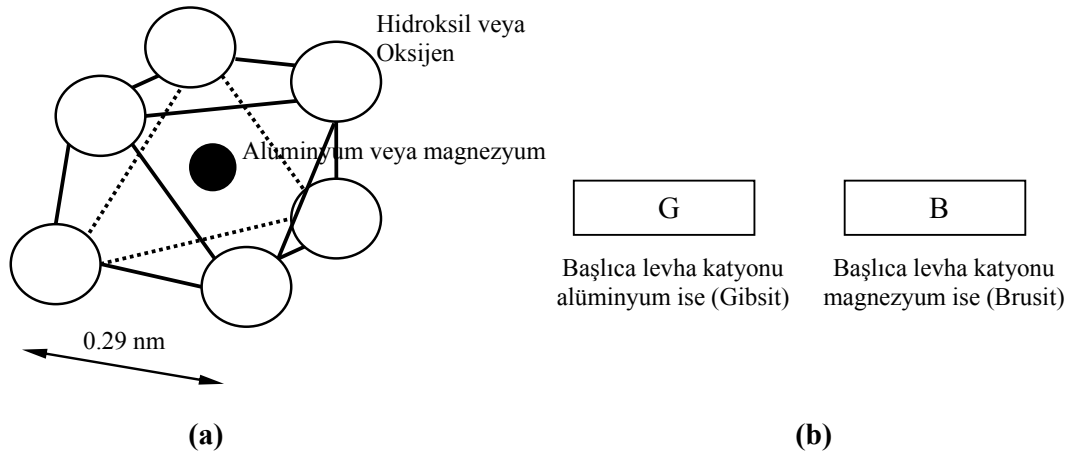
Killer, tane boyutları 2 mikron veya daha küçük olan, hidratlı alüminyum veya magnezyum silikatlardan oluşan ikincil minerallerdir. Şişen killer, bol miktarda silikat mineralleri içeren, bazik – ultra bazik volkanik kayaların, metamorfik kayaların, kumtaşı ve şeyllerin atmosfer etkilerine maruz kalması, oksidasyon-redüksiyon, hidrasyon-dehidrasyon, iyon değişimi, taşınma vb. jeolojik süreçler sonucunda meydana gelmektedir (Keller, 1964; Van Der Merwe 1964; Shi vd. 2002).

Her kil minerali; iki, üç veya dört levhadan oluşan birim hücrelere sahiptir. İki levhalı mineraller bir silis levhası (tetrahedral – dört yüzlü) ve bir oktahedral (sekiz yüzlü) levhadan oluşmaktadır. Şekil 2.2. de, tetrahedral silis levhasının strüktürü ve basitleştirilmiş çizimi görülmektedir. Şekil 2.3. de ise oktahedral tabakanın strüktürü ve basitleştirilmiş çizimi verilmiştir. Üç levhalı mineraller ise, iki silis levhası arasında sıkışmış dioktahedral (tabaka katyonu iki değerlikli:  $Mg^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ) veya trioktahedral (tabaka katyonu üç değerlikli:  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Cr^{3+}$ ) levhadan oluşur. Dört

levhali mineraller, 2:1 tabaka + bir tabaka arası hidroksit levhasından oluşur (Mitchell,1976).



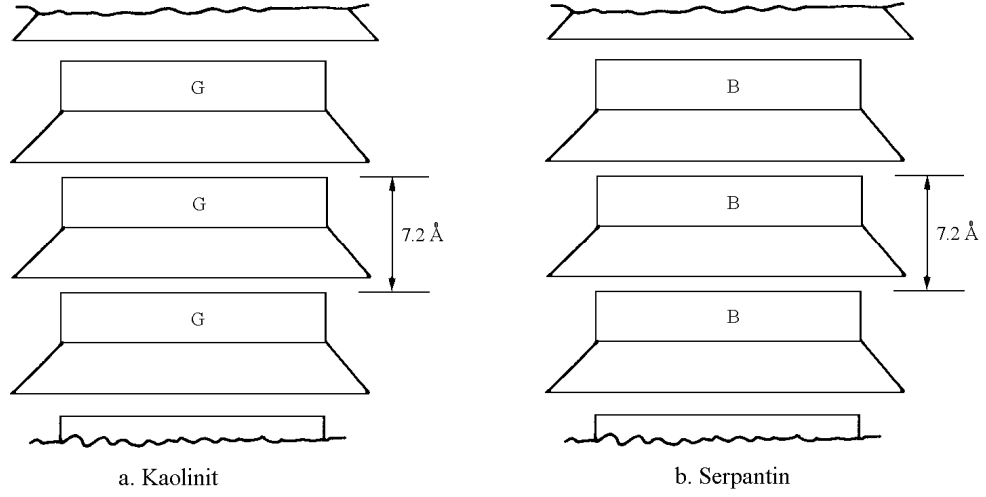
Şekil 2.2. (a) Silis levhasının strüktürü, (b) Silis levhasının basitleştirilmiş çizimi (Sivakugan, 2001).



Şekil 2.3. (a) Oktahedral levhanın strüktürü, (b) Oktahedral levhanın basitleştirilmiş çizimi (Sivakugan, 2001).

Kaolinitin yapısal formülü,  $(OH)_8 Si_4 Al_4 O_{10}$  şeklindedir. Tabakalar arasındaki bağlar van der Waals kuvvetleri ve hidrojen bağlarından oluşmaktadır. Bu bağlar, şişme

meydana gelmeyecek kadar kuvvetlidir (Mitchell, 1976). Şekil 2.4. te kaolinit – serpantin grubu kil minerallerinin genel yapısı, Şekil 2.5 te tipik bir kaolinitin tarayıcı elektron mikroskopuyla (SEM) elde edilmiş görüntüsü verilmiştir.

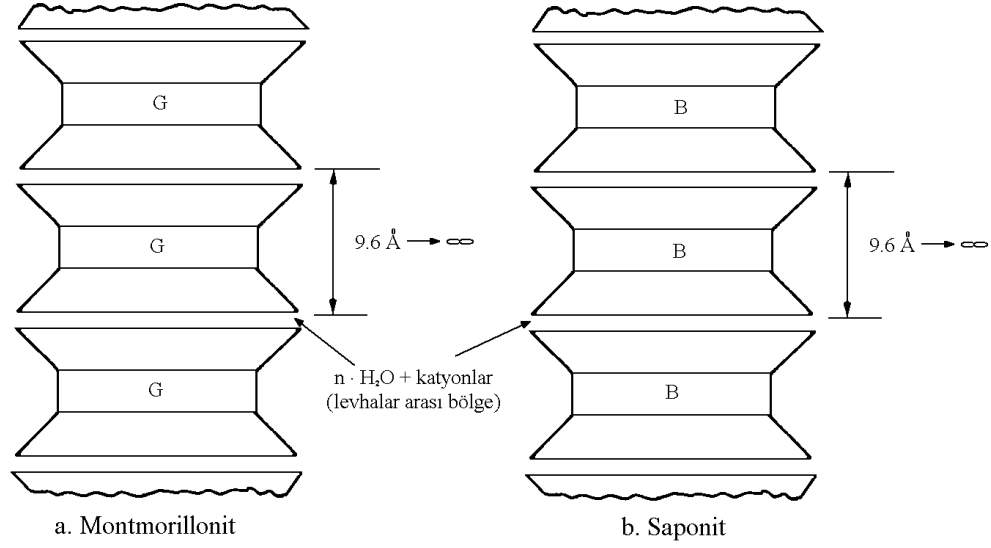


Şekil 2.4. Kaolinit-Serpantin grubu minerallerin yapısı (Mitchell,1976)

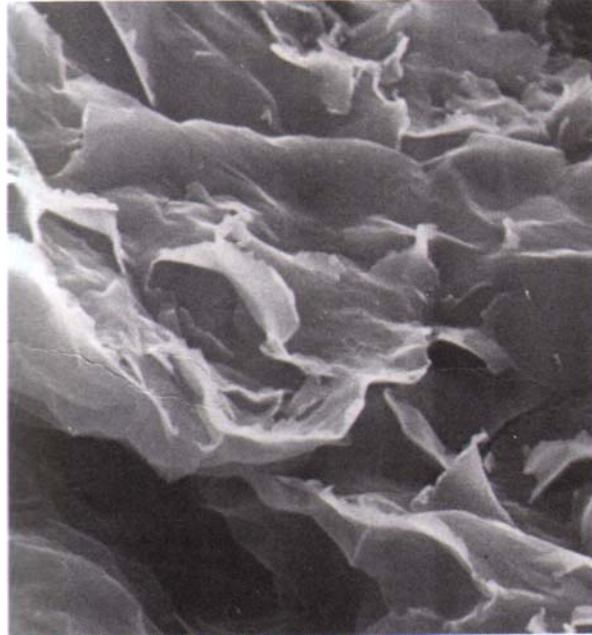


Şekil 2.5. Kaolinitin elektron fotomikrografı (17µm) (Mitchell, 1976)

Smektit mineralleri, iki silis levhası arasına sıkışmış oktahedral levhadan oluşan yapıya sahiptir (Şekil 2.6.). Kimyasal bileşimleri,  $(OH)_4 Si_8 Al_4 O_{20} \cdot n H_2O$  şeklindedir. Tabakalar arası bağlar, van der Waals kuvvetlerinden ve yapıdaki yük eksikliğini dengelemek için bulunan katyonlardan ileri gelmektedir. Bu bağlar zayıftır ve su veya diğer polar sıvıların adsorbsiyonu ile kolaylıkla kırılabilir. Bu nedenle smektit mineralleri çok yüksek hacim artışları gösterirler.

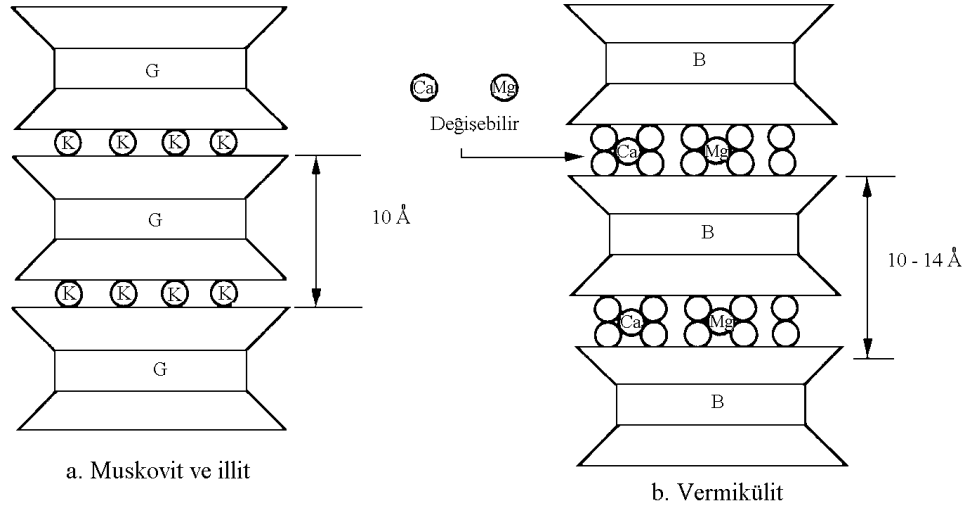


Şekil 2.6. Smektit minerallerin yapısı (Mitchell,1976).

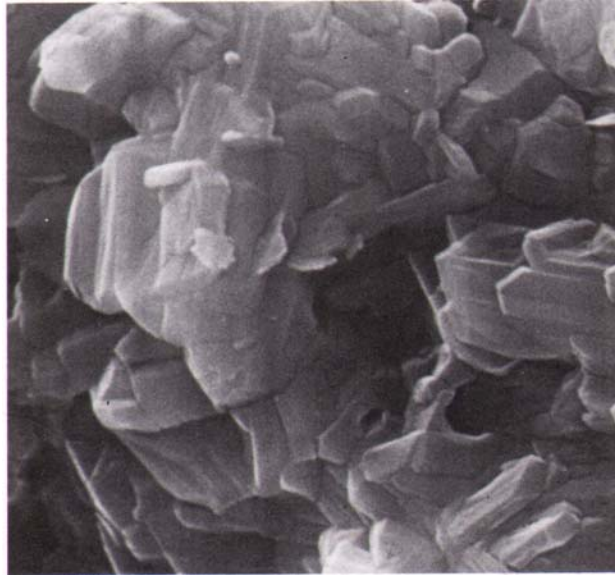


Şekil 2.7. Montmorillonitin tipik elektron fotomikrografı (7.5  $\mu m$ )(Mitchell, 1976)

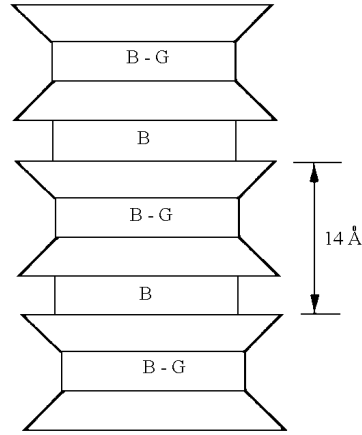
Şekil 2.8.'de mika benzeri kil minerallerinin genel yapısı, görülmektedir İllit ve vermikülit, zeminlerde yaygın olarak karşılaşılan kil minerallerindendir. İllit mineralinde, potasyum tarafından sağlanan tabakalar arası bağ, polar sıvıların mevcut olması durumunda, bazal mesafenin sabit kalmasına (şişmenin engellenmesine) yetecek kadar kuvvetlidir (Mitchell, 1976).



Şekil 2.8. Mika benzeri kil minerallerinin yapısı (Mitchell,1976).



Şekil 2.9. İllitin tipik elektron fotomikrografı (7.5 µm) (Mitchell, 1976)



Şekil 2.10. Klorit minerallerinin yapısı (Mitchell,1976).

Klorit minerallerinin yapısı değişmiş mika benzeri veya brusit benzeri tabakalardan oluşmaktadır (Şekil 2.10.). Mika tabakaları arasındaki çift su tabakasının yerini oktahedral levhanın almış olması dışında, vermikülitlerin yapısına benzerdir.

Yüzey aktivitelerinin ve moleküler yapılarının bir sonucu olarak; kil mineralleri, yüzeylerine dipolar su moleküllerini ve çeşitli katyonları çekme kabiliyetine sahiptir. Bu nedenle, şişme yeteneği, kil mineral tipine ve mevcut değişebilir katyona önemli ölçüde bağlıdır. Farklı kil mineralleri, yapılarındaki ve tabakalar arası bağlanmalarındaki değişiklikler nedeniyle farklı şişme potansiyelleri gösterirler. Smektit ve vermikülitler, ıslanma ve kuruma sonucunda büyük hacim değişimlerine neden olurlar. Bu hacim değişimleri, illitlerde orta, kaolinitlerde ise daha düşük seviyededir (Head, 1992; Ohri, 2003).

Verwey ve Overbeek (1948), çalışmalarında, elektriksel çift tabaka içindeki ve dışındaki iyonların konsantrasyonundaki farklılıklardan dolayı artan ozmotik basıncın; montmorillonitlerin şişme miktarının, diğer kil minerallerine oranla çok daha fazla olmasına neden olduğunu belirtmişlerdir (Sridharan ve Choudhury, 2002).

El-Sohby ve Mazen (1983) zeminlerin şişme davranışı üzerinde, mineralojik özelliklerin etkisini vurgulamışlardır. Çalışmada, kilin mineralojik özelliklerinin

belirlenmesinde; serbest şişme indisi ve aktivitenin dolaylı yöntemler olarak kullanılabilmesi ifade edilmiştir.

Schafer ve Singer (1976) şişme potansiyeli açısından kil tipinin, kil yüzdesine göre daha önemli bir parametre olduğunu belirtmiştir. Karathanasis ve Hajek (1985), smektit miktarının, laboratuarda ölçülen şişme potansiyeli üzerinde etkin bir zemin parametresi olduğunu vurgulamışlardır. Chen (1988) şişme miktarının, şişmeye izin verilen süre ve kilin orijinine bağlı olduğunu ifade etmiştir.

Kaczynski ve Grabowska-Olszewska (1997), Polonya’da bulunan kil gruplarının şişme davranışını değerlendirerek; killerin orijinlerinin, startigrafik pozisyonlarının, litolojilerinin ve mineral bileşimlerinin şişme davranışı üzerindeki önemini vurgulamışlardır.

Azam (1998; 2003), doğal kalkerli şişen zeminlerin içerdikleri kalsiyum sülfat formlarının (jips, basanit ve anhidrit) ve miktarlarının, şişme davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Kilin bileşimindeki kalsiyum sülfat miktarının artmasıyla, şişme potansiyelinin azaldığını ve bu etkinin jips içeren zeminlerde daha belirgin olduğunu ifade etmiştir.

Mohamed (2000), marl içeren zeminlerin kireç veya çimento ile stabilizasyonu sonucunda, uygun ortam koşullarının da var olması durumunda, şişen bir mineral olan etringit mineralinin oluşabileceğini vurgulamıştır. Çalışmada, bu şekilde hazırlanan zemin numunesi üzerinde yapılan şişme deneyleri sonucunda, yapay etringit mineralinin %50 civarında şişme yüzdesine sahip olduğu gözlenmiştir.

### **2.3.1.2. Zemin Suyunun Kimyasal Bileşimi**

Boşluk sıvısının kimyasal bileşimindeki değişiklikler, killere üzerinde farklı etkilere yol açmaktadır. Bu kimyasal değişiklikler, mineralojik birimler arasındaki katyonlarda, farklı plakalar arasında etki eden elektro-kimyasal kuvvetlerde ve ozmotik basınçta değişikliklere neden olabilmektedir. Farklı birimler arasındaki

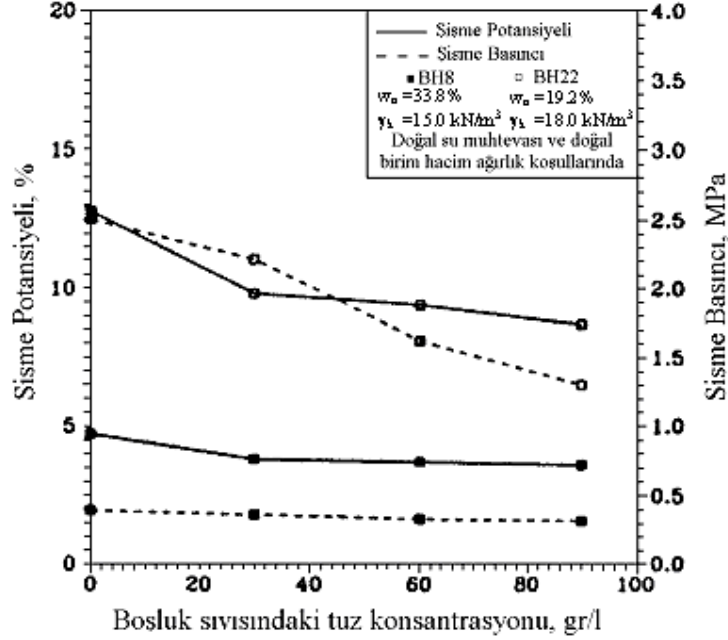
mesafe; araya giren katyonların değerklerine, boyutlarına ve hidrasyon durumlarına bağlıdır. Çözeltinin iyonik gücü; mikro boşlulardaki ozmotik basıncın yanında, farklı taneler arasındaki itme kuvvetlerini de kontrol etmektedir (Musso vd., 2003).

Boşluk suyunda elektrolit bulunması, kil tanelerinin yüzeylerinde değışimlere neden olmaktadır. Boşluk suyunda tuz konsantrasyonunun artması sonucunda, taneler hızla topaklanmakta ve dolayısıyla tane boyutu artmaktadır. Topaklanan tane boyutunun artmasıyla toplam yüzey alanı ve bunun sonucunda absorbe edilen su miktarı azalmaktadır. Dolayısıyla şişme potansiyeli azalmaktadır. Ayrıca, kil yüzeylerindeki katyonlar ile boşluk suyunda bulunan katyonlar arasında katyon değışimi meydana gelmektedir. Bu durum levhalar arasına su girişini engelleyerek, şişme yeteneğinin azalmasına neden olmaktadır (Mowafy vd., 1985).

Boşluk sıvısının iyonik konsantrasyonu ve boşluk sıvısındaki iyonların değeri, bir kilin hacimsel davranışını önemli ölçüde etkileyen iki önemli kimyasal değışimdir. İyonik konsantrasyonunun artması sonucunda, ozmotik basınç farkında bir azalma meydana gelir. Böylelikle, çift tabaka bölgesindeki su dışarı çıkmaya başlar. Çift tabakadan suyun akışı, birim tabakalar arasındaki mesafenin azalmasına ve kilin sıkışmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, boşluk sıvısında iyonik konsantrasyonunun azalması sonucunda kil sistemi şişmektedir. Boşluk sıvısındaki iyonların değeri ile çift tabaka kalınlığı ters orantılıdır. Boşluk sıvısında daha düşük değerkli katyonların olması durumunda çift tabaka kalınlığı artmakta ve bu durum da zeminin şişmesine neden olmaktadır (Di Maio, 1996).

Yong ve Warkentin (1975) özellikle, tek değerkli değışebilir katyonlara sahip yüksek şişme potansiyeli bulunan killerde, boşluk sıvısındaki tuz konsantrasyonundaki artışın şişme potansiyelini önemli ölçüde azalttığını vurgulamışlardır. Bununla birlikte, Basma ve Al-Sharif (1994) çalışmalarında, boşluk suyundaki tuz konsantrasyonu belli bir değeri aştıktan sonra, şişme potansiyeli üzerindeki etkisinin azalma eğiliminde olduğunu vurgulamışlardır. Bu durum Şekil 2.11.' de grafik olarak gösterilmiştir.

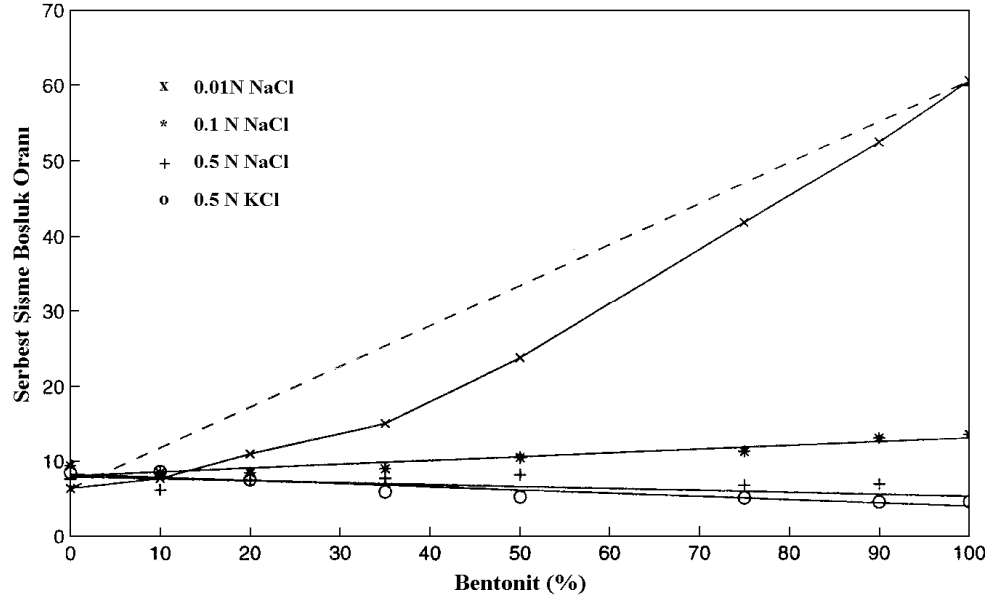




Şekil 2.11. Boşluk sıvısındaki tuz konsantrasyonunun şişme potansiyeli ve şişme basıncı üzerindeki etkisi (Basma ve Al-Sharif, 1994)

Sridharan vd. (1990), serbest şişme indisi deneyleri sırasında, boşluk suyu elektrolit konsantrasyonundaki artışın; kaolinit zeminlerde çökelti hacminde artışa, montmorillonit zeminlerde ise tam tersi bir etkiye neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Kaolinit zeminlerde boşluk suyu elektrolit konsantrasyonundaki artış daha topaklanmış yapıya ve bu nedenle yüksek çökelti hacmine neden olurken; montmorillonit zemin durumunda elektriksel çift tabaka kalınlığının azalmasına ve bu nedenle daha küçük çökelti hacmine neden olmaktadır.

Sivapullaiah ve Savitha (1999), illit – bentonit karışımlarının likit limit, plastisite indisi ve serbest şişme indisi değerlerinin, farklı elektrolit çözeltilerindeki değişimlerini incelemişlerdir. Çalışmada boşluk sıvısı olarak, 0.1 N NaCl, 0.5 N NaCl ve 0.5 N KCl elektrolit çözeltileri kullanılmıştır. Saf suda bentonit tanelerinin çökmesi uzun zaman aldığından, denge çökelti hacminin elde edilmesinde, su yerine 0.01 N NaCl kullanıldığı belirtilmiştir. Karışımdaki bentonit oranı ile farklı elektrolit çözeltilerinde elde edilen serbest şişme boşluk oranı ilişkisi, Şekil 2.12.'de görülmektedir.



Şekil 2.12. Elektrolit konsantrasyonunun illit-bentonit karışımlarının serbest şişme boşluk oranı üzerindeki etkisi (Sivapullaiah ve Savitha, 1999)

Çalışmanın sonucunda, suda illit – bentonit tanelerinin etkileşmesi nedeniyle, beklenen modifiye serbest şişme indisinden daha küçük değerler ortaya çıkabileceği vurgulanmıştır. Sudaki elektrolit konsantrasyonunun artmasıyla illit – bentonit taneleri arasındaki etkileşim azalmaktadır. Elektriksel çift tabaka kalınlığının azalması nedeniyle bentonitin aktivitesi düşerken, illitin aktivitesi elektrolit konsantrasyonundan etkilenmemektedir. 0.5 N NaCl çözeltisinde illitin serbest şişme indisi bentonitinkinden daha büyüktür. Aynı konsantrasyondaki KCl çözeltisinde ise elektrolit konsantrasyonunun artmasının yanında, birim tabakalar arasındaki K bağlanmaları nedeniyle modifiye serbest şişme indisi değeri daha fazla azalmaktadır (Sivapullaiah ve Savitha, 1999).

Jullien vd. (2002), Fo-Ca kili üzerinde yürüttükleri şişme basıncı deneyleri sırasında, saf su yerine  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  çözeltisi kullanılmasının deney sonuçları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak çözeltideki Cu iyonlarının artmasıyla kilin şişme kabiliyetinin azaldığını ifade etmişlerdir.

### 2.3.1.3. Zemin Mikrostrüktürü ve Fabrik

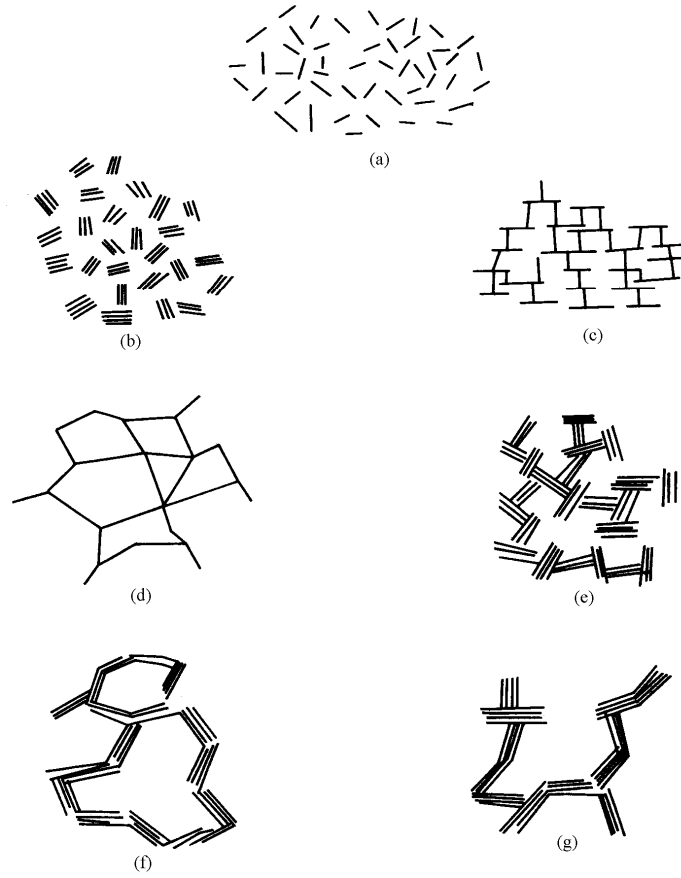
Brewer (1964) kil strüktürünü, zemin tanelerinin ve boşluklarının boyutu, şekli ve dizilimi olarak tanımlamıştır. Fabrik terimi ise genellikle zemin tanelerinin dizilimini ifade etmek için kullanılmaktadır.

Zeminlerin mühendislik davranışı mikrofabrik, mineralojik bileşim ve taneler arasındaki kuvvetleri kapsayan mikrostrüktürden etkilenir. Zeminlerin mühendislik davranışı üzerinde mikrofabriğin etkisi, ilk olarak; aynı kilden hazırlanan eşit başlangıç koşullarına sahip iki zemin numunesinin, tane düzenlerindeki farklılıklar nedeniyle farklı şişme basınçları gösterebileceğini vurgulayan Terzaghi (1931) tarafından ortaya konmuştur (Al-Rawas, 1999; Al-Rawas ve McGown, 1999).

Van Olphen (1963), killerde tane birleşmelerini; dispers (kil taneleri yüz – yüze dizilim göstermezler), kümelenmiş (birkaç kil tanesi yüz – yüze dizilir ve kümelenir), flokülleşmiş (taneler köşe – köşeye veya köşe – yüze dizilir), deflokülleşmiş (taneler arasında bir bağlılık yoktur) olmak üzere kategorize etmiştir (Şekil 2.13.).

Zemin tanelerinin oryantasyonu ve bu nedenle zemin strüktürü, zeminlerin şişme potansiyeli üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Zemin numunesinin hazırlanmasında kullanılan kompaksiyon yöntemi, zemin strüktürünü direkt olarak etkilemektedir. Statik kompaksiyon durumunda zemin strüktürü daha topaklanmış (flokülleşmiş) bir yapıya sahip iken, dinamik kompaksiyon sonucunda zemin yapısı ayırık (dispers) olabilir. Floküllü strüktüre sahip bir zeminde, ayırık strüktüre sahip zemine oranla daha fazla şişme gözlenmektedir (Gromko, 1974).

Yük boşalması veya boşluk suyu basıncındaki artış sonucunda, efektif gerilmede meydana gelen azalmaya bağlı olarak ince taneli zeminlerin şişmesi strüktür ile doğrudan ilgilidir. Örneğin, optimum su muhtevasının kuru tarafında sıkıştırılan şişme potansiyeline sahip bir zemin, aynı birim hacim ağırlıkta optimum su muhtevasının ıslak tarafında sıkıştırılan zeminden daha fazla şişebilir (Seed ve Chan, 1959).



Şekil 2.13. Killerde muhtemel tane dizilim şekilleri: (a) dispers ve defloküle edilmiş (b) kümelenmiş ve defloküle edilmiş (c) Köşe – yüz flokülleşmiş ve dispers. (d) Köşe – köşe flokülleşmiş fakat ayrık. (e) Köşe – yüz flokülleşmiş ve kümelenmiş. (f) Köşe – köşe flokülleşmiş ve kümelenmiş. (g) Köşe – yüz ve köşe – köşe flokülleşmiş ve kümelenmiş. (Van Olphen, 1963).

Tane diziliminin şişme üzerindeki etkisi, kil tipine bağlıdır. Sodyum montmorilloniti gibi yüksek şişme potansiyeline sahip killer için paralel tane oryantasyonu durumunda en büyük şişme gözlenir. Bununla birlikte, Seed ve Chan (1959) en büyük şişme basıncı ve hacim artışının rasgele ve flokülleşmiş tane dizilimi durumunda meydana geldiğini belirtmişlerdir (Yong ve Warkentin, 1975).

Şişme esasen kil tanelerinin yassı yüzeylerine dik doğrultuda meydana gelmektedir. Bu nedenle, şişme ve büzülme davranışı tanelerin tam yönelmiş olduğu killer için anizotropiktir. Düşey doğrultuda meydana gelen şişme ve şişme basınçları yatayda meydana gelenden daha küçüktür (Yong ve Warkentin, 1975).

Zemin oluşumu jeolojik tarihçenin ve gerilme deformasyon tarihçesinin bir sonucudur. Uzun süreli ve karmaşık doğal olaylar sonucunda, zemin kütlelerinde yapısal mukavemet ve zemin taneleri arasında kuvvetli bağlar meydana gelir. Bu durum şişmeyi kısmen engeller. Bununla birlikte, laboratuarda ufalanan, yoğrulan ve sonra sıkıştırılan zeminde orijinal strüktür tahrip olur, doğal strüktürel mukavemet azalır ve böylece şişme kolaylaşır. Bu doğal bağlar ve tane dizilimi; şişme-büzülme, yükleme-boşaltma gibi çeşitli mekanizmalarla da bozulabilir. Özellikle yaşlı ve aşırı konsolide killer, şişmeye karşı hassas olabilir (Du vd.1999).

Yaşlanma etkileri ile ilgili olarak yürütülen çalışmalarda, zamanla tanelerin yeniden dizildiği ve bağların oluştuğu belirtilmiştir (Bjerrum ve Lo, 1963; Wesley 1990).

Nalzeny ve Li (1967) ve Day (1994) ödometrede,  $K_0$  koşulları altında yapılan çalışmalarda, yaşlanma sonucunda şişme potansiyelinde azalma olduğu sonucuna varmışlardır. Buna karşın, Kassif ve Baker (1971) üç eksenli deney sisteminde, sabit çevre basıncı altında yaşlanma sonucunda şişme potansiyelinde kararlı olmayan artma ve azalma eğilimi gözlemlendiği vurgulanmıştır. Rao ve Tripathi (2003), bu durumun çalışmalarda kullanılan farklı deney ekipmanları ve prosedürlerinden kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir.

Du vd. (1999) sıkıştırılmış zeminlerin şişme davranışları üzerinde su muhtevası, kuru birim hacim ağırlık, mineralojik yapı ve fabrikteki değişimlerin etkisini incelemişlerdir. Örselenmemiş ve yoğrulmuş zeminlerin şişme davranışlarındaki farklılıkların, esasen sıkıştırma (yoğurma) sırasında doğal çimentolanma bağlarının kırılması ve fabriğin değişmesinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Ayrıca sadece smektit ve illit gibi hidrofilik kil minerallerine sahip olan zeminlerin, sıkıştırma sonucunda şişebilir hale getirilebileceğini vurgulamışlardır.

Rao ve Tripathy (2003) likit limiti %100 olan bir zeminin şişme davranışı üzerinde kür süresinin etkisini incelemişlerdir. Sıkıştırılarak hazırlanan numuneler farklı bağıl nem koşullarını sağlamak için, içinde farklı konsantrasyonlarda sülfürik asit bulunan cam desikatörlerde 7, 15, 30 ve 90 gün bekletilmiştir. Sonra, bu numuneler üzerinde

bir boyutlu ödometre şişme deneyleri yapılmıştır. Bekleme süresindeki artışın şişme potansiyelinde azalmaya neden olduğu gözlenmiştir. Çalışmada, yaşlanma davranışına etki eden başlıca faktörlerin; başlangıç doygunluk derecesi ve su muhtevası olduğu belirtilmiştir. Aynı kuru birim hacim ağırlık için su muhtevastaki artış sonucunda yaşlanma etkisinin arttığı; sabit su muhtevastında doygunluk derecesindeki artışla etkinin daha önemli hale geldiği vurgulanmıştır.

Sridharan ve Gurtug (2004) çalışmalarında, fiziksel ve mineralojik özellikleri birbirinden farklı beş zeminin şişme davranışını incelemiştir. Zemin numunelerinin hazırlanmasında üç farklı kompaksiyon enerjisi (standart proktor-593.7 kJ/m<sup>3</sup>, modifiye proktor-2693.3 kJ/m<sup>3</sup>, azaltılmış modifiye proktor-1616 kJ/m<sup>3</sup>) kullanılmıştır. Şişme testleri geleneksel ödometre aletine yürütülmüştür. Çalışma sonucunda, şişme yüzdesi ile şişme basıncı arasında zemin tipi ve kompaksiyon enerjisinden bağımsız bir ilişkinin var olduğu belirtilmiştir. Yaklaşık 1000 kPa şişme basıncına kadar aşağıdaki ilişki verilmiştir.

$$P_s = 48.32 * S \quad (r=0.98) \quad (2.8)$$

Burada,  
 $P_s$  - Şişme basıncı (kPa),  
 $S$  - Şişme yüzdesidir.

Ayrıca şişme yüzdesi ve şişme basıncının, kompaksiyon enerjisindeki artış sonucunda zemin tipine bağlı olarak 3-12 kat lineer olarak arttığı vurgulanmıştır.

#### **2.3.1.4. Kıvam Limitleri**

Plastisite indisi, mevcut kil mineralinin tipi, miktarı ve kil boyutundaki tanelerin oryantasyonu ile ilişkilidir. Diğer faktörlerin sabit kalması durumunda, kil mineral miktarıyla artar, kil minerallerinin paralel oryantasyonunun derecesiyle azalır, kil tanelerinin boyutuyla azalır.

Kuru şişen killer, kuru ve şişmeyen killere göre plastik hale gelmeden önce çok daha büyük miktarlarda su adsorbe edebilirler. Ayrıca, şişen killer genellikle, daha geniş bir su muhtevası aralığında plastik kalırlar, yani plastisite indisleri daha yüksektir. Ancak bu durum, tüm yüksek plastisiteli killerin, şişen bir zemin olduğunu göstermemektedir.

Kıvam limitleri, pek çok araştırmacı tarafından şişen zeminlerin tanımlanmasında kullanılmıştır (Seed vd., 1962; Chen, 1988). Sridharan ve Rao (1988), doğal kaolinit ve montmorillonit zeminlerin şişme potansiyellerinin tahmin edilmesinde kıvam limitleri ve aktivite gibi indeks özelliklerinin kullanılmasındaki bilimsel temeli incelemişlerdir. Yazarlar, 18 farklı zemin numunesi üzerinde yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda; montmorillonit içeren zeminlerde indeks özelliklerini ve şişmeyi kontrol eden mekanizmaların benzer olduğunu ve bu nedenle bu tür zeminlerin şişme potansiyellerinin tahmininde indeks özelliklerinin kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Kaolin zeminlerde ise indeks özelliklerinin elektriksel çift tabaka etkisinin bir fonksiyonu olmadığını ifade etmişlerdir. Bu nedenle de kaolin içeren zeminlerde şişme potansiyelinin tahmin edilmesinde, indeks özelliklerinin kullanılmasının bilimsel olmayacağına dikkat çekmişlerdir.

Büzülme ve şişme arasında nitel bir ilişkinin var olduğu inancı, çeşitli araştırmacılar (Holtz ve Gibbs, 1956; Altmeyer, 1955) tarafından rötre limitinin zeminin şişme potansiyelini gösteren bir parametre olarak kullanılmasına neden olmuştur. Bununla birlikte, literatürde şişme potansiyeli ile rötre limiti arasında güçlü ve tutarlı bir ilişkinin bulunmadığını gösteren bir çok çalışma mevcuttur (Seed vd., 1962; Snethen, 1984; Chen ve Ma, 1987; Sridharan ve Prakash, 1998).

Sridharan ve Prakash (1998) zeminlerin büzülme limitini kontrol eden mekanizmaları incelemişler ve şişme potansiyelinin esasen zemin plastisitesi ve kil mineral tipinden etkilendiğini, rötre limitinin ise farklı boyuttaki zemin tanelerinin birbirlerine göre oranları tarafından kontrol edildiğini ifade etmişlerdir. Araştırmacılar, çalışmanın sonucunda, şişmeyi ve büzülme kontrol eden faktörlerin birbirinden tamamen farklı olması nedeniyle, bir zeminin şişme potansiyelinin

tahmin edilmesinde büzülme limitinin kullanılmasının uygun sonuçlar vermeyeceğini belirtmişlerdir.

### 2.3.1.5. Aktivite

Zemin aktivitesi genellikle, değişen nem koşulları altında zeminin su alma ve verme kabiliyeti için kullanılan bir terimdir. Kıvam limitleri, metilen mavisi absorpsiyonu ve katyon değiştirme kapasitesi gibi zeminin fiziksel özelliklerinden belirlenebilmektedir.

Skempton (1953) plastisite indisi ile kil yüzdesini, aktivite ( $A$ ) olarak isimlendirilen tek bir parametrede birleştirmiş ve killeri aktivitelere bağlı olarak üç gruba ayırmıştır:  $A < 0.75$  ise aktif olmayan,  $0.75 < A < 1.25$  ise normal,  $A > 1.25$  ise aktif.

$$A = \frac{PI}{C} \quad (2.9)$$

Burada,  
 $A$  - Aktivite,  
 $PI$  - Plastisite indisi,  
 $C$  - Kil yüzdesidir.

El-Sohby (1981) aktivite üzerinde zeminin iri taneli kısmının dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır.

$$A = \frac{PI (100 \pm \nu)}{100(C \pm \nu)} \quad (2.10)$$

Burada,  
 $A$  - Aktivite,  
 $PI$  - Plastisite indisi,  
 $C$  - Kil yüzdesi,  
 $\nu$  - Doğal zeminlerde 5, yoğrulmuş zeminlerde 10 olan bir katsayıdır.



Aktif killer, genellikle yüksek şişme potansiyeline sahiptirler. Çeşitli kil mineralleri için tipik aktivite değerleri Çizelge 2.5.' te verilmiştir.

Çizelge 2.5. Bazı kil mineralleri için tipik aktivite değerleri

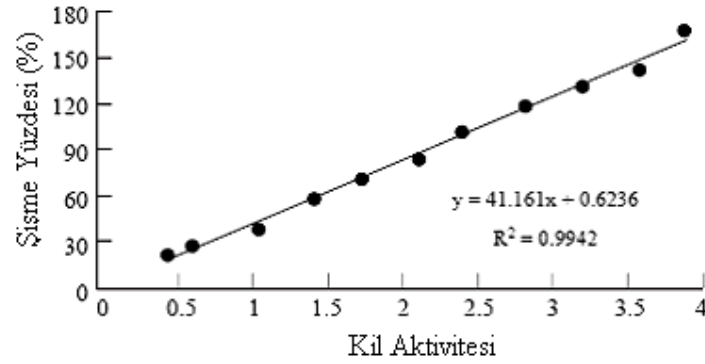
Mineral	Aktivite
Kaolinit	0.33-0.46
İllit	0.9
Montmorillonit (Ca)	1.5
Montmorillonit (Na)	7.2

El-Sohby ve Rabba (1981), içerisinde farklı oranlarda iri tanelere sahip iki kil zemin için, Eşitlik 2.9 ile hesaplanan aktivite değerleri birbirlerine yakın olmasına rağmen (0.89 ve 0.98) şişme yüzdelerinin büyük ölçüde farklı olduğunu (%100 ve %150) vurgulamışlardır. Bununla birlikte, Denklem Eşitlik 2.10 ile belirlenen aktivitenin (0.73 ve 1.52) kil mineralini ve şişme potansiyelini daha iyi yansıttığı belirtilmiştir.

Aktivite bir çok araştırmacı tarafından zeminlerin şişme potansiyelini tahmin etmek için kullanılmıştır. Parker vd. (1977) hem montmorillonitlerde hem de karışık mineralojiye sahip killerde aktivitenin çok muğlak bir değer olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte, Schreiner (1988) aktivite ile şişme – büzülme potansiyeli arasında kararlı bir ilişki olduğunu gözlemiştir.

Kariuki vd.(2002) kaolinit ve smektitin farklı oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen farklı aktivitelere sahip 47 numune üzerinde, laboratuarda spektral analizler yapmışlardır. Metilen mavisi absorpsiyonu ve Atterberg limitleriyle belirlenen aktivite değerleri ile spektral analiz sonuçlarını ilişkilendirmeye çalışmışlardır. Zeminlerin spektral karakteristiklerinden biri olan 2200nm deki asimetri ile aktivite arasında ters bir ilişki olduğunu ( $r = -0.76$ ) göstermişlerdir.

Çokça (2002), kil aktivitesi ile şişme yüzdesi arasında Şekil 2.14.'te görülen lineer ilişkiyi vermiştir.



Şekil 2.14. Kil aktivitesi ile şişme yüzdesi arasındaki ilişki (Çokça, 2002)

### 2.3.1.6. Kil Yüzdesi

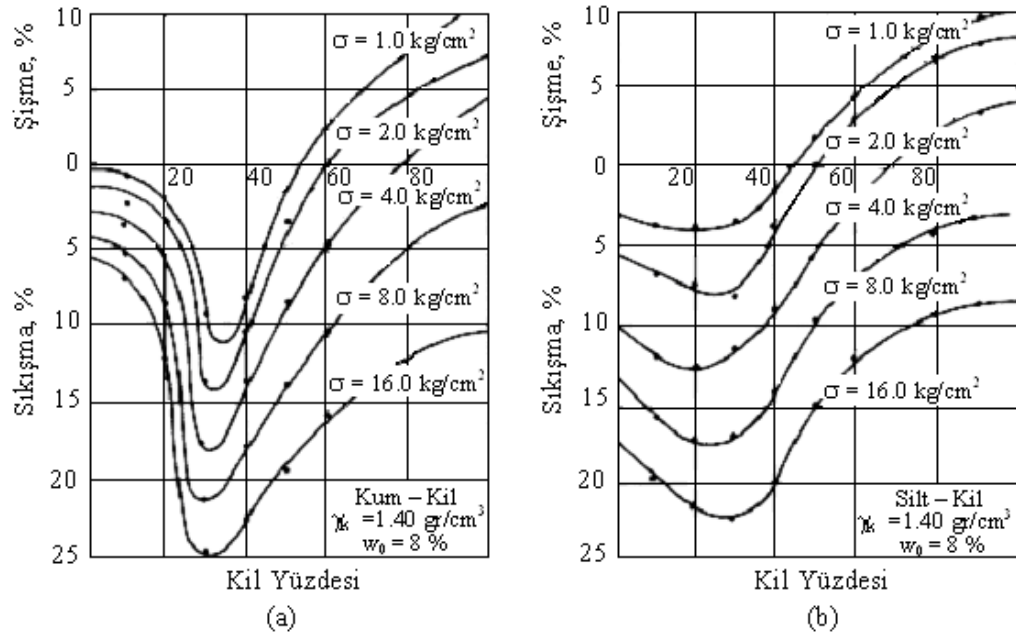
Kil yüzdesindeki artış veya iri tanelerin yüzdesindeki azalma, zemin içerisinde bulunan kapiler kanalların küçülmesine ve bunun sonucunda zemin emmesinin artmasına neden olmakta ve böylece zeminin şişme potansiyeli artmaktadır (Basma ve Al-Sharif, 1994).

Holtz ve Gibbs (1956) zeminlerin şişme potansiyelleri ile kil yüzdesi ve plastisite indisini ilişkilendirmişlerdir. Anderson vd. (1973) kurak bölgelerdeki zeminlerde, lineer genişleyebilirlik katsayısı (COLE) ile ölçülen şişme potansiyelinin, kil yüzdesi ve değişebilir sodyum oranına bağlı olarak değişimini incelemişlerdir. Mc Cormack ve Wilding (1975) tüm diğer parametreleri sabit tutarak zemin şişmesi ile kil içeriği arasındaki ilişkiyi incelemişler; illitin baskın olduğu zeminlerde, kil yüzdesinin şişme potansiyelinin tahmin edilmesinde güvenilir bir parametre olduğunu vurgulamışlardır. Schafer ve Singer (1976) şişen kil yüzdesinin, zeminin şişme potansiyelindeki değişimin büyük kısmını açıkladığını ifade etmişlerdir. Bununla birlikte, Yule ve Ritchie (1980) ve Gray ve Allbrook (2002) ise kil yüzdesi ve zemin şişmesi arasında bir ilişki olmadığını belirtmişlerdir.

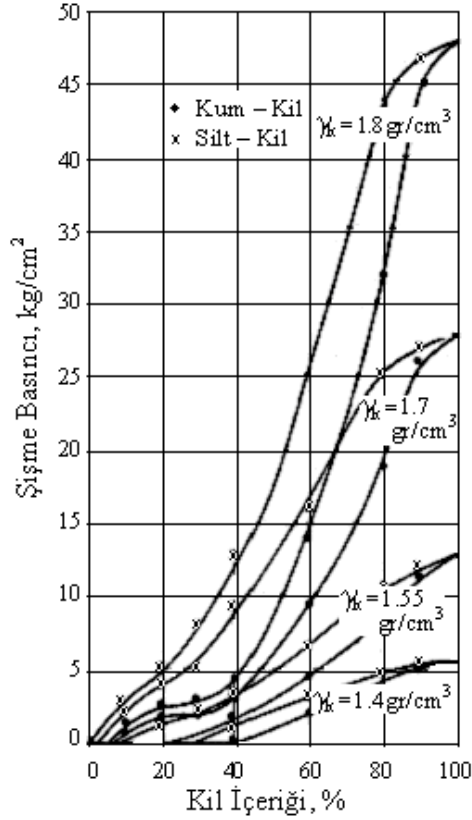
El-Sohby ve Rabba (1981) kil yüzdesinin ve iri taneli kısmın tipinin şişme potansiyeli üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, farklı oranlarda kum ve silt ile

kariştırdıkları kil numunesi üzerinde ödometrede şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleri yapmışlardır. Zeminlerin şişmesini etkileyen temel faktörlerin; başlangıç su muhtevası, kil minerali tipi ve miktarı, başlangıç kuru birim hacim ağırlık ve iri taneli kısmın yüzdesi olduğunu vurgulamışlardır. şekil 2.15.' te, iki farklı zemin için kil yüzdesinin, hacim değiştirme davranışı üzerinde etkisi, şekil 2.16.' da ise kil yüzdesinin, şişme basıncı üzerindeki etkisi görölmektedir. El-Sohby ve Mazen (1983) mineralojik kompozisyonun (kil mineral tipi ve miktarı , değişebilir iyonlar) zeminlerin şişme davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir.

Sivapullaiah vd. (1996) mineralojik bileşim ve kil yüzdesinin yanında, şişmeyen kısmın boyutunun zeminlerin şişme davranışı üzerinde önemli rol oynadığını vurgulamışlardır. Aynı miktarda şişen kil içeren karişımlar için, toplam şişmenin şişmeyen kısmın boyutundaki artış sonucunda önemli ölçüde azalacağını ileri sürmüşlerdir. Alawaji (1999) sıkıştırılmış bentonit-kum karişımlarının şişme ve sıkışabilirlik karakteristiklerini incelediği çalışmada, şişme potansiyelinin; bentonit yüzdesi ile arttığını ve tabakalar arası katyonların değerliği ile azaldığını belirtmiştir. Kil tipi, yüzdesi ve kullanılan sıkıştırma yönteminin, dolayısıyla da zemin fabriğinin önemini vurgulamıştır.



şekil 2.15. Kil yüzdesinin şişme yüzdesi üzerindeki etkisi (a) Kum-kil karişımı (b) Silt-kil karişımı (El-Sohby ve Rabba, 1981)



Şekil 2.16. Kil yüzdesinin şişme basıncı üzerindeki etkisi (El-Sohby ve Rabba, 1981)

### 2.3.1.7. Özgül Yüzey Alanı

Killerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, yüzey alanından önemli ölçüde etkilenmektedir. Özgül yüzey alanı, zeminin birim ağırlığının alanıdır ve genellikle  $m^2/gr$  olarak ifade edilmektedir. Zeminin özgül yüzey alanı, tane boyutu dağılımı ve mineraloji tarafından kontrol edilir. Bu nedenle, zemin bileşimi ile ilgili bir sabittir ve içsel bir zemin özelliği olarak kabul edilebilir. Özgül yüzey alanının belirlenmesinde, nitrojen adsorpsiyonu, su sorpsiyonu, metilen mavisi adsorpsiyonu gibi yöntemler kullanılmaktadır (Lutenegger ve Cerato, 2001; Cerato ve Lutenegger, 2002).

Kil mineralinin boyutu küçüldükçe, özgül yüzey alanı ve bunun sonucunda şişme potansiyeli artmaktadır. Çizelge 2.6.' da bazı kil minerallerinin çap, kalınlık ve özgül yüzey alanı değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.6. Özgül yüzey alanının kil mineralinin cinsi ve boyutuna bağlı olarak değişimi (Holtz and Kovacs, 1981)

Mineral	Kalınlık (nm)	Çap (nm)	Özgül Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /gr)
Montmorillonit	3	10-1000	800
İllit	30	10000	80
Klorit	30	10000	80
Kaolinit	50-2000	300-4000	10-30

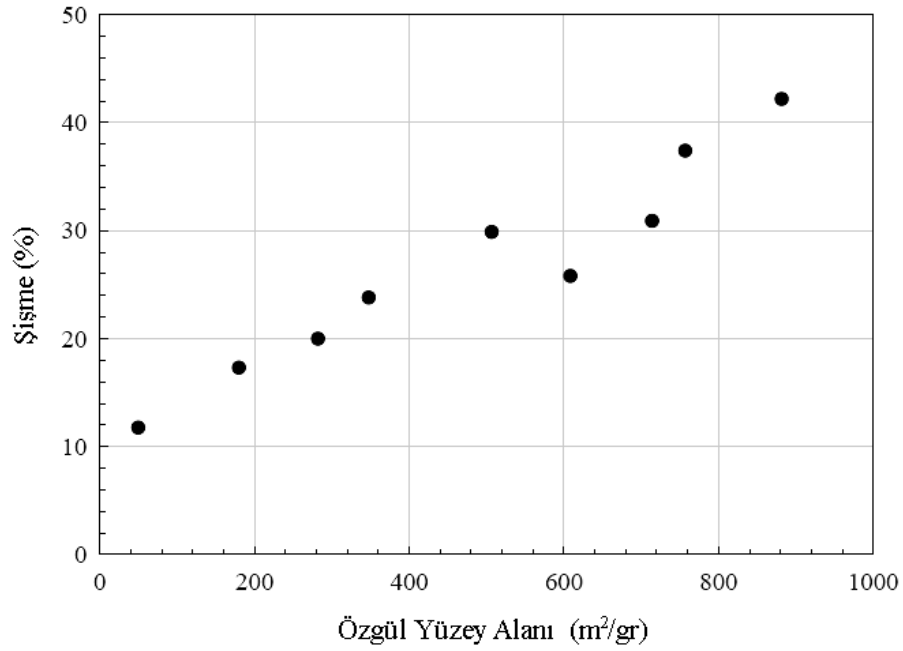
$1\text{nm} = 10^{-9}\text{m} = 10 \text{ \AA}$

Özgül yüzey alanındaki değişim; su tutma, plastisite ve şişme potansiyeli gibi özellikler açısından kil mineralleri arasındaki farklılıkların büyük bir kısmını açıklayabilir. Smektit kil mineralleri yüksek plastisiteye, yüksek aktiviteye ve yüksek şişme-büzülme potansiyeline sahiptir. İllit ve kaolinit gibi diğer kil mineralleri daha düşük plastisite ve şişme potansiyeline sahiptir (Yong ve Warkentin, 1975; Entwisle ve Kemp, 2003).

Killerin şişme potansiyeli ile özgül yüzey alanı arasındaki ilişkiyi niceleyen bir çok çalışma yapılmıştır (Dos Santos ve De Castro, 1965; Ross, 1978; Low, 1980; Morgenstern ve Balasubramanian, 1980; Çokca, 2002). Grabowska-Olszewska (1970) kaolinit ve bentonit karışımlarında, şişme yüzdesi ile özgül yüzey alanı arasında Şekil 2.17.' de görülen ilişkiyi vermişlerdir.

Ross (1978) montmorillonitli zeminlerin şişme potansiyeli ile kil yüzdesi ve özgül yüzey alanı arasındaki ilişkileri incelemiştir. Şişme potansiyelindeki değişimin, kil yüzdesinden çok özgül yüzey alanı ile ifade edildiğini belirtmiştir.

Metilen mavisi adsorbsiyonunun, kil tipinin bir fonksiyonu olduğu; kilin su adsorbsiyon yüzdesinin ve bu nedenle kil tane yüzey alanının bir ölçümünü verdiği kabul edilmektedir. Metilen mavisi, kil minerallerinin negatif yüklü yüzeylerinde adsorbe edilen polar organik bir moleküldür. Belli kütleye sahip kilin adsorbe ettiği metilen mavisi miktarı, kil tane yüzeyleri üzerindeki negatif yüklü alanların konsantrasyonuna ve birim kütle için kilin yüzey alanına bağlıdır (Fityus vd. 2000; Fityus ve Smith, 2000).

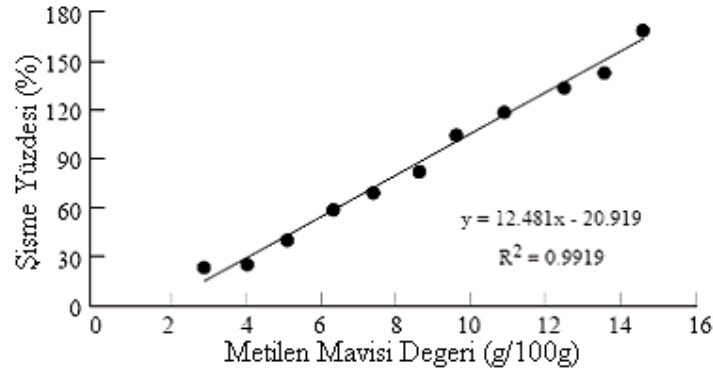


Şekil 2.17. Özgül yüzey alanı ve şişme yüzdesi arasındaki ilişki (Grabowska-Olszewska, 1970)

Hang ve Brindley (1970) saf smektit killerinin katyon değiştirme kapasiteleri ve metilen mavisi adsorbsiyonu ile belirlenen yüzey alanları arasında lineer bir ilişki olduğunu göstermişlerdir. Çokça ve Birand (1993) metilen mavisi deneyinin, bir kilin katyon değiştirme kapasitesinin bağlı bir ölçümünü verdiğini ifade etmişlerdir.

Petersen vd. (1996) özgül yüzey alanı ile zemin strüktürü, katyon değiştirme kapasitesi, su tutma ve doygun hidrolik iletkenlik arasındaki ilişkileri incelemişlerdir. Hem katyon değiştirme kapasitesi (CEC) hem de zemin emmesinin -15 bar olduğu durumdaki su muhtevasının, özgül yüzey alanı ile iyi bir ilişkiye sahip olduğunu vurgulamışlardır.

Çokça (2002), metilen mavisi değeri ve şişme yüzdesi arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Farklı plastisiteye ve şişme yüzdelere sahip zemin numuneleri elde etmek için, ticari bentonit ve kaolinit mineralleri farklı oranlarda karıştırılmıştır. Metilen mavisi adsorbsiyon deneyleri ve ödometrede standart serbest şişme deneyleri (ASTM D 4546-90) yapılmıştır. Deney sonuçları, metilen mavisi değeri ile şişme yüzdesi arasında doğrusal bir ilişkinin olduğunu göstermiştir (Şekil 2.18.).



Şekil 2.18. Metilen mavisi değeri ile şişme yüzdesi arasındaki ilişki (Çokça, 2002).

### 2.3.1.8. Katyon Değişirme Kapasitesi (CEC)

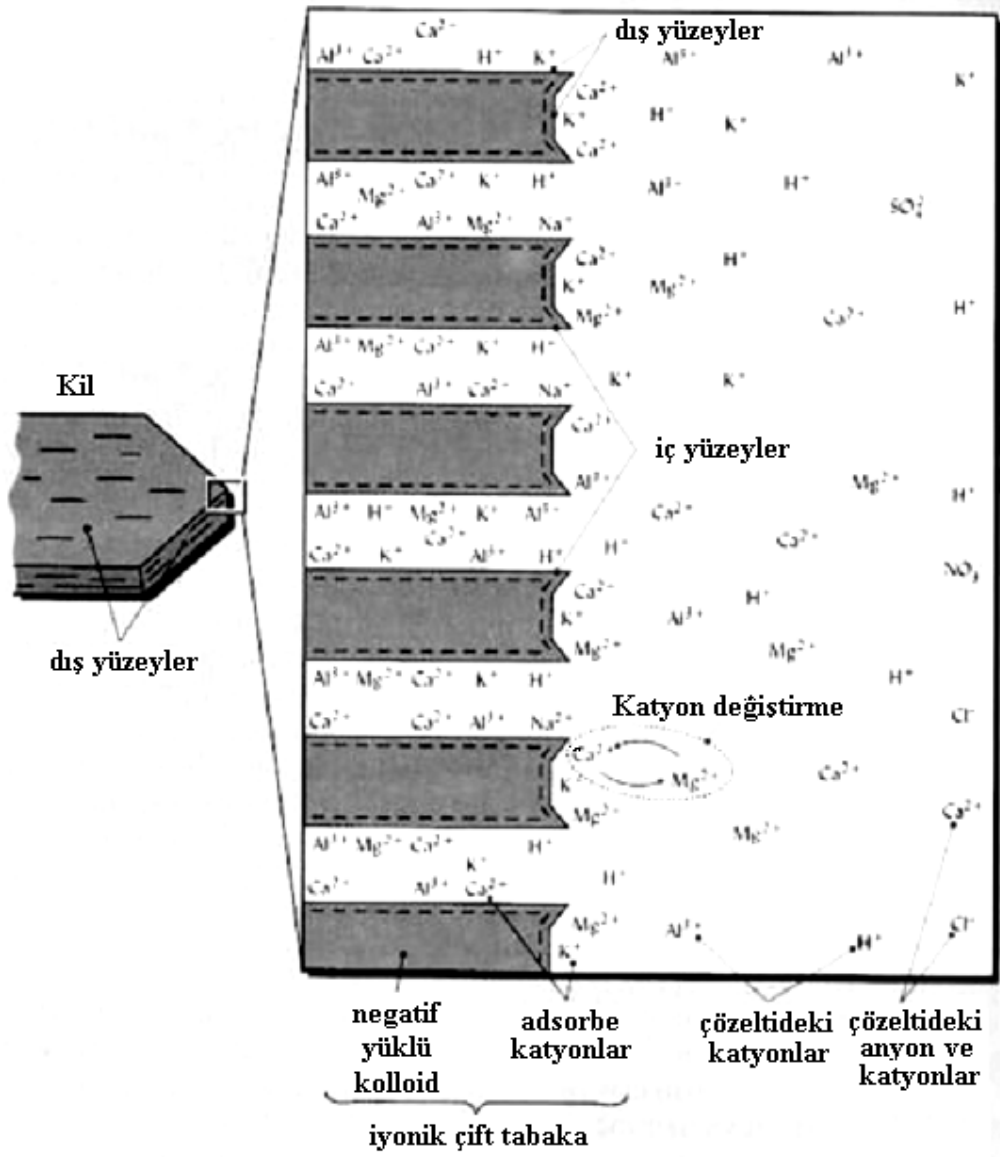
Katyon değişimi, zeminlerin temel elektro-kimyasal özelliklerinden biridir ve özellikle killerin davranışı üzerinde önemli etkilere sahiptir. Temel nedenleri; izomorf değişim ve kil mineralinin köşelerindeki alümin gruplarının çözülmesidir (Ammann, 2003; Dontsova vd., 2004).

Mineralin kristal strüktürü değişmeksizin, tetrahedral veya oktahedral levhadaki katyonların, ortamda bulunan aynı veya farklı değerliğe sahip başka katyonlarla yer değiştirmesine izomorf değişim adı verilmektedir. İzomorf değişim (örneğin, magnezyum ile alüminyumun veya alüminyum ile silikonun yerdeğişmesi) sonucunda, kil kristallerinde bir yük eksikliği veya diğer bir deyişle net negatif yük durumu ortaya çıkar. Negatif yükün dengelenerek, elektriksel nötrülüğün sağlanabilmesi için, ortamda bulunan katyonlar kil tanesine çekilir. Kil tanesinin köşe ve yüzeylerine bağlanan bu katyonlar, değişebilir katyonlar olarak isimlendirilirler. Killerde yaygın değişebilir katyon türleri; H, K, NH<sub>4</sub>, Na, Ca ve Mg olarak sıralanabilir. Bir kilin yük eksikliğini dengelemek için gereken değişebilir katyonların toplam miktarına ise, katyon değişirme kapasitesi (CEC) adı verilir. Diğer bir deyişle, katyon değişirme kapasitesi zeminlerin katyon tutma yeteneğini gösteren bir değerdir (Ingles, 1968; Sharma, 1998; Ammann, 2003).

Şekil 2.19.' da tipik bir katyon değişirme reaksiyonu ve Şekil 2.20.' de bir katyon değişirme ortamı görülmektedir.



Şekil 2.19. Katyon değişirme reaksiyonu (Abdullah vd., 1997)



Şekil 2.20. Katyon değişirme ortamı (Vogt, 2002)

Katyon değişirme kapasitesinin belirlenmesi için birkaç yöntem geliştirilmiştir. İlk geliştirilen yöntemlerden biri; kilin bir katyona doyurulması ve artık tuzların



yıkanması; ardından başka katyonlarla doyurularak, yıkama işlemlerinin tekrarlanması şeklinde uygulanmaktadır. Toplam çözeltiler ise değişen katyon miktarının belirlenmesi için kullanılmaktadır. Diğer bir yöntem kilin amonyum ( $\text{NH}_4$ ) iyonlarıyla doyurulmasıdır. Önerilen diğer yöntemler ise setilpiridinyum iyonlarının, kobalt hekzamin, bakır dietilendiamin ve bakır trietilentetramin gibi metal-organik karışımlarının kullanılmasıdır. CEC' in metal organik karışımlarla belirlenmesi hızlı ve kesin sonuç vermektedir. Bununla birlikte, amonyum asetat yöntemi önemini korumakta ve uzun zaman almasına rağmen diğer yöntemlerin doğrulanmasında kullanılmaktadır (Ammann, 2003).

Çokça (1993) altı farklı kil numunesi üzerinde yapılan metilen mavisi deneylerinden tespit edilen katyon değiştirme kapasitesi ile standart amonyum asetat deneyinden belirlenen katyon değiştirme kapasitesi değerlerini karşılaştırmıştır. Sonuçların birbiri ile uyumlu olduğunu vurgulamıştır.

Bir katyonun diğer katyonlarla değişebilirliği; iyon boyutu ve değerliği içeren bir çok faktöre bağlıdır. Bir kilin katyon değiştirme kapasitesi, tane boyutu, sıcaklık ve değişme reaksiyon ortamıyla ilişkilidir. CEC değerleri, kil mineralojisinin bir göstergesidir ve genellikle CEC değerinin büyük olması, şişme potansiyelinin de yüksek olduğunu göstermektedir (Mitchell, 1976; Sharma, 1998).

Çizelge 2.7.'de farklı kil mineralleri için verilen katyon değiştirme kapasitesi değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.7. Çeşitli kil mineralleri için katyon değiştirme kapasitesi değerleri (Grim, 1962)

Kil minerali	CEC (meq/100gr)
Montmorillonit	80-150
Vermikülit	100-150
Haloysit $4\text{H}_2\text{O}$	10-40
İllit	10-40
Klorit	10-40
Sepiyolit – Atapulgit	20-30
Haloysit $2\text{H}_2\text{O}$	5-10
Kaolinit	3-15

meq: sıvı içerisindeki elektrolit miktarını ifade eden bir birimdir.

Kaolinit minerali, çok küçük izomorf değişime sahiptir. Bu nedenle meydana gelen düşük negatif yük, tetrahedral ve oktahedral tabakalar arasındaki hidrojen bağları ile karşılanır. Bu bağlar, tabakalar arasında katyonların veya suyun adsorbsiyonu için gerekli olan boşlukları bırakmaksızın, tabakaları sıkıca birlikte tutar. Bu nedenle, kaolinit şişmeyen bir kil mineralidir (Wiseyesekera, 2003).

Low(1981) değişebilir katyonun değerliği, boyutu ve hidrasyon enerjisinin tabakaların şişmesi üzerinde etkili olduğunu ileri sürmüştür. Tabakalar birbirinden yeterince uzaklaştığında, kısa mesafeli kuvvetlerin etkisi azalmakta ve şişme katyon etkisinden bağımsız hale gelmektedir.

Genellikle iki değerlikli katyonla ( $Ca^{2+}$ ) doygun bir montmorillonit, 1nm'den 2 nm'ye kadar %100 şişebilmektedir (Azam vd. 2000). Ancak tek değerlikli katyona ( $Na^+$ ) doygun bir montmorillonit sınırsız şişebilir. Bununla birlikte, doğal zeminler sodyuma doygun montmorillonitler kadar şişmezler. Bunun iki temel nedeni vardır:

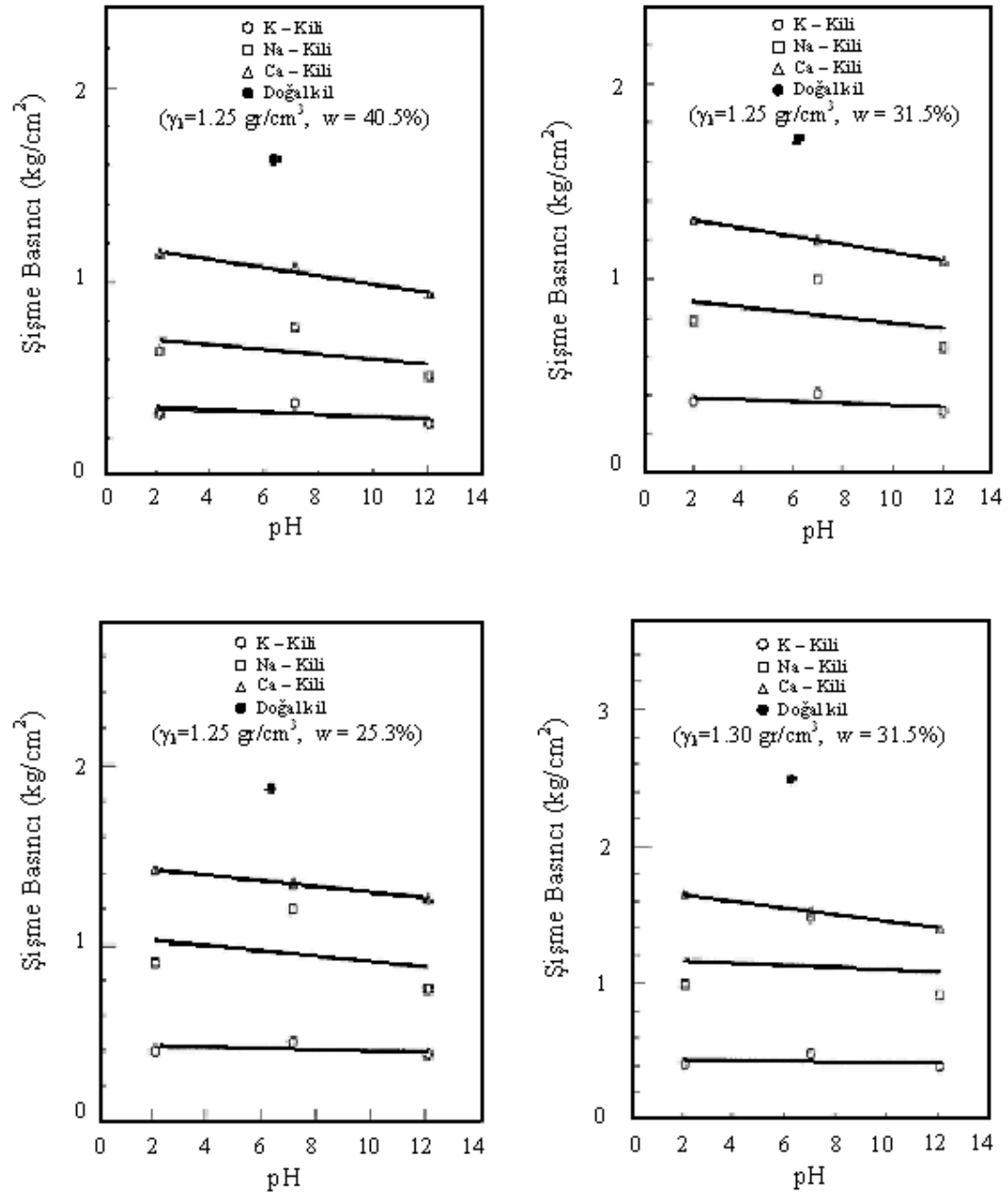
- genellikle doğal kil mineralleri şişmeyen kil mineralleriyle karışık halde bulunurlar
- zemin sistemleri nadiren mono iyoniktir ve genellikle ya  $Ca^{2+}$  yada  $Mg^{2+}$  ile doygundur (Borchardt, 1989).

Sodyum gibi tek değerlikli değişebilir katyonlar, kalsiyum gibi iki değerlikli katyonlardan daha büyük şişmeye neden olur. Alüminyum gibi çok değerlikli değişebilir katyonlara sahip yüksek asitlikteki killerde düşük şişme gözlenmektedir (Yong ve Warkentin, 1975; Luckham ve Rossi, 1999; Montes-H vd., 2003).

Abdullah vd. (1997) illit ve smektit içeren killerin potasyum katyonu ile reaksiyona girmesi sonucunda şişme potansiyelinin önemli ölçüde azaldığını vurgulamışlardır.

Abdullah vd. (1999) çalışmalarında doğal bir kil numunesini, üç farklı pH değerindeki (pH=2, 7, 12) NaCl, CaCl ve KCl çözeltileriyle yıkayarak; Na, Ca ve K baskın katyon tiplerine sahip numuneler hazırlamışlardır. Bu numuneler üzerinde

şişme basıncı ve şişme yüzdesi deneyleri yaparak; değişebilir katyon tipi ve pH değerinin şişme davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Şekil 2.21.' de katyon tipi, pH değeri ve başlangıç koşullarının şişme basıncı ve yüzdesi üzerindeki etkileri görülmektedir.



Şekil 2.21. Katyon tipi, pH ve başlangıç koşullarının şişme basıncı üzerindeki etkisi (Abdullah vd., 1999)

Şekillerden görüldüğü gibi K – kili diğer numuneler ile karşılaştırıldığında en düşük şişme potansiyeline sahiptir. Bunun nedeni K katyonları ile sağlanan kuvvetli K bağlarının kil taneleri arasına su moleküllerinin girmesini engellemesidir. K – kilinde gözlenen bir diğer özellik ise pH değişimlerine karşı duyarız olmasıdır (Abdullah vd., 1999).

Churchman vd. (2002) iki farklı bentonit numunesi üzerinde katyon değiştirme kapasitesinin (CEC) ve değişebilir katyonların, şişme davranışı (serbest şişme indisi, FSI) üzerindeki etkisini incelemiştir. Numunelerden birinin Avustralya'nın Arumpo bölgesinden alındığı, Wyoming bentonitinin ise ticari olarak elde edildiği ifade edilmiştir. Çizelge 2.8. de araştırmacılar tarafından yapılan deneylerin sonuçları görülmektedir.

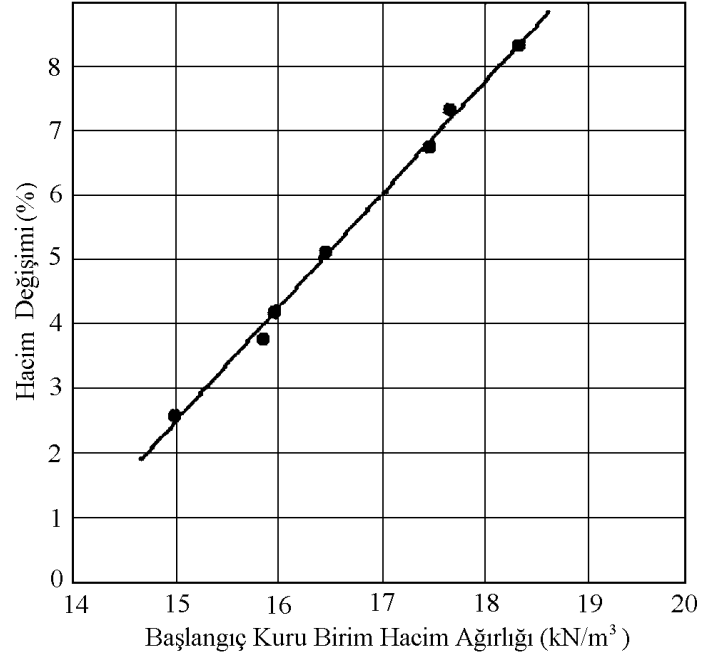
Çizelge 2.8. İki farklı bentonit için katyon değiştirme kapasitesi ve değişebilir katyonların zeminin şişmesi üzerindeki etkisi (Churchman vd., 2002).

Numune	Bileşim (%)		Değişebilir Katyonlar			CEC	FSI (2gr için)
	Smektit	Kuvars	K <sub>2</sub> O	Mg	Na		
Arumpo	>99	0	0.71	55.5	37.0	100	9 ± 0.5
Wyoming	90	<5	0.50	3.3	52.5	75	34 ± 1

Çizelgeden görüleceği üzere her iki numune de önemli smektit içermektedir. Bununla birlikte şişme davranışları arasındaki önemli farklılık, değişebilir katyonlardan kaynaklanmaktadır.

### 2.3.1.9. Kuru Birim Hacim Ağırlık

Sabit su muhtevası koşulları altında, zemin numunesinin kuru birim hacim ağırlığı arttıkça şişme yüzdesi ve şişme basıncı artmaktadır (Basma ve Al-Sharif, 1994). Kuru birim hacim ağırlık ile şişme davranışı arasındaki bu ilişki, çift tabaka teorisi yardımıyla açıklanabilir. Buna göre; zeminin birim hacim ağırlığı arttıkça, paralel plakalar arasındaki mesafe azalmakta ve bunun sonucunda ozmotik itki ve şişme basıncı artmaktadır (Ohri, 2003). Şekil 2.22.' de başlangıç kuru birim hacim ağırlığı ile şişme yüzdesi arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 2.22. Başlangıç kuru birim hacim ağırlığının şişme yüzdesi üzerindeki etkisi (Holtz ve Gibbs, 1956)

Sridharan vd. (1986) şişme basıncının temel olarak başlangıç kuru birim hacim ağırlığına bağlı olduğunu, başlangıç su muhtevasının etkisinin ise çok az olduğunu, belirtmişlerdir. Ayrıca şişme basıncının belirlenmesinde gerilme izinin etkisinin önemini vurgulamışlar, uygulanan farklı gerilme izleri için elde edilen sonuçların çok farklı olabileceğini ifade etmişlerdir.

Komine ve Ogata (1994) yaklaşık %48 oranında montmorillonit içeren ticari sodyum bentonit kullanarak, şişme yüzdesi ve şişme basıncı üzerinde başlangıç koşullarının etkisini incelemek amacıyla deneysel bir çalışma yapmışlardır. Şişme deformasyonu – zaman eğrisinin; başlangıç kuru birim hacim ağırlığına, su muhtevasına ve uygulanan düşey basınca güçlü bir şekilde bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Şişme basıncının, kuru birim hacim ağırlık ile üstel olarak arttığını; şişme deformasyonunun ise sabit düşey basınç altında, kuru birim hacim ağırlıkla doğru orantılı olarak arttığını belirtmişlerdir.

Rahimi ve Barootkoob, (2002) çalışmalarında, İran'ın Khoozestan bölgesindeki bir sulama kanalı projesinde, zemin şişmesinden kaynaklanan hasarları incelemişlerdir.

Bölgedeki zeminlerin likit limitlerinin 30 – 38%, plastik limitlerinin 8 – 16% ve aktivitelevlerinin 0.21 – 0.36 arasında değerler aldığı belirtilmiştir. Dolgularda yapılan incelemeler sonucunda, dolgunun uygun biçimde sıkıştırıldığı ve bazı dolgularda relatif kompaksiyon değerlerinin 1’den büyük olduğu ifade edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, düşük ve orta plastisiteye sahip zeminlerde dahi, sıkıştırma birim hacim ağırlığının yüksek ve su muhtevasının düşük olması durumunda; önemli ölçüde şişme meydana gelebileceği vurgulanmıştır. Ayrıca, sıkıştırma kuru birim hacim ağırlığının %5-8 oranında azaltılıp, su muhtevasının %2-3 arttırılmasıyla, şişme potansiyelinin önemli ölçüde azaltılabileceği ifade edilmiştir.

Ohri (2003) kuru birim hacim ağırlık ile şişme basıncı arasındaki ilişkiyi aşağıdaki eşitlikle ifade etmiştir.

$$\log P_s = a \cdot \gamma_k + b \quad (2.11)$$

Burada,

$P_s$  - şişme basıncı,

$\gamma_k$  - Kuru birim hacim ağırlık,

$a$  ve  $b$  -Denklem sabitleridir.

### 2.3.1.10. Zemin Emmesi

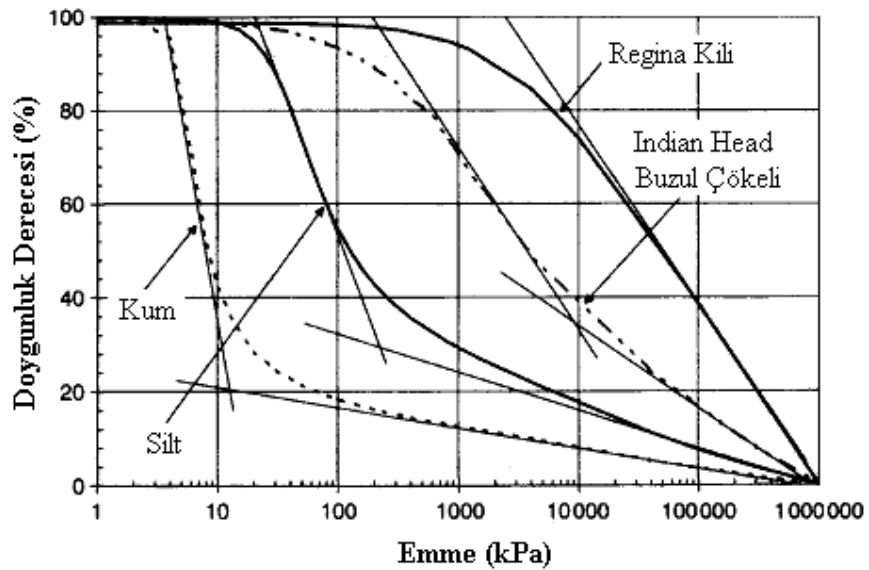
Zemin emmesi; belirli su muhtevasına sahip bir zeminin, boşluk suyunu adsorbe etme potansiyelini tanımlayan fiziksel bir özelliktir ve bu nedenle zeminlerin hacim değiştirme davranışıyla ilişkilidir.

Richards vd. (1984) ve Justo vd. (1984) başlangıç emme değerinin artmasıyla, toplam şişme miktarının arttığını göstermişlerdir. Brackley (1973), Gens ve Alonso (1992) başlangıç emme değerindeki artışın, maksimum şişme basıncında çok küçük bir artışa neden olduğunu ifade etmişlerdir.

Erol ve Dhowian (1990) yüksek şişme potansiyeline sahip killi şeyl numuneleri üzerinde saykrometre tekniği ile emme basınçlarını ölçmüştür. Bu emme değerlerini kullanarak kabarma miktarını belirlemiş ve ödometre tekniğinin sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Ölçülen emme basınçlarından, şişme miktarının basit bir şekilde belirlenebildiğini ve değişik su muhtevalarında ortaya çıkabilecek kabarma miktarlarının hesaplanabileceğini vurgulamış; ancak emme basıncı yönteminin rötrelimiti ile plastik limit arasındaki su muhtevalarında geçerli olduğunu ifade etmiştir.

Zeminlerin su muhtevası ile zemin emmesi arasındaki ilişki, zemin – su karakteristik eğrisi olarak isimlendirilmekte ve matris emme veya toplam emme cinsinden tanımlanabilmektedir. Zemin – su karakteristik eğrisi; doymun olmayan zeminlerde sıvı akışı, hidrolik iletkenlik, kayma mukavemeti, hacimsel deformasyon, boşluk boyutu dağılımı gibi birçok parametrenin belirlenmesinde kullanılmaktadır (Krahn ve Fredlund, 1972; Fredlund ve Xing, 1994; Huang, 1994; Barbour, 1998; Likos ve Lu, 2003).

Şekil 2.23.'te farklı zeminler için elde edilen zemin – su karakteristik eğrileri görülmektedir.



Şekil 2.23. Farklı zemin türleri için tipik zemin – su karakteristik eğrileri (Vanapalli vd.,1999)

McKeen (1992) zemin emmesinin, şişme potansiyelinin çok hassas bir göstergesi olduğunu belirtmiş ve zeminlerin şişme potansiyellerinin sınıflandırılmasında toplam emme karakteristik eğrisinin kullanılabileceğini göstermiştir.

Acar ve Nyeretse (1992) kaolinit, sodyum montmorillonit ve ince kum kullanılarak hazırladıkları zemin karışımlarının emme ve şişme davranışlarını incelemiştir. Zemin karışımları, Harvard kompaksiyon kalıbında optimum su muhtevasında sıkıştırılmış ve 7 kPa sürşarj yükü altında serbest şişme deneyleri yapılmıştır. Numunelerin toplam emme değerlerinin ölçülmesinde ısı çift saykrometre kullanılmış ve ölçülen emme değerleri şişme potansiyeli ile karşılaştırılarak bir sınıflandırma sistemi verilmiştir. Atmosfer basıncına göre normalize edilen toplam emme ile şişme potansiyeli arasında Eşitlik 2.12' de verilen ilişkinin var olduğu (Şekil 2.24.) ve farklı zemin türleri için bu ilişkinin aktivite faktörüne bağlı olarak değişebileceği vurgulanmıştır.

$$H_t / P_a = A^{-0.49} \cdot S_p \quad (2.12)$$

Burada,

$H_t$  - Zemin emmesi,

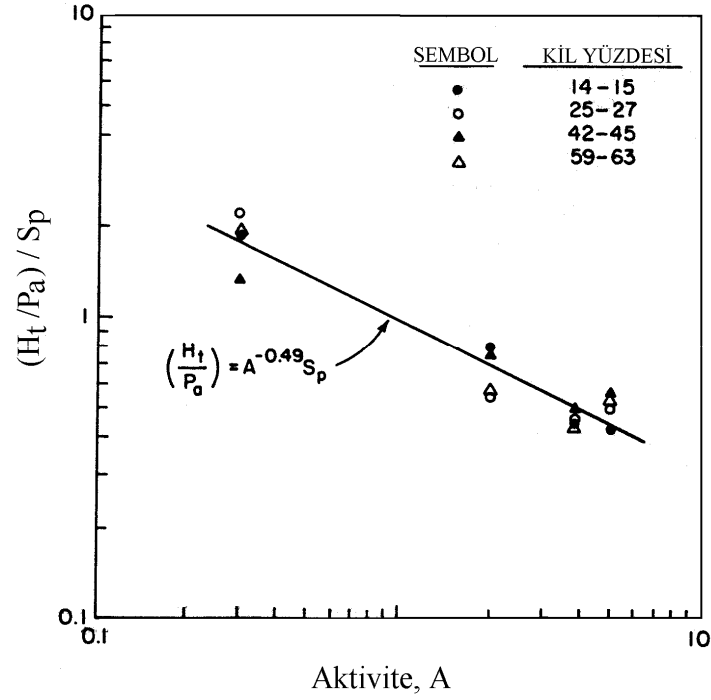
$P_a$  - Atmosfer basıncı,

$S_p$  - Şişme yüzdesi,

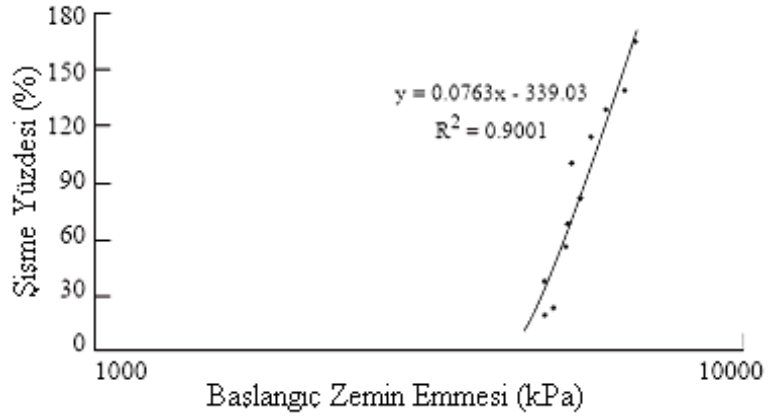
$A$  - Aktivitedir.

Çokça (2002) ticari kaolinit ve bentonit minerallerini farklı oranlarda karıştırarak hazırladığı numuneler üzerinde, şişme yüzdesi ile başlangıç zemin emmesi arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Emmenin ölçümü için ısı çift saykrometre tekniği kullanılmış, şişme yüzdesi ise standart odometre serbest şişme (ASTM D4546-90) deneyi ile belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda, başlangıç zemin emmesi ile şişme yüzdesi arasında Şekil 2.25.' te görülen doğrusal ilişki verilmiştir.





Şekil 2.24. Zemin emmesi ve şişme potansiyeli arasındaki ilişki (Acar ve Nyeretse, 1992).



Şekil 2.25. Başlangıç zemin emmesi ile şişme yüzdesi arasındaki ilişki (Çokça, 2002).

Thakur ve Singh (2005 a) sodyum montmorillonit ve kalsiyum-sodyum montmorillonit zemin numuneleri üzerinde, şişme potansiyeli ile emme arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Çalışmada, şişme basınçlarının belirlenmesi için ödometre serbest şişme deneyleri yapılmış, emme ise WP4<sup>®</sup> dew point (çiy noktası)

potansiyometresi kullanılarak ölçülmüştür. Emme ve şişme basınçlarını ilişkilendirmek için elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve literatürde verilen veriler kullanılarak doğrulanmıştır. Şişme basıncı ve emme arasında Eşitlik 2.13' teki genelleştirilmiş ilişki verilmiştir.

$$P_s = A (0.001\Psi)^B \quad (2.13)$$

Burada,

- $P_s$  - Şişme basıncı (MPa),  
 $\Psi$  - Zemin emmesi (MPa),  
 $A$  ve  $B$  - Denklem sabitleridir.

### 2.3.2. Çevresel Faktörler

Arazide gerçekleşebilecek şişmenin miktarı çevresel koşulların bir fonksiyonudur ve bunun sonucu olarak, sınıflarına göre aynı şişme potansiyeline sahip olabilen iki zemin, çok farklı miktarlarda şişme gösterebilir (Seed vd., 1962).

#### 2.3.2.1. Su Muhtevası

Zemin numunesinin başlangıç su muhtevasının artması, hem şişme yüzdesinde hem de şişme basıncında azalmaya neden olmaktadır (Basma ve Al-Sharif, 1994).

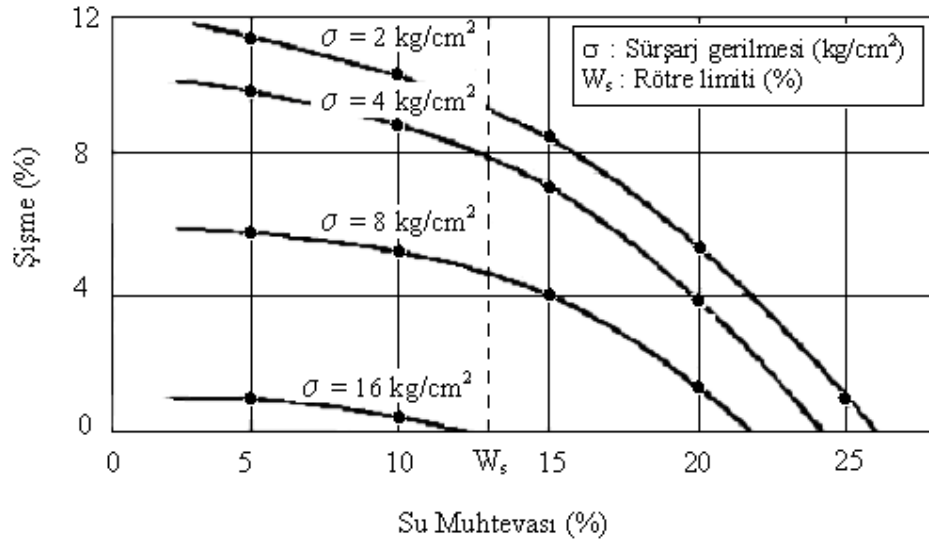
Aynı kuru birim hacim ağırlığa sahip numuneler için; başlangıç su muhtevasının artması sonucunda, başlangıç doygunluk derecesi de artacak ve zeminin su emme eğilimi azalacaktır. Bu nedenle başlangıç su muhtevası arttıkça, şişme yüzdesi azalmaktadır. Rötire limitinden düşük su muhtevaları için bu etki düşüktür. Rötire limitini aşan su muhtevalarında ise, su muhtevalarındaki artış sonucunda, şişme basıncı ve yüzdesindeki azalma daha diktir. Ayrıca, sıkıştırma su muhtevasının, fabrik üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır ve fabrikteki değişimler sonucunda şişme davranışı da değişmektedir (El-Sohby ve Rabba, 1981; Ohri, 2003).

Chen (1988), başlangıç su muhtevsındaki artışla şişmenin azaldığını ancak şişme basıncının su muhtevsından bağımsız olduğunu belirtmiştir.

Day (1992) çalışmasında nihai doyumluk derecesi ve şişme arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Şişme yüzdesinin deney sonucundaki doyumluk derecesi ile doğru orantılı olarak arttığı belirtilmiştir.

Komine ve Ogata (1994) ise, %48 oranında montmorillonit içeren sıkıştırılmış bentonitler üzerinde yaptıkları şişme deneylerinin sonucunda, maksimum şişme miktarının ve şişme basıncının, başlangıç su muhtevsından hemen hemen bağımsız olduğunu ileri sürmüşlerdir.

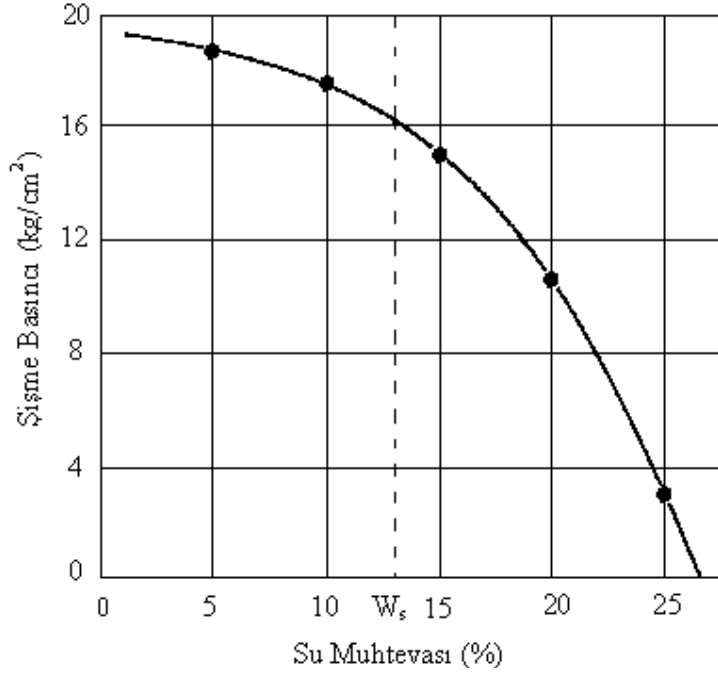
Şekil 2.26. da, farklı sürşarj gerilmeleri ( $\sigma$ ) altında başlangıç su muhtevsının şişme yüzdesi üzerindeki etkisi, Şekil 2.27.'de ise başlangıç su muhtevsının şişme basıncı üzerindeki etkisi görülmektedir.



Şekil 2.26. Başlangıç su muhtevsının şişme üzerindeki etkisi (El-Sohby ve Rabba, 1981)

Şekil 2.26.'da görüldüğü gibi başlangıç su muhtevası, yoğrulmuş zeminlerin şişme yüzdesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Başlangıç su muhtevsındaki artışla şişme yüzdesi azalmaktadır. Rötire limitinden ( $w_s$ ) yüksek su muhtevsalarında, şişme

yüzdesindeki azalma eğilimi artmaktadır. Benzer davranış, şişme basıncı – başlangıç su muhtevası ilişkisinde de görülmektedir (Şekil 2.27).



Şekil 2.27. Başlangıç su muhtevasının şişme basıncı üzerindeki etkisi (El-Sohby ve Rabba, 1981)

Hanafy (1991), kuru zeminlerinin su adsorpsiyonu nedeniyle şişmesi sırasında su muhtevası ve boşluk oranı arasındaki ilişkiyi, şekli nedeniyle, S eğrisi olarak tanımlamıştır (Şekil 2.28.). S eğrisinin genel karakteristiklerini ve belirlenmesini detaylı biçimde açıklamış ve kurumuş killerin şişme potansiyelinin değerlendirilmesi için kullanılacak bir şişme potansiyeli kartı vermiştir.

Hanafy (1999) kurumuş şişen killer üzerine uygulanan belirli bir basınç altında; başlangıç su muhtevası ile doymuş denge su muhtevasını ilişkilendirmek için, bağıl su muhtevası (RM), su muhtevası değişim potansiyeli (MCP) ve su eksikliği (MD) ifadelerini kullanmıştır. Ayrıca, boşluk oranı ile doymuşluk derecesinin çarpımını ifade eden doymuşluk katsayısı ( $S_v$ ) terimini önermiş, bu terimlerin şişen zeminlerin tanımlanmasında indeks özellikleri olarak kullanılacaklarını ileri sürmüştür.

$$MCP = w_f - w_0 \quad (2.14)$$

$$RM = w_0/w_f * 100 \quad (2.15)$$

$$MD = (w_f - w_0)/w_0 * 100 \quad (2.16)$$

$$S_v = e * S_r = G_s * w \quad (2.17)$$

Burada,

$w$  - Su muhtevası,

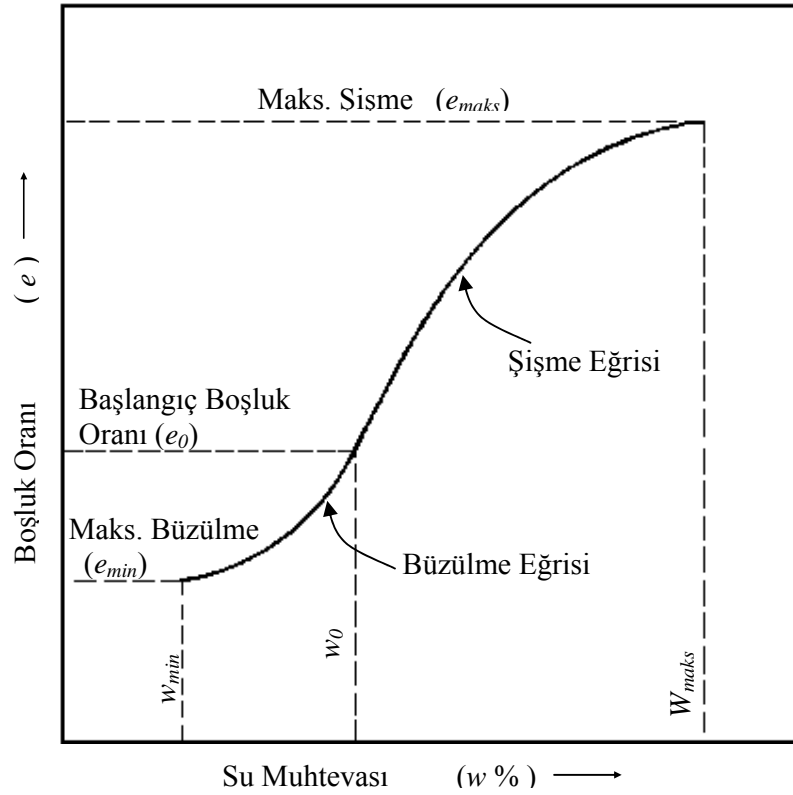
$w_0$  - Başlangıç su muhtevası (%),

$w_f$  - Nihai su muhtevası (%),

$e$  - Boşluk oranı,

$S$  - Doygunluk derecesi,

$G_s$  - Özgül ağırlıktır.



Şekil 2.28. Şişen killi zeminlerde su muhtevası – boşluk oranı ilişkisi (Hanafy, 1991).

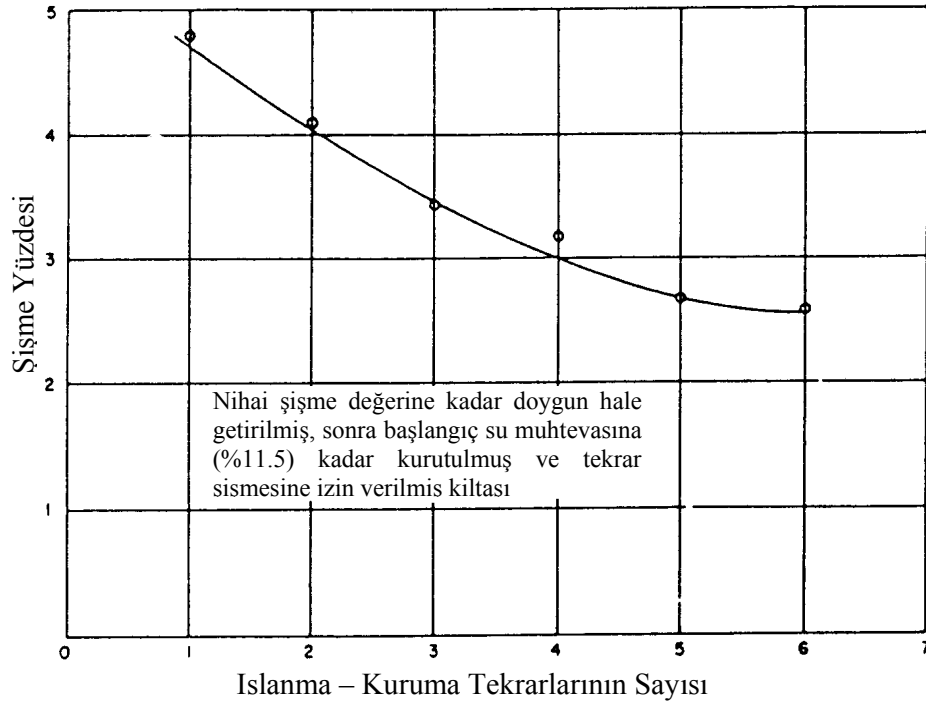
Jones ve Holtz (1973), su muhtevası değişimleri nedeniyle kilin hacim değiştirmesinin, zemin yüzeyinden itibaren yaklaşık 10m derinlik içinde meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Gromko (1974) ise mühendislik problemlerine neden olan

çoğu değişimlerin 3m den daha az olan derinliklerde meydana geldiğini vurgulamıştır.

### 2.3.2.2. Nem Değişiklikleri

Bazı araştırmacılar, yoğrulmuş kil numunelerini tamamen şişmeye maruz bırakıp, daha sonra bu numuneleri başlangıç su muhtevasına kadar kurutmuşlar; ardından bu işlemi tekrarlayarak, tekrarlı ıslanma ve kurumanın şişme davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır (Chen, 1965; Chu ve Mou, 1973; Chen ve Ma, 1987; Rao ve Satyadas, 1987; Chen, 1988).

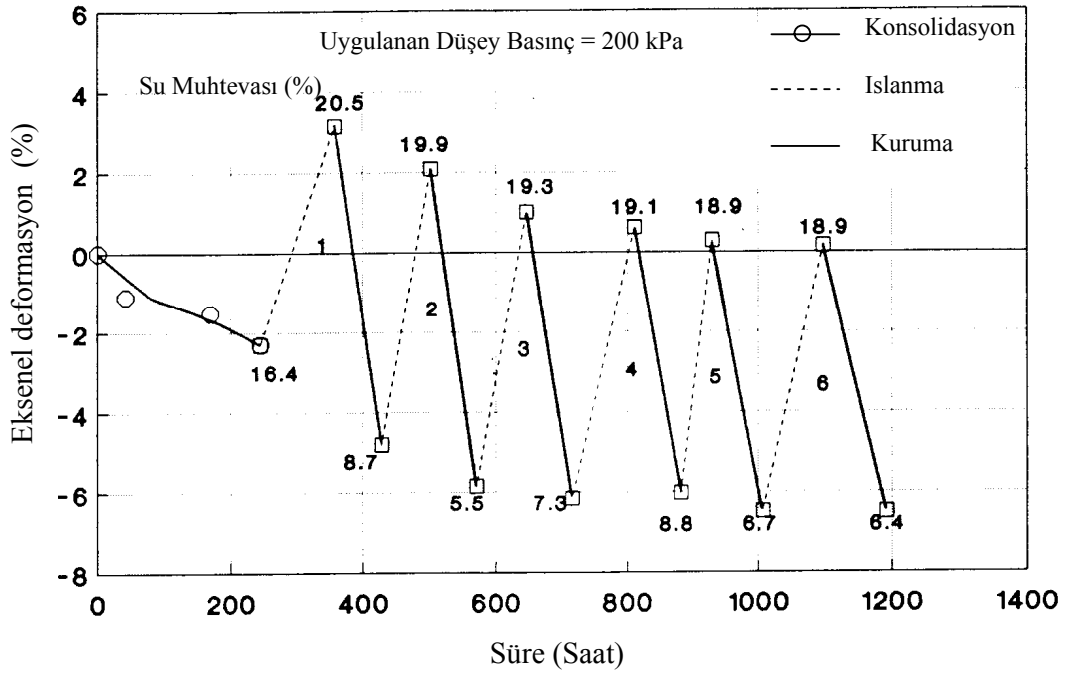
Yoğrulmuş şişen zeminler üzerinde laboratuarda yapılan tekrarlı şişme – büzülme deneyleri; yaklaşık dört ıslanma – kuruma tekrarından sonra düşey deplasmanların sabit kaldığı bir denge durumuna ulaşıldığını göstermiştir.



Şekil 2.29. Şişmenin yorulması (Chen, 1965)

Abouleid (1985) yoğrulmuş kil numuneleri için üç yada dört ıslanma kuruma tekrardan sonra şişme özelliklerinde herhangi bir hacim değişikliği olmadığını belirtmiştir. Diğer taraftan Nordquist ve Bauman (1967), Obermeier (1973) ve Popescu (1980) kuruma ve ıslanma tekrarlarının sayısı ile şişme yeteneğinin arttığını vurgulamışlardır (Dif ve Bluemel, 1991).

Dif ve Bluemel (1991) ıslanma kuruma çeviriminin şişme davranışı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, iki farklı örselenmemiş aşırı konsolide kil numunesi üzerinde, modifiye edilmiş bir ödometre hücresi kullanarak deneyler yapmışlardır. Kurutma işlemi, zemin numunesinin altına ve üstüne çok düşük basınçlar altında kuru hava uygulanarak sağlanmıştır. Çalışma sonucunda, şişme ve büzülmenin, su muhtevasının bir alt ve üst limiti arasında meydana geldiği, alt limitin büzülme limitinden küçük, üst limitin ise tam doygun durumdan düşük olduğu vurgulanmıştır. İncelenen zeminler için; her bir kuruma ve ıslanma tekrardan sonra hacimdeki net azalmanın, şişme ve büzülmenin sabit limitler arasında meydana geldiği denge durumuna ulaşmaya kadar azaldığı belirtilmiştir (Şekil 2.30.).



Şekil 2.30. Bir kuruma – ıslanma eğrisi (Dif ve Bluemel, 1991)

Şişen zeminlerin yorulması temel olarak üç faktörden etkilenir;

1. Zemin tanelerinin sürekli olarak yeniden yerleşmesi nedeniyle içsel kil yapısının giderek yıkımı.
2. Kırıkların çatlakların gelişmesiyle yanal sınırlamanın kaybı
3. Zeminde mevcut kil mineral tipi (Dif ve Bluemel, 1991).

Rao vd. (2001) külle ve kireçle karıştırılmış zemin numunelerinin şişme davranışları üzerinde ıslanma ve kuruma tekrarlarının etkisini incelemiştir. Külle karıştırılmış numunelerde dört ıslanma ve kuruma tekrarından sonra, düşük şişme potansiyeline sahip zeminin, oldukça göçebilir bir zemine dönüştüğü belirtilmiştir. Kireçle karıştırılmış numunelerde ise dört ıslanma ve kuruma tekrarından sonra, stabilizasyonun yararlı etkisinin kısmen kaybolduğu vurgulanmıştır.

Rahimi ve Barootkoob (2002) çalışmalarında, ıslanma kuruma devirlerinin şişme potansiyeli üzerindeki etkisini incelemiştir. Düşük – orta plastisiteli kil zeminleri sabit su muhtevası ve sabit birim hacim ağırlık değerinde statik basınçla sıkıştırmışlar, ödometre şişme deneyleri yapmışlardır. Numuneler 60°C kurutulmuş ardından ıslatılarak tekrar şişmelerine izin verilmiştir. Çalışma sonucunda, üç ıslanma kuruma tekrarından sonra şişme yüzdesinin %9'dan %3'e düştüğünü belirtmişlerdir.

### **2.3.2.3. Sıcaklık**

Cho vd. (2000) yüksek seviyeli radyoaktif atık depolarında tampon malzemesi olarak kullanılan bentonitlerin şişme davranışı üzerinde sıcaklığın etkisini incelemiştir. Farklı birim hacim ağırlıklarda sıkıştırılarak hazırlanan bentonit numunelerinin şişme basınçlarını 20 – 80 °C aralığında ölçmüşler ve sıcaklığın artmasıyla şişme basıncının arttığını gözlemlemiştir. Ancak, araştırmacılar sıcaklıktaki değişim nedeniyle şişme basınçlarında gözlenen bu artışın çok büyük olmadığını ifade etmişlerdir.



Pusch vd. (1990), sıcaklığın artması sonucunda bentonitin yüzeyindeki su molekülü tabakasının ve bunun sonucu olarak hidrasyon basıncının azaldığını ifade etmişlerdir. Diğer taraftan, sıcaklığın artmasıyla, elektriksel çift tabakanın kalınlığı azalmakta ve bu nedenle ozmotik basınç artmaktadır (Yong ve Mohamed, 1992). Sıcaklığın artması ayrıca, boşluk suyu ve zemin iskeletinin farklı genleşmesine ve boşluk suyu basıncının artmasına neden olmaktadır (Ma ve Hueckel, 1992). Cho vd. (2000), ozmotik basınç ve boşluk suyu basıncındaki artışın hidrasyon basıncındaki azalma tarafından dengelendiğini ve bu nedenle 100 °C altındaki sıcaklıklar için sıcaklığın şişme basıncı üzerindeki etkisinin önemli olmadığını belirtmişlerdir.

Soemitro ve Indarto (2000) iki kil zeminin şişme karakteristikleri üzerinde sıcaklığın etkisini incelemişlerdir. Statik olarak sıkıştırılarak hazırlanan numuneler üzerinde, modifiye edilmiş bir ödometre kullanılarak 30,50 ve 70 °C sıcaklıklarda deneyler yapılmıştır. Sıcaklığın, sıkıştırılmış kilin şişme karakteristiklerini etkilediği gözlenmiştir.

#### **2.3.2.4. Kimyasal ve Organik Çevre**

Kimyasal tortular taneler arasında bağlayıcı olarak görev yapabilirler. Organik malzemeler, yüzey kuvvetlerini ve su adsorbsiyon özelliklerini etkiler.

Stalin vd. (2003) iki farklı bentonit ve bir doğal zemin kullanarak indeks ve mukavemet özellikleri üzerinde yapay olarak hazırlanan asit yağmurlarının etkisini incelemişlerdir. Zemin numuneleri 10, 20 ve 30 günlük kür süreleri için 3:1 oranında sülfürik asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ve nitrik asit (HNO<sub>3</sub>) bileşimine sahip asit yağmuruna maruz bırakılmıştır. Araştırmacılar, asit çözelti kirlenmesinin süresinin artmasıyla tüm zeminlerde serbest şişme indisinin değerini arttığını ifade etmişlerdir.

### 2.3.3. Gerilme Koşulları

#### 2.3.3.1. Gerilme Tarihçesi

Şişme basıncı uygulanan gerilme izine kuvvetli şekilde bağlıdır ve elde edilen sonuçlar farklı gerilme izleri için oldukça farklı olabilir. Aşırı konsolide bir zemin, aynı boşluk oranında fakat normal konsolide zeminden daha çok şişme özelliğine sahiptir. Eğer zemine, geçmişte, anizotropik gerilme sistemleri etki etmişse, genellikle anizotropik şişme karakteristikleri gelişmektedir. Doygun olmayan bir kilin ıslanması sonucunda; uygulanan gerilme değerine, gerilme tarihçesine ve emme değişimine bağlı olarak, şişme veya göçme meydana gelebilmektedir. Bu durum aktif kil mineralleri içeren yüksek oranda şişebilen killer için bile geçerlidir (Sharma ve Wheeler, 2000; Jullien vd., 2002; Ohri, 2003).

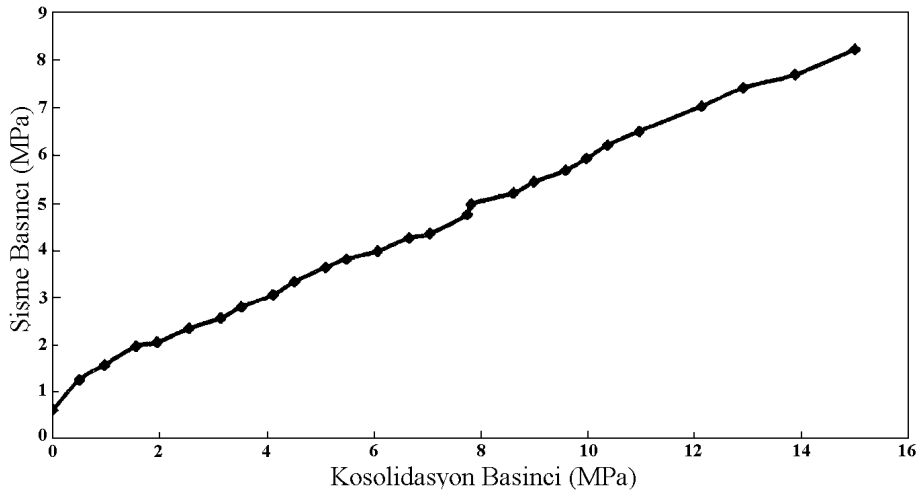
El Sayed ve Rabbaa (1986) çalışmalarında, laboratuarda ölçülen ve arazide gözlenen şişme karakteristikleri arasında bazı uyumsuzluklar olabileceğini belirtmişler ve bu farklılıkların nedenlerini incelemişlerdir. Şişme karakteristikleri üzerinde önemli etkileri olan kil mineral tipi, katyon değiştirme kapasitesi ve kil içeriği gibi zeminin kendi karakteristiklerinin arazi ve laboratuarda aynı etkiye sahip olduğuna dikkat çekmişlerdir. Ancak, laboratuvarında benzetimi zor olan gerilme izi, gerilme dağılımı, ölçek etkisi, yanal sınırlama vb. çevresel faktörlerin de arazideki zeminin şişme davranışı üzerinde etkili olduğu vurgulanmıştır.

Keskin (1993) İstanbul Neojen kilinin şişme davranışı üzerinde, zeminin mineralojik özelliklerinin, çevresel faktörlerin ve ön konsolidasyonun etkilerini incelemiştir. Ayrıca, laboratuvarında hazırlanan kil numunelerinin izotropik ve anizotropik gerilme koşulları altındaki şişme davranışını araştırmıştır. Yanal şişme davranışı modifiye edilmiş üç eksenli deney sistemi yardımıyla belirlenmiş ve yanal yönde meydana gelen şişme miktarının ihmal edilemeyecek boyutlarda olduğu ifade edilmiştir.

Wong (1998), La Biche şeylleri üzerinde farklı tuz konsantrasyonlarında serbest şişme, ödometre şişme ve yüklü şişme deneyleri yapmıştır. Şişme davranışının elektrolit konsantrasyonu, gerilme ve şişme tarihçesine bağlı olarak anizotropik

olduğu belirtilmiştir. Farklı şişme yüzdelere sahip şeyl numuneleri üzerinde drenajlı üç eksenli basınç deneyleri yapılmış ve şişme arttıkça Young modülünün azaldığı gözlenmiştir.

Jullien vd. (2002), Fo-Ca kilinin (Ca-Smektit) ön konsolidasyon basıncı ile şişme basıncı arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Farklı basınçlar altında aşırı konsolide hale getirilen numuneler üzerinde sabit hacim koşullarında şişme deneyleri yapmışlardır. Şekil 2.31. de, Fo-Ca kili için ön konsolidasyon basıncı ile şişme basıncı arasındaki ilişki görülmektedir.

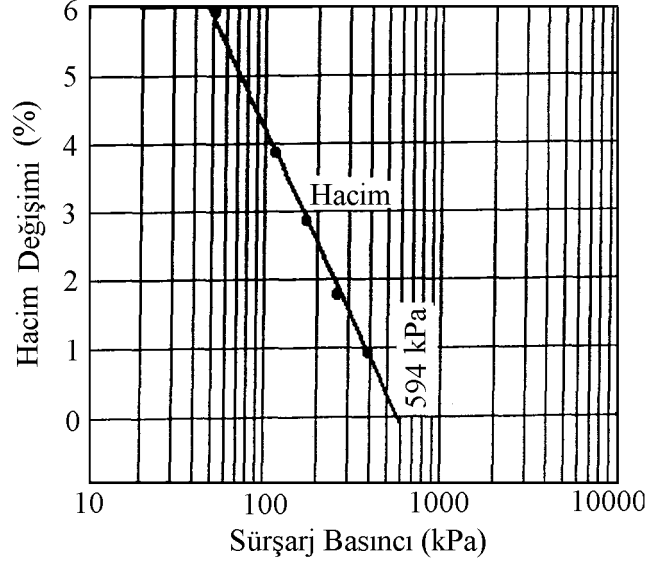


Şekil 2.31. Fo-Ca kilinin şişme basıncı ve konsolidasyon basıncı arasındaki ilişki (Jullien vd., 2002)

### 2.3.3.2. Jeolojik Yük

Zemine uygulanan sürşarj yükünün artmasıyla şişme miktarı azalmaktadır. Şişme basıncının ise uygulanan sürşarj yükünden bağımsız olduğu düşünülmektedir. Zeminin küçük bir miktar şişmesine izin verilmesi halinde ise şişme basıncı önemli ölçüde azalmaktadır (Gromko, 1974).

Holtz ve Gibbs (1956) aynı başlangıç koşullarına sahip numuneler üzerinde yaptıkları deneylerin sonucunda sürşarj yükünün artmasıyla şişmede meydana gelen azalmayı Şekil 2.32. de görüldüğü gibi vermişlerdir.



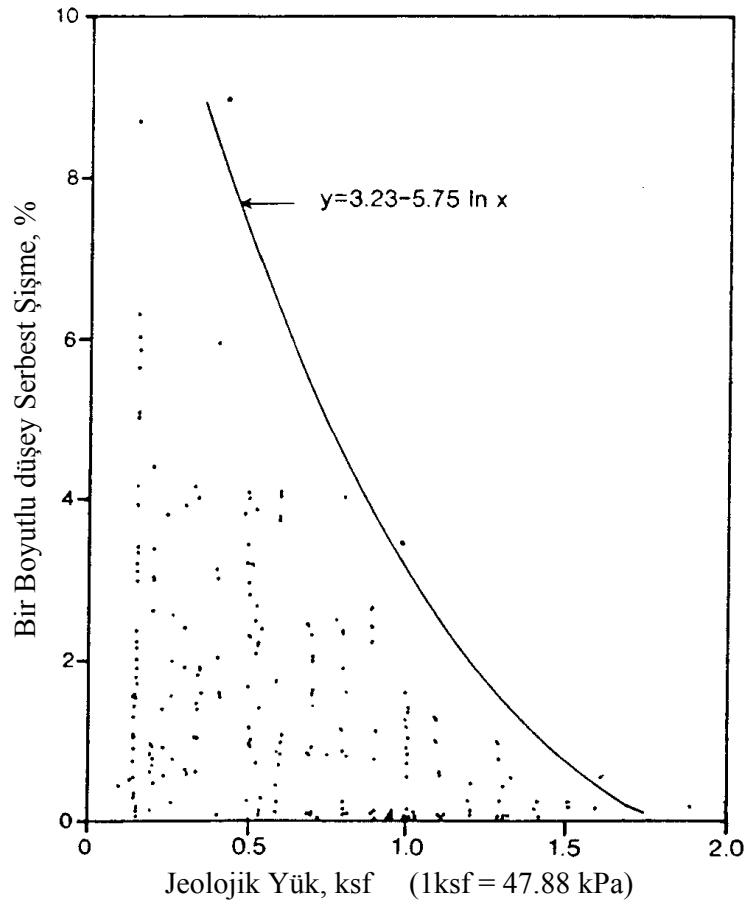
Şekil 2.32. Sürşarj basıncının aynı başlangıç koşullarına sahip numunelerin şişme yüzdesi üzerindeki etkisi (Holtz ve Gibbs, 1956)

Gilchrist (1963) ve Noble (1966) tarafından Regina kili üzerinde uygulanan yüklü şişme deneyleri sonucunda, sabit başlangıç su muhtevası ve boşluk oranı koşullarında; şişme ve uygulanan basıncın logaritması arasında lineer bir ilişki olduğu gözlenmiştir. Pidgeon (1987), bu lineer ilişkinin genel bir zemin özelliği olarak kabul edilebileceğini belirtmiştir (Shuai, 1996).

Shanker vd. (1982) çalışmalarında, yoğrulmuş black cotton killeri üzerinde, çeşitli sürşarj yükleri altında serbest şişme ödometre yöntemini kullanarak şişme basıncı ölçümleri yapmışlardır. Araştırmacılar, uygulanan sürşarj yükünün büyüklüğünün, ölçülen şişme basıncının büyüklüğü üzerinde herhangi bir etkiye sahip olmadığını ifade etmişlerdir. Justo vd. (1984) ise 5 kPa' dan daha küçük sürşarj yüklerinde, belirlenen şişme basınçlarının arttığını belirlemişlerdir.

Chen (1988) sabit su muhtevasında ve kuru birim hacim ağırlıkta hazırladığı numuneler üzerinde farklı sürşarj basınçları uygulayarak şişme deneyleri yapmıştır. Sürşarj yükünün artması sonucunda, şişme yüzdesinin azaldığını, ancak şişme basıncının sürşarjdan fazla etkilenmediğini belirtmiştir.

Sikh (1993) çalışmasında jeolojik yükün şişme potansiyeli üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada, Güney California'da çeşitli bölgelerden alınan numuneler, arazideki maruz kaldıkları jeolojik yüke eşit basınç altında ödometre hücresine yerleştirilmiş ve bu numuneler üzerinde bir boyutlu serbest şişme deneyleri yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda şişme ve jeolojik yük arasında Şekil 2.33. teki ilişki verilmiş ve yaklaşık 67 kPa jeolojik yük altında, numunelerin şişme yüzdelерinin %1'in altına düştüğü belirtilmiştir.



Şekil 2.33. Bir boyutlu düşey serbest şişme – jeolojik yük ilişkisi (Sikh, 1993)

## **2.4.Şişen Zeminlerin Tanımlanması ve Sınıflandırılması**

Şişen zeminlerin tanımlanması ve muhtemel şişme derecesinin önceden tahmin edilmesi, bu zemin problemi nedeniyle meydana gelebilecek hasarların engellenebilmesi veya minimum seviyeye indirilebilmesi açısından esas teşkil etmektedir.

Beklenen hacim değişikliğinin, ödometre deneylerinden yararlanılarak hesaplanması ve arazide gerçekleşecek kabarmannın tahmin edilmesi uzun süreler alabilmektedir. Bu sürenin azaltılabilmesi için, çeşitli araştırmacılar ödometre deney verileri ile zeminlerin fiziksel, kimyasal ve indeks özellikleri arasında ilişkiler kurmaya çalışmışlardır. Bu çalışmalar sonucunda, zeminlerin şişme-büzülme potansiyelini tahmin etmek için birçok deney ve yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler, genel olarak, doğrudan ve dolaylı yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır. Doğrudan yöntemler, zemin şişmesinin gerçek fiziksel ölçümleri olup, serbest şişme indisi deneyi, genişleme indisi deneyi, potansiyel hacim değişimi deneyi (PVC), CBR, COLE vb. deneylerin sonuçlarına bağlı olarak zeminin şişme potansiyelinin belirlenmesini ifade etmektedir. Dolaylı yöntemler ise, kıvam limitleri, aktivite, katyon değiştirme kapasitesi, emme indisi vb. zemin parametrelerinden yararlanılarak şişme potansiyelinin tahmin edildiği yöntemlerdir. Ayrıca, çeşitli zemin parametreleriyle şişme yüzdesi ve basıncını ilişkilendiren ampirik eşitlikler de mevcuttur. İlişkilerin elde edilmesinde kullanılan yöntemlerin farklı olabilmesine, ayrıca farklı coğrafi bölgelerde bu ilişkilerin kullanılabilirliğinin şüpheli olmasına rağmen; ampirik yöntemler beklenen hacim değişikliklerinin tahmin edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Thakur ve Singh, 2005b).

### **2.4.1. Doğrudan Yöntemler**

Su muhtevastaki değişikliklerin sonucu olarak, zeminde meydana gelecek şişmeyi doğrudan belirlemek için geliştirilen birkaç deney yöntemi mevcuttur. Bu yöntemler arasında en sık kullanılanları serbest şişme deneyi, genişleme indisi deneyi, CBR, PVC, ve COLE olarak sıralanabilir.

### 2.4.1.1.Serbest Şişme İndisi Deneyi

Serbest şişme indisi deneyi, zeminlerin şişme potansiyelinin tahmin edilmesinde çok yaygın olarak kullanılan, basit bir yöntemdir. Deney esasen, belirli miktardaki zeminin hacim ölçekli dereceli silindir içerisinde suda çökelen hacminin belirlenmesi şeklinde yürütülmekle birlikte, literatürde farklı araştırmacılar tarafından önerilmiş birkaç deney yöntemi mevcuttur.

Holtz ve Gibbs (1956)' e göre, deney 0.42 mm gözlü elekten geçen 10 cm<sup>3</sup> kuru zeminin, su ile doldurulmuş 100 cm<sup>3</sup> hacim ölçekli dereceli silindire boşaltılması ve dengeye ulaşıldıktan sonra zeminin şişen hacminin belirlenmesi şeklinde uygulanır. Serbest şişme indisi aşağıdaki eşitlikle belirlenir.

$$FS = \frac{V - V_0}{V_0} \times 100 \quad (2.18)$$

Burada

*FS* - Serbest şişme (%),

*V* - Şişme sonrası zemin hacmi (cm<sup>3</sup>),

*V<sub>0</sub>* - Kuru zemin hacmidir (cm<sup>3</sup>).

Bu yöntem, 10 cm<sup>3</sup> kuru zemin hacminin ölçülmesindeki zorluk ve kaolin killlerinde negatif şişme yüzdelerinin gözlenebilmesi gibi bazı sınırlamalara maruzdur (Sridharan vd., 1985).

Diferansiyel serbest şişme deneyi (Indian Standard (2720), 1977), serbest şişme deneyinde kuru zemin hacminin ölçümündeki belirsizliği engellemek amacıyla geliştirilmiştir. Bu deneyde, 425 µm gözlü elekten geçen, etüvde kurutulmuş, 10 gr ağırlığında iki numune kullanılır. Numunelerden biri, içerisinde kerosen veya CCl<sub>4</sub> bulunan, diğeri ise içerisinde saf su bulunan 100 ml hacim ölçekli dereceli silindire boşaltılır. Her bir silindirdeki zeminin denge durumundaki çökelti hacimleri belirlenerek, diferansiyel serbest şişme indisi Eşitlik 2.19 yardımıyla hesaplanır. Bu yöntemde de, kaolinit zeminler için negatif değerler gözlenmektedir (Sridharan vd., 1985, Sivapullaiah vd., 1987).

$$DFSI = \frac{V_d - V_k}{V_k} \times 100 \quad (2.19)$$

Burada,

$DFSI$  - Diferansiyel serbest şişme indisi (%),

$V_d$  - Saf suda çökelen zemin hacmi,

$V_k$  - Kerosen veya  $CCl_4$  içerisinde çökelen zemin hacmidir.

Sivapullaiah vd. (1987) serbest şişme prosedürlerinde karşılaşılan sorunlar nedeniyle, farklı ve daha kolay uygulanabilen modifiye serbest şişme indisini (MFSI) önermişlerdir. Bu indisin, zeminlerin mühendislik özellikleri ile daha iyi ilişki gösterdiğini öne sürmüşlerdir. Bu yöntemle göre, 10 gr kuru ağırlığındaki zemin, 100 ml saf su ile dolu hacim ölçekli silindire yavaşça boşaltılır. Zemin tanelerinin tamamen çökmesinin ardından, denge hacmi dereceli silindirden okunur. MFSI veya diğer bir ifadeyle serbest şişme boşluk oranı aşağıdaki eşitlikle belirlenir.

$$MFSI = \frac{V_d - V_s}{V_s} \quad (2.20)$$

Burada,

$MFSI$  - Modifiye serbest şişme indisi,

$V_d$  - Saf suda çökelen zemin hacmi,

$V_s$  - Zemin tanelerinin hacmidir.

Sivapullaiah vd. (1987) modifiye serbest şişme indisinin sıkıştırılmış numuneler için, hacim bazında hesaplanan likit limit ve ödometre şişme yüzdesi ile iyi bir ilişkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Şişme potansiyelinin tahmin edilmesinde Çizelge 2.9 da görülen sınıflandırmayı vermişlerdir.

Çizelge 2.9. Modifiye serbest şişme indisi ve şişme potansiyeli arasındaki ilişki (Sivapullaiah vd., 1987)

Likit Limit (Hacim bazında %)	MFSI	Şişme potansiyeli
<200	<2.5	Önemsiz
200-400	2.5 – 10	Orta
400-550	10 – 20	Yüksek
>550	> 20	Çok Yüksek



Kullanılan bir diğer yöntemde göre ise, içerisinde 40 ml saf su bulunan 100 ml hacim ölçekli dereceli silindir içine 10 gr ağırlığında kuru zemin numunesi boşaltılır ve süspansiyon karıştırılır. Zemin numunesinin tamamıyla ıslandığından emin olmak için 24 saat bekletilir. Sonra dereceli silindire 100 ml' ye kadar su ilave edilir ve numunenin denge hacmine ulaşması için sarsmadan bırakılır. Dengelenme sürecinin sonunda, zemin numunesinin çökelti hacmi kaydedilir ve serbest şişme indisi aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır (Sridharan ve Rao,1988).

$$FSI = \frac{V_d}{10} \quad (2.21)$$

Burada,

$FSI$  - Serbest şişme indisi ( $\text{cm}^3/\text{gr}$ ),

$V_d$  - Saf suda çökelen zemin hacmidir

Sridharan ve Rao (1988), 18 farklı zemin numunesi üzerinde yaptıkları çalışmalar sonucunda, indeks özellikleriyle karşılaştırıldığında, şişme potansiyelinin tahmin edilmesinde serbest şişme indisi yönteminin kullanılmasının daha güvenilir olduğunu ifade etmişler ve hem kaolinitlerde hem de montmorillonitlerde kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Sridharan vd. (1986) suda ve karbon tetra kloritte ( $\text{CCl}_4$ ) gözlenen çökelti hacimlerine bağlı olarak, zeminlerin şişme potansiyelinin tahmin edilmesinde Çizelge 2.10. da görülen sınıflandırmayı önermişlerdir.

Çizelge 2.10. Serbest şişme indisi ile zemin şişme potansiyeli tahmini (Sridharan vd., 1986)

FSI ( $\text{m}^3/\text{Mg}$ )	$\text{CCl}_4$ teki çökelti hacmi ( $\text{m}^3/\text{Mg}$ )	Kil tipi	Şişme potansiyeli
<1.5	1.1 – 3.0	Şişmeyen	Önemsiz
1.5 – 2.0	>1.1 ve <FSI	Şişmeyen- şişen karışımı	Düşük
1.5 – 2.0	$\leq 1.1$	Şişen	Orta
2.0 – 4.0	$\leq 1.1$	Şişen	Yüksek
>4.0	$\leq 1.1$	Şişen	Çok yüksek

Sridharan vd. (1990) zeminlerin şişme potansiyellerinin tahmin edilmesinde, temel olarak yukarıda bahsedilen serbest şişme yöntemlerine benzeyen bir diğer yöntem önermişlerdir. Çalışmada, etüvde kurutulmuş, No. 200 eleğinden geçen 10 gr ağırlığındaki zemin numunesinin, % 0.025 NaCl içeren 100 ml çözelti ve 100 ml kerosen içindeki denge çökelti hacimleri belirlenmiştir. %0.025 NaCl çözeltisi içindeki çökelti hacminin kerosendekine oranı, çökelti hacim oranı olarak tanımlanmış ve bu orana dayanan şişme potansiyeli sınıflandırma sistemi verilmiştir (Çizelge 2.11.). Önerilen sınıflandırmanın sonuçları ile odometre deney sonuçlarının iyi uyum içerisinde oldukları vurgulanmıştır. Araştırmacılar, özellikle montmorillonitlerde saf su içerisinde denge çökelti hacmine ulaşılmasının 24 saatten daha uzun sürdüğünü; %0.025 NaCl çözeltisi kullanıldığında ise bu sürenin 24 saatin altına indiğini ve montmorillonitler için saf sudakine yakın çökelti hacimleri elde edildiğini ifade etmişlerdir.

Çizelge 2.11. Çökelti hacim oranı ile şişme potansiyeli tahmini (Sridharan vd., 1990)

Çökelti hacim oranı	Şişme Potansiyeli
$\leq 1.00$	Önemsiz
1.00 – 1.5	Düşük
1.5 – 2.25	Orta
2.25 -4.5	Yüksek
$> 4.5$	Çok Yüksek

Das (1995) serbest şişme indisi yönteminin, zeminin şişme yeteneğini gerçekçi biçimde ifade ettiğini, çünkü zeminde mevcut kil mineral tipini ve herhangi bir sıvıda zeminin çökelti hacmini yansıtan itki ve çekim kuvvetlerini dikkate aldığını ifade etmiştir (Sivapullaiah ve Savitha, 1999).

#### 2.4.1.2.Genişleme İndisi Deneyi

Genişleme indisi deneyi, 1960'lı yılların sonlarında Amerika'da geliştirilmiştir. ASTM (ASTM D4829-88) ve Üiform Yapı Şartnamesi (UBC) tarafından standart (Standart No 29-2 UBC, 1991) olarak kabul edilmiştir. Deney, zeminin No 4. eleğinden geçen kısmı üzerinde yapılmaktadır. Zemin, yaklaşık olarak optimum su muhtevasına sahip olana kadar, saf su ile karıştırılır ve hava geçirmeyen bir kapta en

az 16 saat bekletilir. Daha sonra, 10.19 cm çapındaki ve 5.1 cm yüksekliğindeki standart kalıp içine iki tabaka halinde sıkıştırılır. Kalıp alt ve üst olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır ve alt kısmında çıkarılabilen çelik bir ring bulunmaktadır. Her bir zemin tabakası, 2.5 kg ağırlığındaki tokmağın 30.5 cm'den 15 defa düşürülmesi ile sıkıştırılır. Kalıp söküldükten sonra, ringin alt ve üstünde kalan zemin traşlanır. Ring, ödometre veya benzer bir yükleme aletine yerleştirilir. 6.9 kPa lık sürşarj yükü uygulanır, numune su altında bırakılarak, hacim değişimi 24 saate kadar gözlenir. Genişleme indisi Eşitlik 2.22 yardımıyla hesaplanarak en yakın tam sayı olarak kaydedilir (Nelson ve Miller, 1992, Sikh, 1993).

$$EI = 100 \cdot S \cdot F \quad (2.22)$$

Burada,  
*EI* - Genişleme indisi,  
*S* - Şişme yüzdesi,  
*F* - No 4 eleğinden geçen zemin yüzdesidir.

Zeminin genişleme potansiyeli, genişleme indisine göre Çizelge 2.12. de görüldüğü şekilde sınıflandırılmaktadır.

Çizelge 2.12. Genişleme indisine bağlı olarak zeminin genişleme potansiyelinin sınıflandırılması (ASTM D 4829-88)

Genişleme İndisi (EI)	Genişleme Potansiyeli
0-20	Çok düşük
21-50	Düşük
51-90	Orta
91-130	Yüksek
>130	Çok yüksek

#### 2.4.1.3. Lineer Genişleyebilirlik Katsayısı (COLE)

Lineer genişleyebilirlik katsayısı (COLE) deneyi, şişen zeminlerin karakterize edilmesi için kullanılan bir büzülme deneyidir. Deney örselenmemiş bir numunenin 33 kPa emme durumu ile fırında kurutulmuş emme (1000 kPa) durumu arasındaki lineer deformasyonunun belirlenmesinden oluşur. Metoda göre, örselenmemiş zemin numunesi, su için geçirimsiz ancak su buharı için geçirimli olan esnek plastik reçine

ile kaplanır. Daha sonra bu doğal zemin toprakları, basınçlı bir kap içinde 33 kPa zemin emmesine getirilir. Zeminlerin hacimleri Arşimet prensibi yardımıyla belirlenir. Daha sonra numuneler fırında kurutulur ve benzer şekilde diğer hacim ölçümleri yapılır. COLE, nemli durumdan kuru duruma geçirildiğinde numune boyutundaki değişimin ölçümüdür ve 33 kPa emme ile fırında kurutulmuş topağın hacim ağırlıklarından belirlenir. COLE değeri Eşitlik 2.23 kullanılarak belirlenir.

$$COLE = \Delta L / \Delta L_D = (\gamma_{kD} / \gamma_{kM})^{0.33} - 1 \quad (2.23)$$

Burada,

$COLE$  - Lineer genişleyebilirlik katsayısı,

$\Delta L / \Delta L_D$  - Kuru boyutlara bağlı lineer deformasyon,

$\gamma_{kD}$  - Fırında kurutulmuş numunenin kuru birim hacim ağırlığı,

$\gamma_{kM}$  - 33 kPa emmede numunenin kuru birim hacim ağırlığıdır.

COLE yüzde olarak ta hesaplanabilmekte ve bu durumda lineer genişleyebilirlik yüzdesi (LEP) olarak isimlendirilmektedir. Amerika Birleşik Devletleri Ziraat Departmanı Doğal Kaynakları Koruma Servisi tarafından verilen şişme – büzülme potansiyeli sınıflandırması Çizelge 2.13. te görülmektedir (USDA, 2005).

Çizelge 2.13. Şişme – büzülme potansiyelinin lineer genişleyebilirlik katsayısı ve lineer genişleyebilirlik yüzdesine bağlı olarak sınıflandırılması (USDA, 2005).

COLE	LEP	Şişme – Büzülme Potansiyeli
< 0.03	< 3	Düşük
0.03 - 0.06	3 - 6	Orta
0.06 - 0.09	6 - 9	Yüksek
$\geq 0.09$	$\geq 9$	Çok Yüksek

COLE, Potansiyel hacim değiştirme (PVC) deneyinden elde edilen şişme indisi (SI) ve diğer şişme parametreleriyle ilişkilendirilmiştir (Mc Cormack ve Wilding, 1975; Parker vd., 1977; Shafer ve Singer, 1976).

#### 2.4.1.4.Potansiyel Hacim Değiştirme (PVC) Deneyi

Deney, doğal su muhtevasında yoğrulmuş numunenin, 2600 kJ/m<sup>3</sup> lük modifiye proktor sıkıştırma g¼c¼yle bir ¼dometre ringine yerleştirilmesi, numunenin ıslatılması ve y¼k halkasına karşı şişmesine izin verilmesi şeklinde uygulanır. şişme indisi, y¼k halkasındaki basınç olarak kaydedilmektedir. şişme – b¼z¼lme potansiyelinin, potansiyel hacim değiştirme deneyinin sonuçlarına bağlı olarak sınıflandırılmasında ¼izelge 2.14. kullanılmaktadır (Soil Survey Staff, 1993).

¼izelge 2.14. şişme – b¼z¼lme potansiyelinin PVC deneyi sonuçlarına bağlı olarak sınıflandırılması (Soil Survey Staff, 1993)

şişme Basıncı (kPa)	şişme – B¼z¼lme Potansiyeli
< 81	D¼ř¼k
81–153	Orta
153–225	Y¼ksek
> 225	¼ok Y¼ksek

#### 2.4.1.5.Kalifoniya Taşıma Oranı (CBR)

CBR deneyi, karayolu ve havaalanı kaplamalarının projelendirilmesinde yoğun olarak kullanılan bir penetrasyon direnci deneyidir. Zemin, 6 inç (152 cm) ¼apındaki CBR deney silindirine farklı su muhtevaları ve yoğunluklarda sıkıştırılır, sonra bir s¼rřarj y¼k¼ altında 4 g¼n s¼reyle suda bırakılır. S¼rřarj y¼k¼ zeminin arazide maruz kalacağı statik gerilmeye uygun olarak se¼ilir. şişme okumaları 4 g¼nl¼k ıslatma periyodundan ¼nce ve sonra bir ¼lç¼m saatiyle alınır. şişme y¼zdesinin hesaplanması i¼in Eşitlik 2.24 kullanılmaktadır (AASHTO T 193, 1993).

$$S = \frac{\Delta H}{116.43} \times 100 \quad (2.24)$$

Burada,

$S$  - şişme y¼zdesi,

$\Delta H$  - Y¼kseklikteki değişimdir (mm).

## 2.4.2. Dolaylı Yöntemler

Şişen zeminleri tanımlamak ve sınıflandırmak için likit limit, plastisite indisi, büzülme limiti, büzülme indisi, serbest şişme indisi, aktivite, kation değiştirme kapasitesi, emme indisi, zeminin mineralojik ve spektral özellikleri gibi parametreler kullanılmaktadır (Sridharan ve Prakash, 2000; Kariuki ve Van der Meer, 2004).

### 2.4.2.1.Kil Mineralojisi

Kil mineralojisi, şişen zemin davranışını kontrol eden temel faktörlerden biridir. Bu nedenle şişme potansiyelinin tahmin edilmesinde, zemin mineralojisinin bilinmesi önemli yararlar sağlamaktadır. Çizelge 2.15. te çeşitli kil mineralleri ile şişme potansiyeli arasındaki ilişki görülmektedir.

Çizelge 2.15. Kil mineralleri ile şişme potansiyeli arasındaki ilişki (Mitchell, 1976)

Kil Minerali	Şişme Potansiyeli
Kaolinit	Çok düşük
İllit	Orta
Montmorillonit	Yüksek
Vermikülit	Yüksek
Klorit	Yok

Kil minerallerinin tanımlanmasında çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Bunlar arasında en yaygın olanları; X-ray difraksiyon (XRD), diferansiyel termal analiz (DTA), tarayıcı elektron mikroskobu (SEM), kızılötesi spektroskopisi ve boya adsorpsiyonu olarak sıralanabilir (Tovey, 1986).

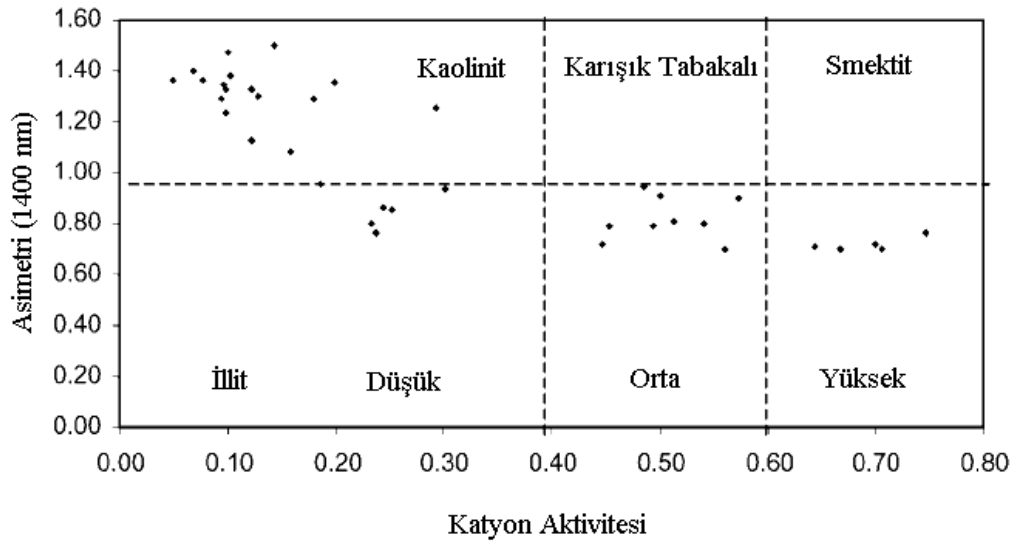
Zeminlerin spektral özellikleri de, şişme potansiyellerinin tanımlanmasında kullanılmaktadır. Spektral karakteristikler, bileşim, strüktür ve atomik bağ karakteristiklerine bağlı olarak, mineralden minerale değişmektedir. Böylelikle spektral analiz sonuçlarından zemin içerisindeki mineral tipi tanımlanabilmekte ve şişme potansiyeli tahmin edilebilmektedir (Kariuki ve Van der Meer, 2003a).

Chabrillat vd. (2000) şişen zeminlerin spektral özelliklerini incelemişler, X-ray difraksiyon analizleri ile spektral analiz sonuçlarının uyumlu olduğunu ve hiperspektral uzaktan algılama sensörleri kullanılarak arazide şişen zeminlerin tanımlanmasının ve haritalanmasının mümkün olabileceğini ifade etmişlerdir.

Kariuki ve Vander Meer (2003a) çalışmalarında, killerin şişme potansiyeli ile zeminlerin spektral karakteristikleri arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Zemin numunelerinin spektrumlarının elde edilmesinde taşınabilir kızıl ötesi mineral çözümleyici (PIMA) ile modifiye edilmiş bir spektrometre kullanılmıştır. Ayrıca şişme potansiyelinin sınıflandırılmasında yaygın olarak kullanılan birkaç şişme indisi (COLE, PI, CEC) ile zeminlerin şişme özellikleri belirlenmiştir. Sonuç olarak, spektral parametrelerin; kil mineralojisine bağlı olarak zemin şişme özelliklerinin tahmininde uygun sonuçlar gösterdiği vurgulanmıştır. Ayrıca, uyduların spektral çözünürlüklerinin artmasıyla, spektral parametrelerin şişen zeminlerin haritalanmasında yeni bir yöntem olarak ortaya çıkacağı belirtilmiştir.

Kariuki ve Van der Meer (2003b), Güney İspanya'da Antequerra üzerindeki hiperspektral hava sensörü DAIS-7915 den elde edilen veriler ile CEC, COLE ve doymuş su muhtevası gibi zeminin şişme potansiyelinin tanımlanmasında yararlanılan üç fiziko-kimyasal zemin parametresini kullanarak, nicel bir zemin şişme potansiyeli haritası oluşturmaya çalışmışlardır. Spektral verilerin şişme potansiyelinin tahmin edilmesinde kullanılabileceğini vurgulamışlardır.

Kariuki vd. (2003), katyon aktivitesi ve bir spektral karakteristik olan 1400 nm deki asimetriye bağlı olarak mineraloji ve şişme potansiyelinin tahmin edilmesinde kullanılabilecek bir grafik vermişlerdir (Şekil 2.34).



Şekil 2.34. Kasyon aktivitesi ve asimetreye bağlı olarak mineraloji ve şişme potansiyelinin tahmini (Kariuki vd., 2003)

#### 2.4.2.2. İndeks Özellikleri

Şişme potansiyelinin, kıvam limitleri kullanılarak tahmin edilmesi en yaygın yaklaşımlardan biridir. Altmeyer (1955) şişme potansiyelinin tahmin edilmesi için rötire limiti veya lineer rötrenin kullanımını önermiştir (Çizelge 2.16.).

Çizelge 2.16. Şişen zeminlerin, rötire limiti ve lineer rötreye bağlı olarak sınıflandırılması (Altmeyer,1955)

Lineer rötire	Rötire limiti (%)	Muhtemel şişme (%)	Şişme derecesi
<5	>12	<0.5	Kritik değil
5-8	10-12	0.5-1.5	Sınır
>8	<10	>1.5	Kritik

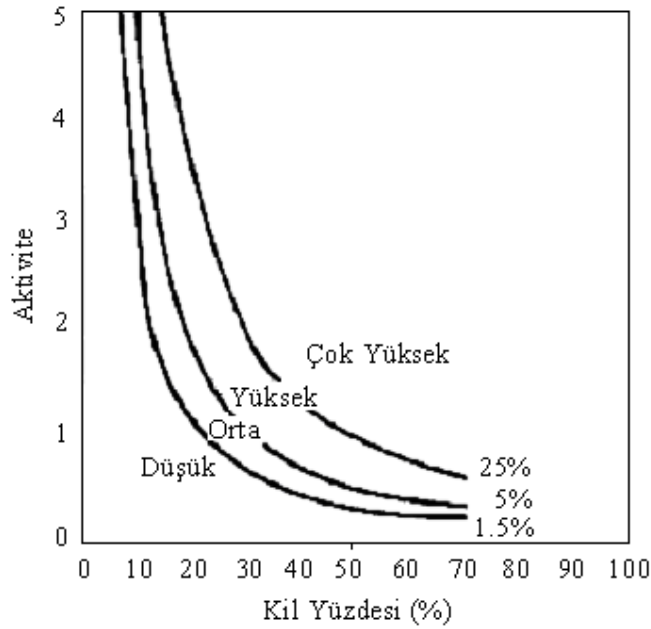
Holtz ve Gibbs (1956) tarafından verilen ve örselenmemiş zemin numunelerindeki şişme davranışına dayanan kriterlerler ise Çizelge 2.17. 'de görülmektedir.



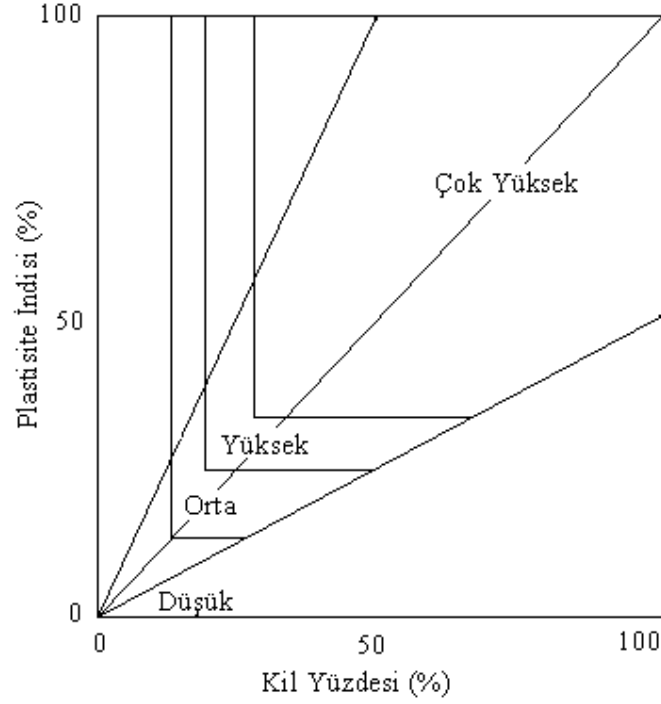
Çizelge 2.17. Şişen zeminlerin, kolloid içeriği, plastisite indisi ve rötre limitine bağlı olarak sınıflandırılması (Holtz ve Gibbs,1956)

Kolloid içeriği (<0.0001mm)	Plastisite indisi (%)	Rötre limiti (%)	Muhtemel şişme (%)	Şişme derecesi
>28	>35	<11	>30	Çok yüksek
20-31	25-41	7-12	20-30	Yüksek
13-23	15-28	10-16	10-20	Orta
<15	<18	>15	<10	Düşük

Seed vd. (1962) sıkıştırılmış killerin şişme karakteristikleri üzerine yaptıkları çalışmada, aktivite ve kil boyutlu tanelerin yüzdesine dayanan bir kart geliştirmişlerdir (Şekil 2.35.). Van der Merwe (1964) ise plastisite indisi ve kil yüzdesine bağlı olarak, şişme potansiyelinin tahmin edilmesi için Şekil 2.36.' da görülen kartı vermişlerdir. Chen (1965) şişme potansiyelini tahmin etmek için kil yüzdesi, likit limit ve standart penetrasyon darbe sayıları arasında bir ilişki geliştirmiştir. Raman (1967), şişme derecesini; plastisite indisi ve rötre indisinin bir fonksiyonu olarak ifade etmiştir.



Şekil 2.35. Kil yüzdesi ve aktiviteye bağlı şişme potansiyeli kartı (Seed vd., 1962)

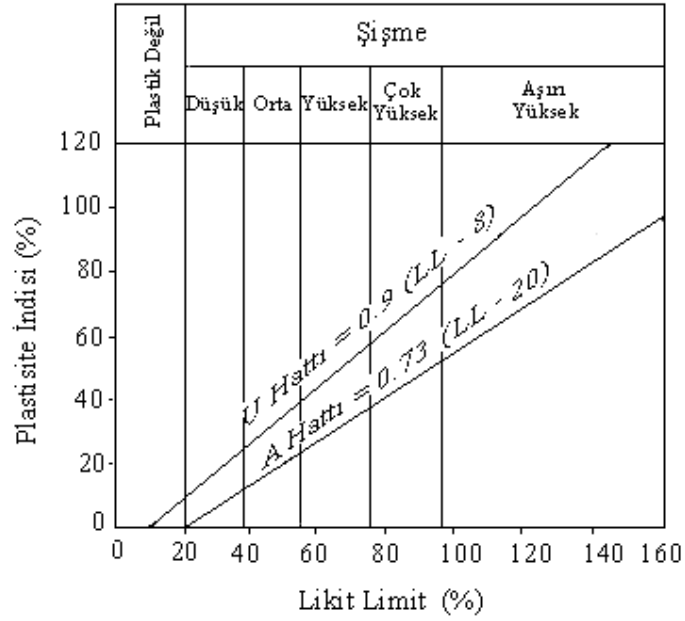


Şekil 2.36. Kıl yüzdesi ve plastisite indisine bağlı şişme potansiyeli kartı (Van der Merwe, 1964)

Dakshanamurty ve Raman (1973) zeminlerin şişme potansiyelinin tahmin edilmesinde plastisite kartından yararlanmışlardır. Şekil 2.37. de Raman ve Dakshanamurty (1973) tarafından önerilen sınıflandırma kartı görülmektedir. Yine Chen (1988) sadece plastisite indisini kullanarak şişen zeminlerin tanımlanması için bir metod önermiştir (Çizelge 2.18.). Snethen vd. (1977) potansiyel şişmenin tahmini için çeşitli araştırmacılar tarafından verilen 17 kriteri değerlendirmişler, likit limit ve plastisite indisinin, doğal koşullar ve çevre ile birlikte potansiyel şişmenin en iyi göstergeleri olduğunu belirtmişlerdir.

Çizelge 2.18. Şişme potansiyelinin plastisite indisine bağlı olarak tahmini (Chen, 1988).

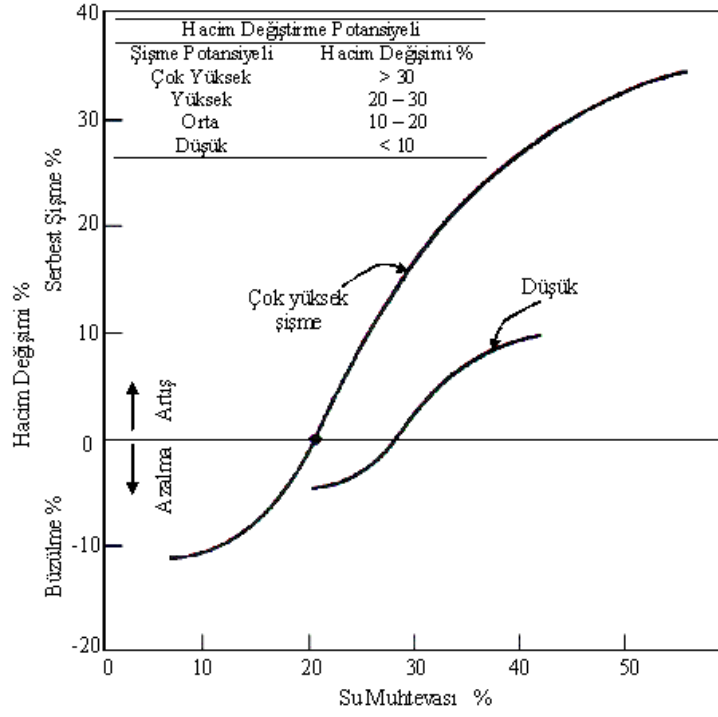
PI	Şişme Potansiyeli
$PI \geq 35$	Çok yüksek
$20 \leq PI \leq 55$	Yüksek
$10 \leq PI \leq 35$	Orta
$PI \leq 15$	Düşük



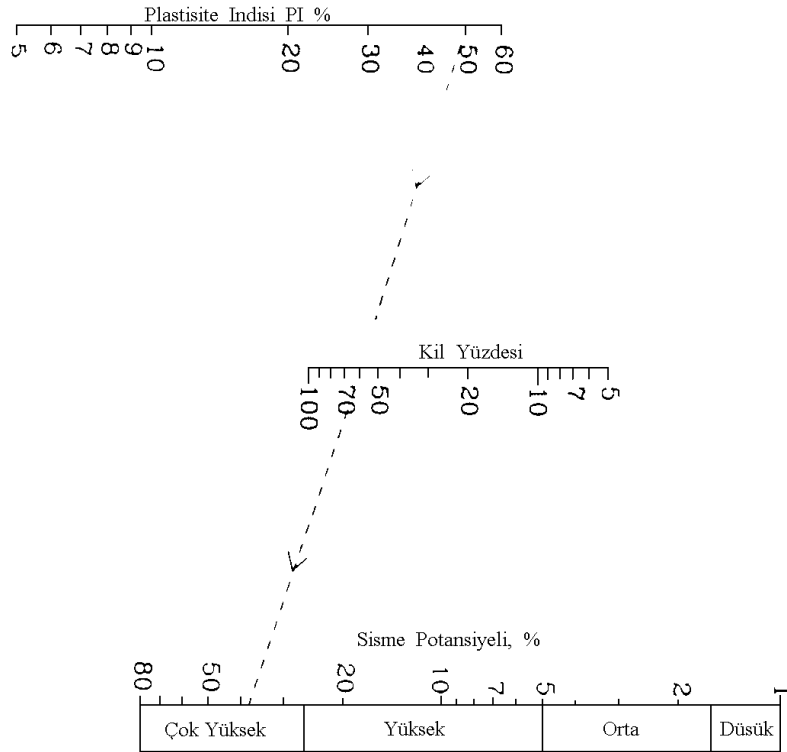
Şekil 2.37. Plastisite indisi ve likit limite bağlı şişme potansiyeli kartı (Dakshanamurthy ve Raman, 1973)

Hanafy (1991) kuru zeminlerin su adsorbe ederek şişmesi sırasında su muhtevası ile hacim değişimi arasındaki ilişkiyi S eğrisi olarak tanımlamış ve kurumuş killerin şişme potansiyelinin tahmin edilmesinde yararlanılabilecek bir şişme potansiyeli kartı vermiştir (Şekil 2.38.).

Basma (1993) 128 doğal zemin numunesi üzerinde yaptığı deney sonuçlarına bağlı olarak, standart AASHTO maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevasında sıkıştırılan bir numunenin 6.9 kPa basınç altındaki şişme yüzdelerinin tahmin edilebilmesi için; likit limit, plastisite indisi, kil yüzdesi, kolloid yüzdesi ve aktivite parametrelerini kullanarak çoklu regresyon analizleri yapmıştır. Analizlerin sonuçlarına bağlı olarak şişme potansiyelinin tahmin edilmesi için Şekil 2.39.'da görülen sınıflandırma kartını vermiştir.



Şekil 2.38. Şişme potansiyeli kartı (Hanafy, 1991)

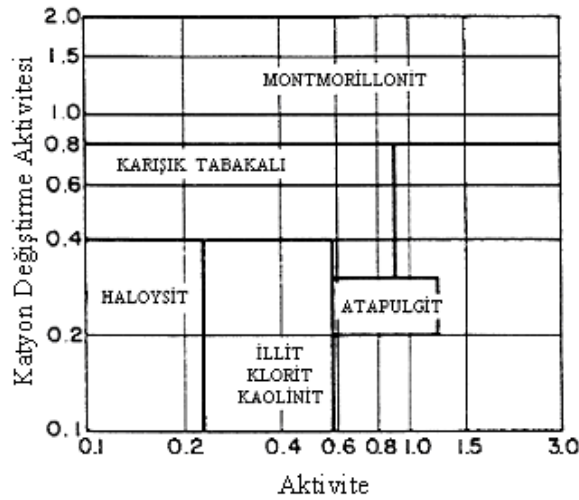


Şekil 2.39. Kil yüzdesi ve plastisite indisine bağlı şişme potansiyeli tanımlama kartı (Basma, 1993)

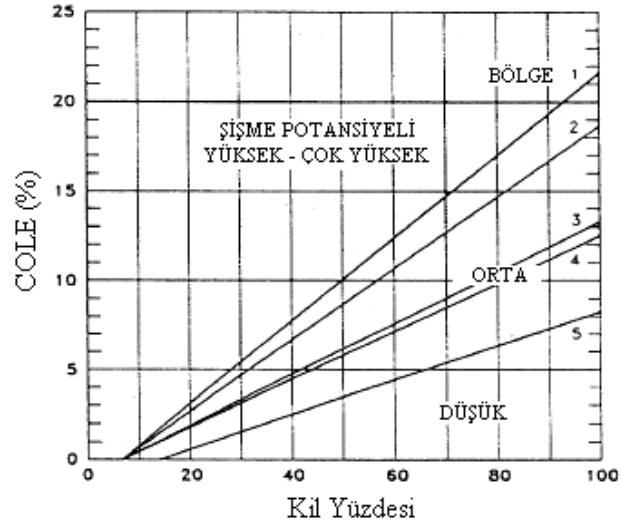
Karuiki ve Van Der Meer (2003) zeminlerin şişme potansiyelinin esasen kil tipine bağlı olduğunu, bu nedenle zeminin şişme potansiyelinin karakterize edilmesinde kil tipini ifade eden parametrelerinin daha anlamlı sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Çalışmada kil yüzdesi ile şişme potansiyeli arasında zayıf bir ilişki olduğu gözlenmiştir. Ancak, şişme potansiyeli ile; CEC, PI, LL, doygunluk su muhtevası ve kil mineralojisi arasında kuvvetli ilişkiler elde edildiği belirtilmiştir.

### 2.4.2.3.Zeminlerin Diğer Özellikleri

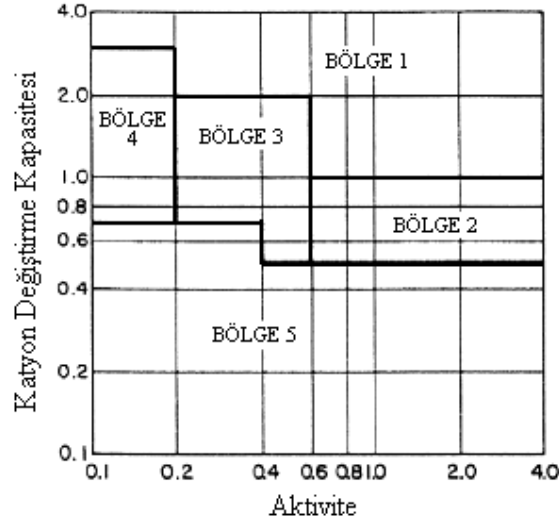
Parker vd. (1977) şişme potansiyelinin tanımlanmasında, şişme indisi ve plastisite indisinin kullanılmasının, diğer parametrelere göre daha iyi sonuçlar verebileceğini belirtmişlerdir. Holt (1969) mineraloji, kil aktivitesi (A), ve kation değişirme aktivitesi ( $CEA = CEC/kil\ yüzdesi$ ) arasındaki ilişkilere dayanan bir sınıflandırma kartı geliştirmiştir. Zeminleri, A – CEA kartı üzerindeki belirli bölgeler için şişme potansiyeli ve baskın kil mineralleri açısından sınıflandırmıştır (Şekil 2.40.). McKeen ve Hamberg (1981) COLE değeri ile kil yüzdesinin kullanarak şişme potansiyelinin tahmin edildiği yeni bir sınıflandırma kartı geliştirmişlerdir. Bu sınıflandırma kartı Şekil 2.41. de görülmektedir. Araştırmacılar, COLE değerinin bilinmemesi durumunda, kation değişirme kapasitesi ve aktivite değerlerinin kullanılarak hem COLE değerinin hem de şişme potansiyelinin tahmin edilebileceği ayrı bir kart (Şekil 2.42.) vermişlerdir.



Şekil 2.40. Kil mineralojisinin kation değişirme kapasitesi ve aktiviteye bağlı olarak belirlenmesi (Holt, 1969)

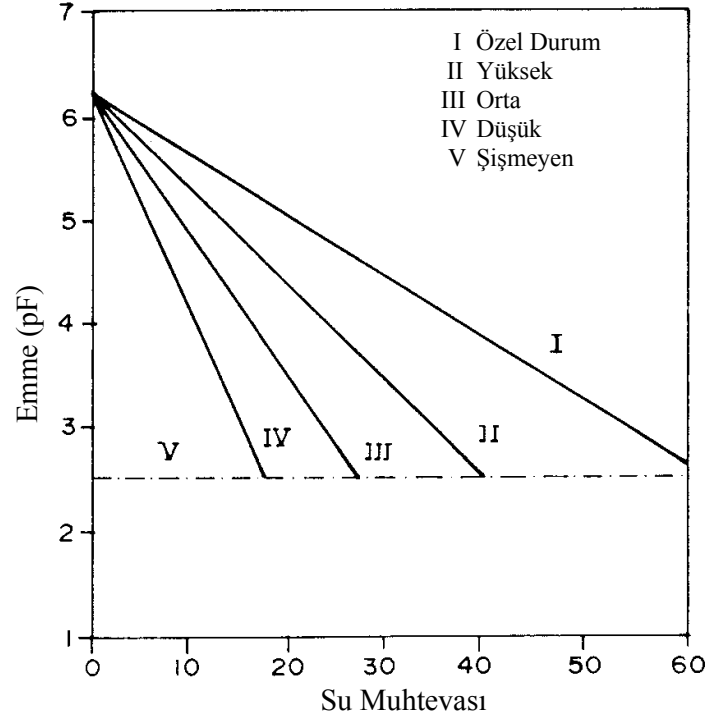


Şekil 2.41. Şişme potansiyelinin kil yüzdesi ve COLE değerine bağlı olarak belirlenmesi (McKeen ve Hamberg, 1981).



Şekil 2.42. COLE bölgelerinin ve zemin şişme potansiyelinin aktivite ve katyon değiştirme kapasitesine bağlı olarak belirlenmesi (McKeen ve Hamberg, 1981).

Mc Keen (1992) tarafından geliştirilen bir diğer yaklaşım; zemin emmesi ile su muhtevası arasındaki ilişkiye bağlı olarak zeminlerin şişme potansiyelinin tahmin edilmesidir (Şekil 2.43, Çizelge 2.19.)



Şekil 2.43. Emme basıncı - su muhtevası ilişkisine dayanan şişme potansiyeli kartı (McKeen, 1992)

Çizelge 2.19. Zemin emmesi ile ilişkili zemin özelliklerine bağlı şişme potansiyeli sınıflandırması (McKeen, 1992)

Kategori	$\Delta\Psi / \Delta w$ (pF/%)	Şişme potansiyeli
I	> -6	Çok Yüksek
II	-6 ile -10	Yüksek
III	-10 ile -13	Orta
IV	-13 ile -20	Düşük
V	< -20	Yok

Thomas vd. (2000) çalışmalarında 12 farklı şişen zemin için şişme potansiyeli ile zemin özellikleri ve çeşitli şişme büzülme indislerini ilişkilendirmeyi amaçlamışlardır. Şişme potansiyeli ile ilişkilendirilmek üzere CEC, Atterberg limitleri, kil mineralojisi (şişen 2:1 mineralleri yani, smektit yüzdesi + 1/2 vermikülit yüzdesi) ile ilgili deneyler yapılmıştır. Şişen 2:1 kil mineralleri, CEC ve likit limit değerlerinin şişme indisi ile önemli bir ilişkiye sahip olduğu gözlenmiştir. COLE ve Plastisite indisi değerlerinin ise önemli bir ilişkisi görülmemiştir. Thomas

vd. (2000) şişen zemin indisi (ESI) olarak isimlendirilen ve şişen 2:1 kil mineral yüzdesi, CEC, şişme indisi ve likit limit değerlerinin toplamı olarak bulunan bir değerle (ESI), zeminin şişme potansiyelini sınıflandırmışlardır. Buna göre;

ESI >500 yüksek – çok yüksek şişme potansiyelini

ESI < 500 orta – yüksek şişme potansiyelini ifade ettiğini belirtmişlerdir.

Karuiki ve Van Der Meer (2003a) çalışmalarında, şişme potansiyeli ile Atterberg limitleri, katyon değiştirme kapasitesi, doygunluk su muhtevası, değişebilir katyonlar, aktivite ve katyon değiştirme aktivitesi gibi parametreler arasındaki ilişkileri incelemişlerdir. Elde edilen bulgulara dayanılarak ve literatürdeki diğer çalışmalardan da yararlanılarak üç farklı şişen zemin indisi geliştirilmiş ve bu indislere bağlı olarak şişen zeminler için sınıflandırma tablosu verilmiştir (Çizelge 2.20.).

$$ESI1 = A + CEA + SSP + LEP \quad (2.25)$$

$$ESI2 = A + CEA + SSP \quad (2.26)$$

$$ESI3 = SSP \quad (2.27)$$

Burada,

*A* - Aktivite,

*CEA* - Katyon değiştirme aktivitesi,

*SSP* - Doymunluk su muhtevası,

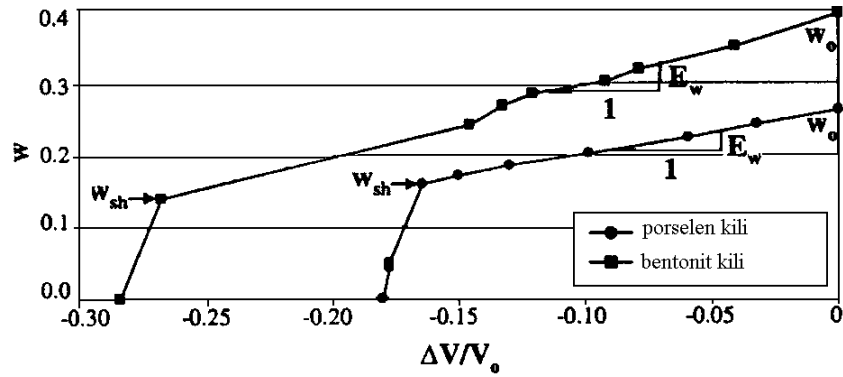
*LEP* - Lineer genişleyebilirlik yüzdesidir.

Çizelge 2.20. Şişen zemin indisine (ESI) bağlı sınıflandırma (Karuiki ve Van Der Meer, 2003a)

<i>ESI1</i>	<i>ESI2</i>	<i>ESI3</i>	Mineraloji	Potansiyel
<1.15	<1.10	<0.5	Kaolinit	Düşük
1.15 – 2.15	1.1 - 2.0	0.5 - 1.0	İllit/karışık tabaka mineralleri	Orta
>2.15	>2.0	>1.0	Smektit	Yüksek



Briaud vd. (2003) şişme - büzülme potansiyelinin sınıflandırılması için farklı bir büzülme deneyi geliştirmişlerdir. Deney silindir şeklinde zemin numunesinin belirli sıcaklık altında serbestçe büzülmesine izin verilmesi ve bu sırada belirli aralıklarla hacim değişiminin ve su muhtevasının belirlenmesi şeklinde uygulanmaktadır. Deney sonrasında ölçülen su muhtevası - hacim değişimi değerleri şekil 2.44.' te görüldüğü gibi bir grafik olarak çizilmekte ve büzülme limiti belirlenmektedir. Araştırmacılar serbest şişme ödometre deneyinin sonuçlarına bağlı olarak, şişme - büzülme indisi (Eşitlik 2.28) adını verdikleri bir parametre geliştirmişlerdir. Bu parametrenin, şişme potansiyelinin tahmin edilmesinde kullanılabileceğini (izelge2.21.) vurgulamışlardır.



şekil 2.44. İki farklı kil için büzülme deneyi sonucu (Briaud vd., 2003)

$$I_{ss} = w_{sw} - w_{sh} \quad (2.28)$$

Burada ,

$I_{ss}$  - Şişme-büzülme indisi,

$w_{sh}$  - Büzülme testi sonucunda elde edilen büzülme limiti,

$w_{sw}$  - Serbest şişme ödometre deneyinde elde edilen şişme limitidir.

Çizelge 2.21. Şişme büzülme indisine bağlı olarak şişme potansiyelinin sınıflandırılması (Briaud, 2003).

Şişme – Büzülme İndisi (%)	Potansiyel
<20	Düşük
20-40	Orta
40-60	Yüksek
> 60	çok yüksek

### 2.4.3. Ampirik İlişkiler

Seed vd. (1962) doğal zeminlerin, havada kurutulduktan sonra 7kPa sürşarj yükü uygulanarak su altında bırakılması sonucunda meydana gelen şişme yüzdeleri için aşağıdaki ifadeyi vermişlerdir.

$$S = 2.16 \cdot 10^{-3} \cdot PI^{2.44} \quad (2.29)$$

Burada,

$S$  - Şişme yüzdesi (%),

$PI$  - Plastisite indisidir.

Nayak ve Christensen (1974), plastisite indisi, kil yüzdesi ve başlangıç su muhtevasına bağlı olarak şişme yüzdesinin tahmin edilmesi için Eşitlik 2.30'u vermişlerdir.

$$S = \frac{(0.00229PI) (1.45C)}{(w_0 + 6.38)} \quad (2.30)$$

Burada,

$S$  - Şişme yüzdesi (%),

$PI$  - Plastisite indisi,

$C$  - Kil yüzdesi,

$w_0$  - Başlangıç su muhtevasıdır.

Vijayvergiya ve Ghazzaly (1973) likit limit ve su muhtevasına bağlı olarak killi zeminlerin şişme yüzdesinin tahmin edilmesi için bir kart önermişler, ayrıca Eşitlik 2.31 ve 2.32'yi vermişlerdir.

$$\log S = \frac{1}{12}(0.44LL - w_0 + 5.5) \quad (2.31)$$

$$\log S = 0.0526\gamma_k + 0.033LL - 6.8 \quad (2.32)$$

Burada,

$S$  - Şişme yüzdesi (%),

$LL$  - Likit limit,

$\gamma_k$  - Kuru birim hacim ağırlık (lb/ft<sup>3</sup>) (1 gr/cm<sup>3</sup>= 62.428 lb/ft<sup>3</sup>),

$w_0$  - Başlangıç su muhtevasıdır.

Chen (1988), kuru birim hacim ağırlıkları 15.7-17.3 kN/m<sup>3</sup> ve su muhtevaları 15-20% aralığında değişen, örselenmemiş zemin numunelerinin 7kPa sürşarj altındaki şişme yüzdeleri için aşağıdaki eşitliği vermiştir.

$$S = 0.2558 \cdot e^{0.0838PI} \quad (2.33)$$

Burada,

$S$  - Şişme yüzdesi (%),

$PI$  - Plastisite indisidir.

Acar ve Nyeretse (1992) şişme yüzdesinin, aktivite ve kil yüzdesine bağlı olarak belirlenebileceği Eşitlik 2.34' ü önermişlerdir.

$$S = 0.63 \cdot A^{1.05} \cdot C^{0.58} \quad (2.34)$$

Burada,

$S$  - Şişme yüzdesi (%),

$C$  - Kil yüzdesi,

$A$  - Aktivitedir.

Basma (1993) 128 doğal zemin numunesi üzerinde yaptığı deneyler sonucunda, şişme yüzdesinin belirlenmesi için Eşitlik 2.35' i önermiştir. Eşitlik 2.35 için regresyon katsayısının 0.93, toplam karesel hatanın 0.28 olduğunu vurgulamıştır.

$$S = (6.4 \cdot 10^{-4}) (PI)^{1.37} (C)^{1.37} \quad (2.35)$$

Burada,

$S$  - Şişme yüzdesi (%),

$PI$  - Plastisite indisi,

$C$  - Kil yüzdesidir.

Sabtan (2005) şişme yüzdesinin; kil yüzdesi, plastisite indisi ve su muhtevasına bağlı olarak tahmin edilmesi için Eşitlik 2.36'yı önermiştir.

$$S = 1.0 + 0.06 \cdot (C + PI - w) \quad (2.36)$$

Burada,  
 $S$  - Şişme yüzdesi (%),  
 $C$  - Kil yüzdesi,  
 $PI$  - Plastisite indisi,  
 $w$  - Su muhtevasıdır.

Komornik ve David (1969) şişme basıncının tahmin edilmesi için Eşitlik 2.37' yi önermiştir.

$$\text{Log}P_s = -2.132 + 0.0208LL + 0.000665\gamma_k - 0.0269w_0 \quad (2.37)$$

Burada,  
 $P_s$  - Şişme basıncı,  
 $LL$  - Likit limit,  
 $\gamma_k$  - Kuru birim hacim ağırlık ( $\text{kg/m}^3$ ),  
 $w_0$  - Başlangıç su muhtevasıdır.

Nayak ve Christensen (1974) şişme basıncının, plastisite indisi, kil yüzdesi ve başlangıç su muhtevasına bağlı olarak tahmin edilmesi için Eşitlik 2.38'i önermişlerdir.

$$P_s = (3.58 \cdot 10^{-2}) PI^{1.12} \frac{C^2}{w_0^2} + 3.79 \quad (2.38)$$

Burada,  
 $P_s$  - Şişme basıncı,  
 $PI$  - Plastisite indisi,  
 $C$  - Kil yüzdesi,  
 $w_0$  - Başlangıç su muhtevasıdır.

Erzin ve Erol (2004) plastisite indisi, likidite indisi, başlangıç su muhtevası ve kuru birim hacim değerlerine bağlı olarak şişme basıncının tahmin edilmesi için Eşitlik 2.39, 2.40 ve 2.41'i vermişlerdir.

$$\log P_s = -4.812 + 0.01405 PI + 2.394 \gamma_k - 0.0163 w_0 \quad (2.39)$$

$$\log P_s = -5.197 + 0.01457 PI + 2.408 \gamma_k - 0.819 I_L \quad (2.40)$$

$$\log P_s = -5.020 + 0.01383 PI + 2.356 \gamma_k \quad (2.41)$$

Burada,

$P_s$  - Şişme basıncı ( $\text{kg/cm}^2$ ),

$\gamma_k$  - Kuru birim hacim ağırlık ( $\text{gr/cm}^3$ ),

$w_0$  - Başlangıç su muhtevası (%),

$I_L$  - Likidite indisi,

$PI$  - Plastisite indisidir.

Sabtan (2005) ise şişme basıncının tahmin edilmesi için Eşitlik 2.42'yi önermiştir.

$$P_s = 135.0 + 2.0 \cdot (C + PI - w) \quad (2.42)$$

Burada,

$P_s$  - Şişme basıncı (kPa),

$C$  - Kil yüzdesi,

$PI$  - plastisite indisi,

$w$  - Su muhtevasıdır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Çalışmada Kullanılan Zemin Numuneleri

Zeminlerin şişme özelliklerine etki eden parametrelerin modellenmesi amacıyla yapılan bu tez çalışmasında; Burdur, Kütahya ve Ankara yörelerinden alınan beş farklı zemin numunesi ve Karakaya Bentonit San. ve Tic. A.Ş.' den temin edilen doğal bentonit kullanılmıştır. Bahsedilen doğal zemin numunelerinin yanı sıra, belli oranlarda bentonit ilave edilerek hazırlanan numunelerin de şişme ve emme karakteristikleri incelenmiştir. Numune 4'e ağırlıkça %5 oranında bentonit ilave edilerek hazırlanan numuneye Numune 6 adı verilmiştir. Numune 7 ve 8 ise, 5 numaralı doğal zemine sırasıyla, ağırlıkça %5 ve %10 oranlarında bentonit ilave edilerek hazırlanmıştır.

Öncelikle zemin numunelerinin bazı indeks ve mühendislik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla; dane boyutu dağılımı analizleri, kıvam limitleri, piknometre, standart proktor deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3.1.'de görülmektedir. İncelenen zeminlerin granülometri eğrileri EK 1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kullanılan zeminlerin bazı özellikleri

Zemin Özellikleri		Num1	Num2	Num3	Num4	Num5	Num6	Num7	Num8
Dane Boyutu Dağılımı	Çakıl (%)	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kum (%)	3.2	3	0.5	1.2	4.2	1.1	4.0	3.8
	Silt (%)	79.5	87.0	70.4	81.3	89.1	78.8	84.7	80.2
	Kil (%)	17.3	10.0	29.1	17.5	6.7	20.1	11.3	16.0
Kıvam Limitleri	Likit Limit (%)	66	54	83	80	45	102	66	89
	Plastik Limit (%)	27	24	27	31	26	27	24	18
	Rötre Limiti (%)	14	15	10	13	17	13	17	16
	Plastisite İndisi	39	30	56	49	19	75	42	71
Kompaksiyon	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	1.51	1.41	1.48	1.42	1.67	1.42	1.65	1.62
	Optimum Su Muhtevası (%)	28	30	28	26	20	26	20	22
	Dane Birim Hacim Ağırlığı (gr/cm <sup>3</sup> )	2.75	2.64	2.79	2.74	2.65	2.80	2.75	2.81
Zemin Sınıfı	CH	CH	CH	CH	CL	CH	CH	CH	

CH: Yüksek Plastisiteli Kil

CL: Düşük Plastisiteli Kil

### 3.1.1. X-Ray Difraksiyon Analizleri

Zeminlerin mineralojik karakteristiklerinin belirlenmesinde en sık kullanılan yöntemlerden biri X-ray difraksiyon analizleridir. X-ray difraksiyon analizleri, her kristal fazının kendine özgü bir X-ray difraksiyon modeli (paterni) olduğu prensibine dayanmaktadır. Karışık durumda bulunan fazlarda, fazlardan her biri diğerlerinden bağımsız olarak kendi modelini vermektedir. X-ray difraksiyon grafikleri, farklı şiddet ve  $\theta$  açısı değerlerindeki yansımalarından oluşmaktadır. Bu şekilde zemin içerisinde bulunan çeşitli mineral fazları, X-ray difraksiyon grafiklerinde, kendilerine özgü yansıma değerlerinden belirlenebilmektedir. Bu tez çalışmasında, zemin numunelerinin mineralojik karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla, Süleyman Demirel Üniversitesi Jeotermal Enerji Yeraltısuyu ve Mineral Kaynakları Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan Philips PANalytical X'Pert Pro MPD X-ray Difraktometresi (Şekil 3.1.) kullanılmıştır.



Şekil 3.1. PAN alytical X'Pert Pro MPD X-ray Difraktometresi

Havada kurutulmuş zemin numuneleri, ezilerek toz haline getirilmiş ve özel cam lamlar içerisinde XRD cihazına yerleştirilmiştir. XRD cihazının jeneratör ayarları 45 kV ve 40 mA dır.  $\text{CuK}_\alpha$  radyasyonu ( $\lambda$ ) 1.54 Å' a eşittir.  $2^\circ/\text{dk}$  lık hız ile  $3-90^\circ 2\theta$  değerleri arasında tarama yapılmış ve elde edilen grafikler ASTM indeks kartlarına göre değerlendirilmiştir. İncelenen zeminler için elde edilen X-ray difraksiyon eğrileri EK2.'de verilmiştir.

### **3.1.2. Katyon Değişirme Kapasitesinin Belirlenmesi**

Katyon değişirme kapasitesi, killerin temel fiziko-kimyasal özelliklerinden biridir ve şişme davranışı üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmalar mevcuttur (Churchman vd., 2002). Çalışmada kullanılan zeminlerin katyon değişirme kapasiteleri TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Kimya ve Çevre Teknolojileri İş Birimi'nde, Chapman (1965) yöntemine göre yapılmıştır. İncelenen numuneler için katyon değişirme kapasitesi analizlerinin sonuçları Bulgular ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

### **3.2. Şişme Karakteristiklerinin Belirlenmesi**

Bu çalışmada incelenen numunelerin şişme karakteristiklerinin belirlenmesinde, ödometre deney ekipmanından yararlanılmıştır. Şişme yüzdelerinin belirlenmesinde serbest şişme ödometre deney yöntemi; şişme basınçlarının belirlenmesinde ise sabit hacim ödometre deney yöntemi kullanılmıştır. Aşağıda her iki şişme karakteristiğinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler, detaylı olarak açıklanmıştır.

#### **3.2.1. Serbest Şişme Ödometre Deneyleri**

İncelenen zemin numunelerinin şişme yüzdelerinin belirlenmesi amacıyla bir boyutlu ödometre deney aletinde serbest şişme ödometre deneyleri (ASTM D 4546 – 90 Metot A) yapılmıştır. Deney numunelerinin başlangıç kuru birim hacim ağırlıkları 1.35, 1.40, 1.45 ve 1.50  $\text{gr}/\text{cm}^3$  olacak şekilde dört farklı değer olarak seçilmiştir. Her bir kuru birim hacim ağırlık değeri için; % 15, 20, 25 ve 30 olmak üzere dört



farklı başlangıç su muhtevası koşulunda hazırlanan numuneler, ödometre ringi içerisine dinamik olarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi sırasında zemin numunelerinin su muhtevalarının ve başlangıç kuru birim hacim ağırlıklarının sabit tutulmasına özen gösterilmiştir. Ring, ödometre hücresine yerleştirilmiş, sadece üst poroz blok ve yükleme başlığının ağırlığı altında 5 dk bekletildikten sonra ödometre hücresi su ile doldurularak numunenin serbestçe şişmesine izin verilmiştir. Şişme miktarları, geleneksel ödometre deneyinde olduğu şekilde zamana bağlı olarak kaydedilmiştir. Deney sonrasında ring içerisindeki numune kurutularak tartılmış ve numunelerin istenilen başlangıç koşullarında hazırlanıp hazırlanmadığı kontrol edilmiştir. Yapılan kontrollerden, başlangıçta karşılaştırılan kuru birim hacim ağırlık ve su muhtevası için, genellikle %1 den daha küçük sapmaların olduğu belirlenmiştir.

Deney süresi, zemin numunesinin cinsine ve başlangıç koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik gösterebilmektedir. Bazı deneyler birkaç gün içerisinde tamamlanırken bazı durumlarda hacim artışının tamamen bitmesi haftalar alabilmektedir. Şişme deformasyonları tamamlanana kadar deneye devam edilmiştir. İncelenen numuneler için serbest şişme ödometre deneylerinden elde edilen sonuçlar Bulgular ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

### **3.2.2. Sabit Hacim Ödometre Deneyleri**

İncelenen zemin numunelerinin şişme basınçları, sabit hacim ödometre deney yöntemi (ASTM D 4546 – 90 Metot C) kullanılarak belirlenmiştir. Zemin numuneleri ödometre ringi içerisine, önceden belirlenen başlangıç koşullarına sahip olacak şekilde dinamik olarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi sırasında zemin numunelerinin su muhtevalarının ve başlangıç kuru birim hacim ağırlıklarının değişmemesine özen gösterilmiştir. Ring içerisindeki numune ödometre hücresine yerleştirildikten sonra, sadece üst poroz blok ve yükleme başlığı ağırlığı altında 5 dk bekletilmiştir. Hücre tamamen su ile doldurularak numuneye serbestçe su girişine izin verilmiş, ancak numunenin hacmi sabit tutulacak şekilde yüklemeler uygulanmıştır. Yüklemelerin uygulanması sırasında, deformasyonların 0.005 mm de

tutulmasına ve 0.01 mm den büyük deformasyonların meydana gelmemesine dikkat edilmiştir. Daha fazla yükleme yapılmaksızın numune hacminde herhangi bir artış eğiliminin gözlenmediği durumda deneye son verilmiştir. Zemin numunesine uygulanan nihai basınç, şişme basıncı olarak belirlenmiştir. Deney sonrasında ring içerisindeki numune kurutularak tartılmış ve numunelerin istenilen başlangıç koşullarında hazırlanıp hazırlanmadığı kontrol edilmiştir. Yapılan kontroller neticesinde, kuru birim hacim ağırlık ve su muhtevası değerleri için, genellikle %1 den daha küçük sapmaların olduğu belirlenmiştir. İncelenen zemin numuneleri için, sabit hacim ödometre deneyleri, genellikle 1-2 günde tamamlanmıştır. İncelenen numuneler için sabit hacim ödometre deneylerinden elde edilen sonuçlar Bulgular ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

### 3.2.3. Serbest Şişme İndisi Belirleme Deneyleri

İncelenen numunelerin serbest şişme indisi değerleri Sridharan ve Rao (1988) tarafından verilen yöntem izlenerek belirlenmiştir. 10 gr ağırlığındaki kuru zemin numuneleri, içerisinde 40 ml saf su bulunan 100 ml hacim ölçekli dereceli silindir içine boşaltılmış ve süspansiyon karıştırılmıştır. Zemin numunelerinin tamamen ıslanmasını sağlamak için 24 saat beklendikten sonra dereceli silindire 100 ml' ye kadar su ilave edilmiş ve numunenin denge hacmine ulaşması için sarsmadan bırakılmıştır. Dengelenme sürecinin sonunda, zemin numunesinin çökelti hacmi kaydedilmiş (Şekil 3.2.) ve serbest şişme indisi, Bölüm 2.4.1.1.'de verilen Eşitlik 2.21 yardımıyla hesaplanmıştır.



Şekil 3.2. Serbest şişme indisi deneyi

### 3.3. Emme Karakteristiklerinin Belirlenmesi

İncelenen zemin numunelerinin emme karakteristiklerinin (emme basınçları ve emme indisleri) belirlenmesinde ısı çift saykrometre tekniğinden yararlanılmıştır. Saykrometre tekniği, bağıl nem ile emme basıncı arasındaki teorik ilişkilerden (Kelvin eşitliği- Bölüm 2.1.4. de verilen Eşitlik 2.4) yararlanmaktadır. Bu teknikte, zemin numunesi ile dengede bulunan gaz fazındaki bağıl nem ölçümleri yardımıyla, zeminin sıvı fazının su potansiyeli (zemin emmesi) belirlenmektedir. Bu amaçla, çeşitli malzemelerden imal edilen koruyucu kaplamalar içerisine yerleştirilen ısı çiftler (thermocouple) kullanılmaktadır. Saykrometre, ölçüm sırasında zemine gömüldüğü için; koruyucu kaplama, ölçüm sensörünün hasar görmesini engeller. Ayrıca, ölçüm sensörü ve zemin arasında bir boşluk meydana getirerek, sıcaklık ve buhar transferine olanak verir. Kaplama malzemesi olarak seramik ve çelik ağ yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, seramik kaplamalı saykrometrelerdeki dengelenme süresi, çelik ağ kaplamalı saykrometrelerinkine göre daha uzun sürmektedir (Andraski ve Scanlon, 2002).

Bu çalışmada, Wescor Inc. tarafından üretilen çelik ağ kaplamalı PST-55 saykrometreleri (Şekil 3.3.) ve HR-33T Dew Point Mikrovoltmetre (Şekil 3.4.) cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Wescor PST-55 model saykrometre



Şekil 3.4. Wescor HR33T Microvoltmetre

Saykrometre içerisinde, iki farklı metalden (kromel ve konstantan) oluşan bir elektrik devresi bulunmaktadır. Bu devredeki, ölçüm ve referans bağlantıları farklı sıcaklıklara sahip olduğunda, devrede bir akım ve bunun sonucu olarak voltaj farkı meydana gelmektedir. Saykrometre zemin içerisine yerleştirildiğinde, belirli bir süre sonunda, zemin ile ölçüm boşluğu arasında bir nem dengesi kurulmaktadır. Yaklaşık 15 sn süreyle, ısı çift bağlantısından uygun doğrultuda geçen 4-8 mA lik doğru akım sayesinde, bu bağlantı soğumakta (Peltier etkisi) ve dew point (yoğunlaşma-çiy noktası) sıcaklığına ulaşıldığında, su bağlantı üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bunun sonucunda ölçüm bağlantısı ile referans bağlantı (ıslak ve kuru bağlantılar) arasında bir sıcaklık farkı meydana gelmektedir. Sıcaklık farkı, ölçüm sensörünü çevreleyen ortamın bağıl nemiyle ve dolayısıyla zemin emmesiyle ilişkilidir. Sıcaklık farkı nedeniyle ortaya çıkan voltaj farkı mikrovoltmetre ile ölçülerek, zeminin emme basıncı belirlenmektedir (Snethen, 1980; Çokça, 2002; Andraski ve Scanlon, 2002).

Bu çalışmada kullanılan saykrometre deney sistemi Şekil 3.5. te görülmektedir. Söz konusu cihaz ile 0.3 – 7 MPa arasında toplam emme ölçümleri yapılabilmektedir. Ancak 4 MPa değerinin üzerinde emme basınçlarının ölçüldüğü deneylerin tekrarlanabilirliği çok iyi değildir (Ridley ve Wray, 1996). Bu nedenle ekipman, 0.3 ile 5 MPa arasındaki emme değerlerinin ölçülmesinde kullanılmıştır. Saykrometre

sıcaklık ve mikrovolt okumalarının bilgisayar kontrollü olarak alınabilmesi için Pico Technologies tarafından geliştirilen, Picolog Recorder programı kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Saykrometre deney sistemi

### 3.3.1. Saykrometrelerin Kalibrasyonu

Zemin numunelerinin emme basınçlarının belirlenmesi için öncelikle, saykrometrelerin kalibre edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla; belirli sıcaklıktaki su potansiyelleri bilinen, farklı molalitelere sahip sodyum klorür (NaCl) çözeltileri kullanılmıştır. NaCl çözeltilerindeki saykrometre ölçümleri, çözeltinin ozmotik (ve toplam) emme eşdeğerini yansıtmaktadır. Çalışmada, 25 °C de -13.68, -22.1, -32.10 ve -41.58 bar su potansiyellerine sahip 0.3, 0.5, 0.7 ve 0.9 molalitelere sahip NaCl çözeltileri kullanılmıştır.

Çalışmada 5 adet PST 55 saykrometre kullanılmıştır. Her bir saykrometre, belirli molaliteye sahip NaCl çözeltisi ile doldurulmuş cam kavanozların içine yerleştirilmiştir. Kavanozların kapaklarında, saykrometrenin geçebileceği boyutta delikler açılmış ve saykrometreler kavanoz kapaklarından geçirilerek kapatılmışlardır. Hava girişini engellemek amacıyla, saykrometre kabloları ve kapaklar arasındaki boşluklar, silikonla kaplanmıştır. Bu kavanozlar, numune kaplarının sıcaklık değişimini minimize etmek için, içinde köpük parçaları ile

doldurulmuş termos çantaya yerleştirilmiştir. Deneyler sıcaklık ve nem kontrollü ortamda yapılmıştır.

Saykrometre okumalarının stabilize olması için, genellikle 3 saatlik bir süre yeterli olmaktadır. Denge sağlandıktan sonra, saykrometre voltaj ve sıcaklık okumaları alınmıştır. Her bir deney sonrasında, saykrometreler temizlenerek 24 saat bekletilmiş ve bu süre dolduktan sonra yeni deneylerde kullanılmışlardır.

Deneyler sıcaklık ve nem kontrollü ortamda yapılmasına rağmen, bazı durumlarda ortam sıcaklığında 1 °C den daha küçük sıcaklık farklılıkları gözlenmiştir. Bu şekilde, 25 °C den farklı sıcaklıklarda alınan okumalar için düzeltme aşağıdaki denklem kullanılarak yapılmıştır.

$$E_{25} = \frac{E_T}{(0.325 + 0.027 \cdot T)} \quad (3.1)$$

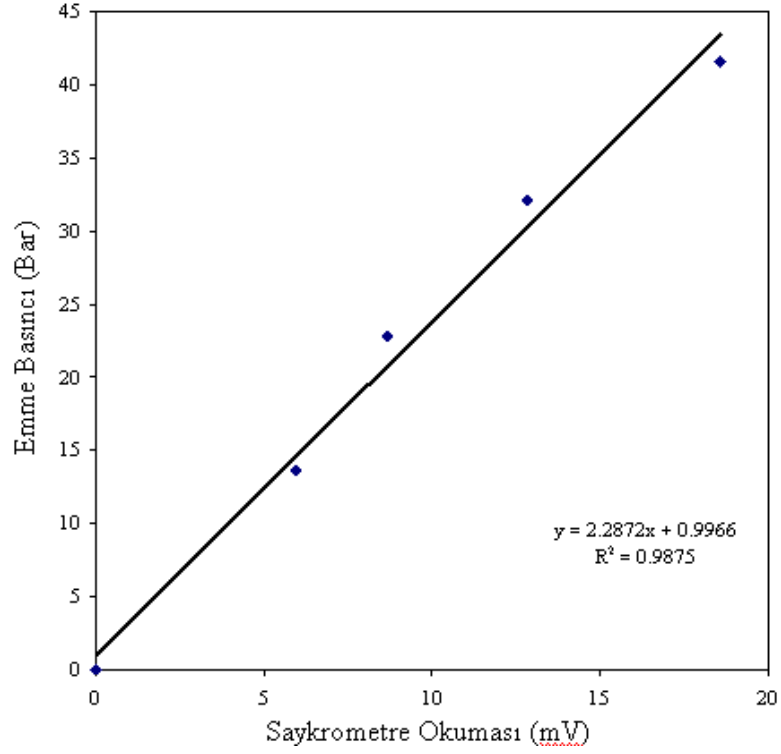
Burada,

$E_{25}$  - 25 °C için düzeltilmiş saykrometre okuması

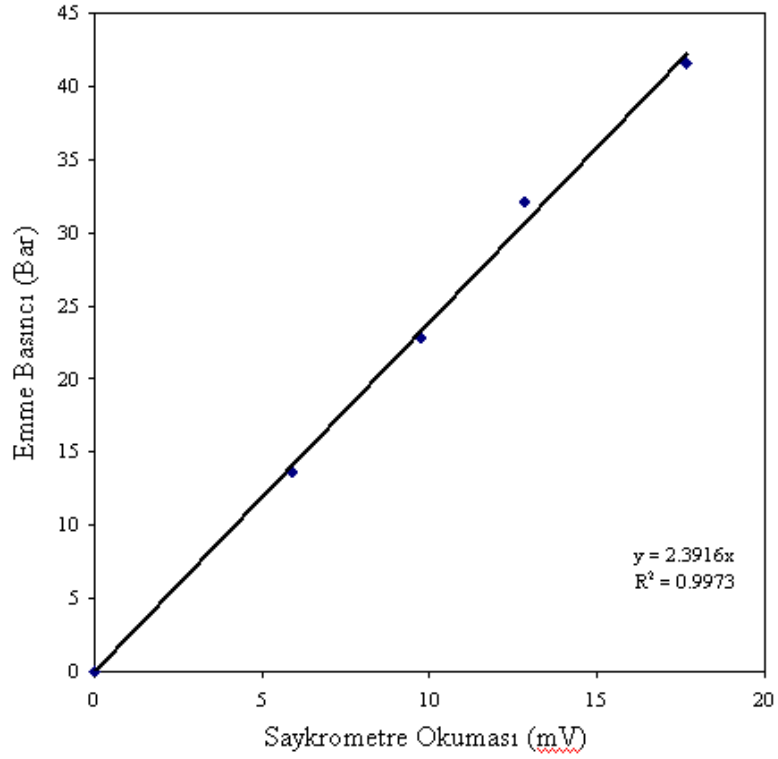
$E_T$  - Saykrometre okuması

$T$  - Sıcaklıktır (°C).

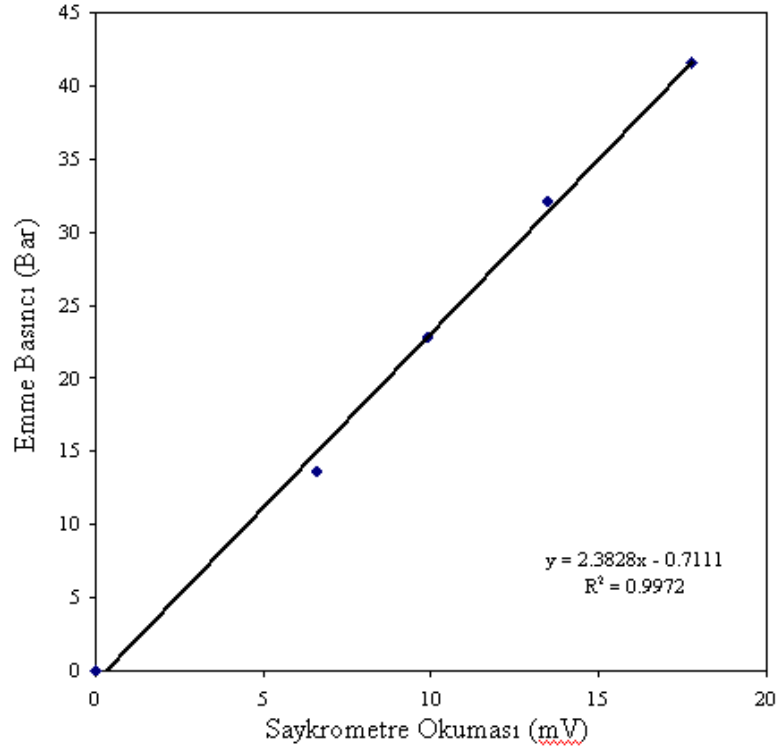
Bu yöntem, farklı molalitelerdeki NaCl çözeltileri için tekrarlanarak; her bir saykrometre için, voltaj okuması – su potansiyeli grafiği çizilmiştir. Bu sayede, her bir saykrometre için spesifik kalibrasyon doğrusu elde edilmiş ve doğrunun denklemi belirlenmiştir. Bu doğrunun denklemi kullanılarak, o saykrometre için herhangi bir zeminden alınan voltaj çıktısı, zemin emmesine dönüştürülebilmektedir. Çalışmada kullanılan 5 adet saykrometre için elde edilen kalibrasyon denklemleri ve determinasyon katsayıları, Şekil 3.6. – 3.10.'da görülmektedir.



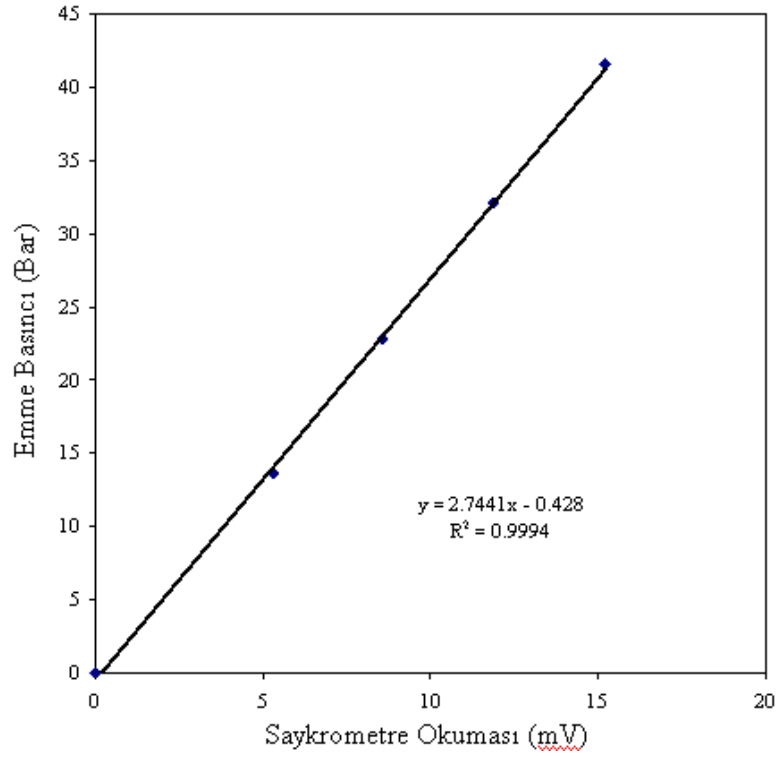
Şekil 3.6. 46177 numaralı saykrometrenin kalibrasyon eğrisi



Şekil 3.7. 46258 numaralı saykrometrenin kalibrasyon eğrisi

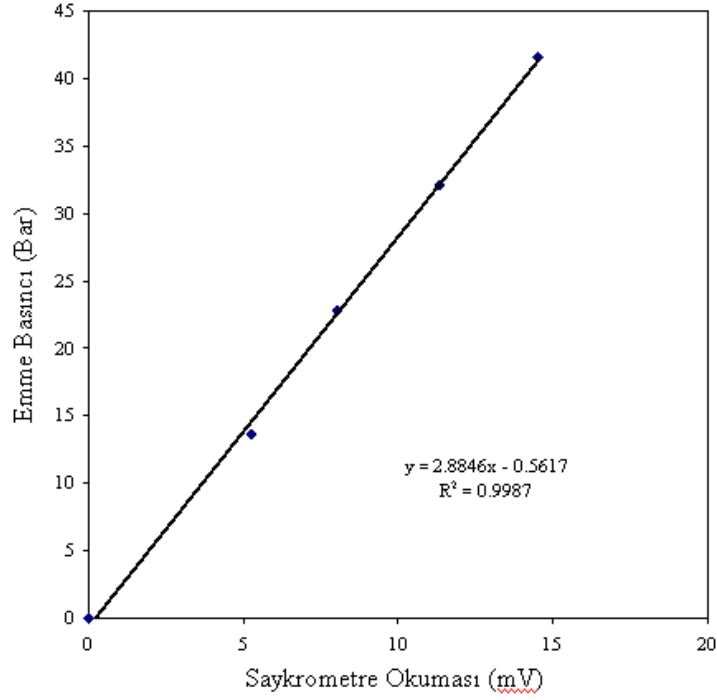


Şekil 3.8. 46280 numaralı saykrometrenin kalibrasyon eğrisi



Şekil 3.9. 46282 numaralı saykrometrenin kalibrasyon eğrisi





Şekil 3.10. 46284 numaralı saykrometrenin kalibrasyon eğrisi

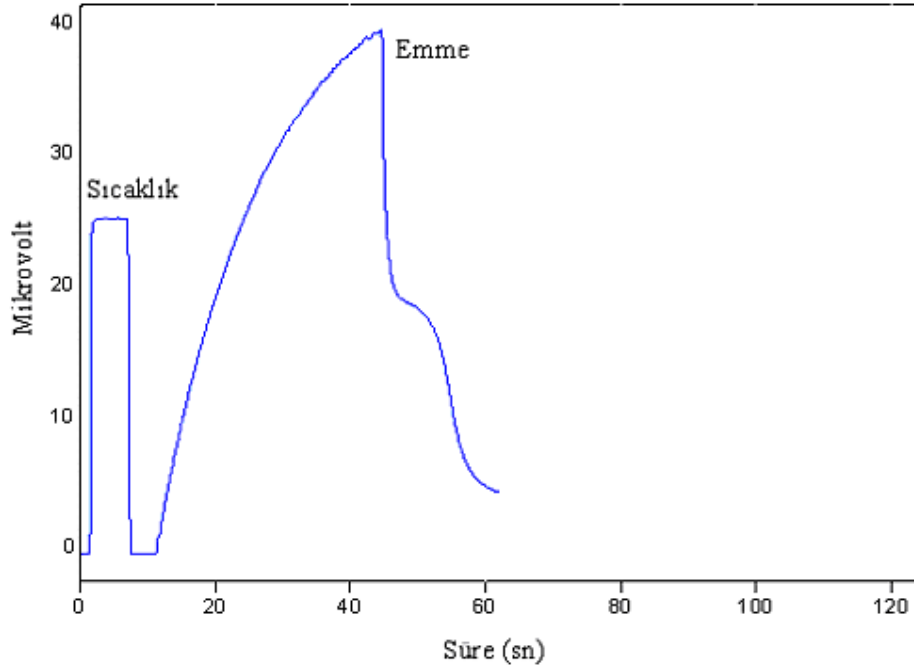
### 3.3.2. Zemin Emme Deneyleri

Her bir zemin numunesi, belirli kuru birim hacim ağırlık ve su muhtevasına sahip olacak şekilde 36 mm çapında ve 15 mm yüksekliğindeki ring içerisine dinamik olarak sıkıştırılmıştır. Hazırlanan numuneler ringlerden çıkartılarak, parafinle kaplanmış. Bu numunelerde, saykrometrenin yerleştirilebileceği bir delik açılarak; saykrometre, deliğin içine yerleştirilmiştir. Delikle, saykrometre arasında bulunan boşluklar nedeniyle nem ve sıcaklık değişikliklerinin engellenmesi için azami özen gösterilmiştir. Bu amaçla saykrometreyle birlikte numune, plastik folyo ile kaplanmış ve üzeri bantlanmıştır (Şekil 3.11.). Daha sonra numuneler kavanozlara konulmuş ve kavanozların ağzı kapatılarak içi plastik köpük ile dolu olan termos çantaya yerleştirilmiştir. Saykrometre ve zemin numunesi arasındaki nem dengesinin kurulması için 24 saat kadar beklenmiş ve ardından saykrometre sıcaklık ve voltaj okumaları alınmıştır. Okumalar, 25 °C den farklı sıcaklıklarda alınan okumalar, 25 °C deki eşdeğer okumalara çevrilmiştir. Eşdeğer okumalar, her bir saykrometre için Şekil 3.6 – 3.10.’ da verilen kalibrasyon denklemleri kullanılarak emme basınçlarına dönüştürülmüştür (Agus ve Schanz, 2005). Emme deneyleri için de, şişme

deneplerinde kullanılan başlangıç koşulları kabul edilmiştir. Numune 3 için  $\gamma_k = 1.5$   $\text{gr/cm}^3$  ve  $w = \%15$  başlangıç koşullarında elde edilen saykrometre deney grafiği, Şekil 3.12.' de örnek olarak verilmiştir. Emme deneylerinden elde edilen sonuçlar Bulgular ve Tartışma bölümünde tablolar halinde sunulmuştur.



Şekil 3.11. Saykrometre deney numunelerinin hazırlanması



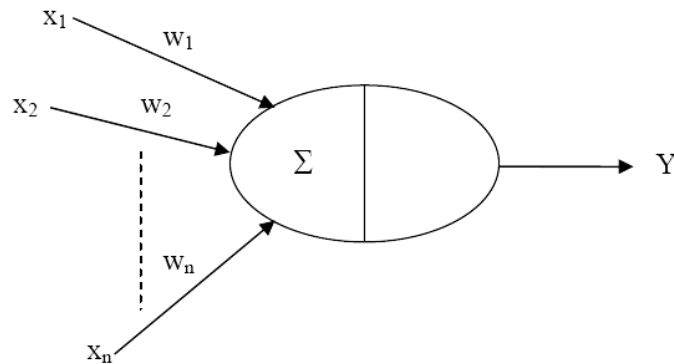
Şekil 3.12. Saykrometre deney grafiği (Num 3 –  $\gamma_k = 1.5$   $\text{gr/cm}^3$ ,  $w = \%15$ )

### 3.4. Modelleme Çalışmaları

Bu tez çalışmasında, zeminlerin emme şişme karakteristiklerinin modellenmesi amacıyla, uyarlanabilir sinir ağına dayalı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) kullanılmıştır. ANFIS'in, yapay sinir ağlarından faydalanan bir bulanık mantık sistemi olması nedeniyle; burada, öncelikle yapay sinir ağlarının ve bulanık mantığın temelleri kısaca anlatılmış ve ardından kullanılan yöntem verilmiştir.

#### 3.4.1. Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları, insan beyni ve sinir sisteminin davranışını temel alarak; öğrenme, hafızaya alma ve doğrusal olmayan, karmaşık problemleri çözme yetilerine sahip olan nümerik modelleme teknikleridir. Nöron yada hücre olarak isimlendirilen çok sayıda temel işlem elemanının birbirlerine bağlanması ile teşkil edilirler. Girdi verilerini alan tabaka girdi tabakası, çıktıyı veren tabaka çıktı tabakası ve diğer tüm tabakalar gizli tabaka olarak isimlendirilir. Her bir tabaka bir ağırlık matrisi ile sapma ve çıktı vektörlerine sahiptir. Her bir tabakadaki nöron diğer tabakalardaki nöronlara ağırlık çizgileriyle bağlanmaktadır. Gizli tabakadaki ve çıktı tabakasındaki nöronlar, girdilerinin ( $x_j$ ) her birini uygun ağırlık katsayıları ( $w_{ij}$ ) ile çarparak, ağırlıklandırılmış girdileri toplar ve “net” adı verilen, toplama fonksiyonunun çıktısı elde edilir. Bu işlemin modeli, şematik olarak Şekil 3.13.' te, hesaplamada kullanılan formül ise Eşitlik 3.2' de verilmiştir.



Şekil 3.13. Basit nöron modeli (Nabiyev, 2005)

$$Net_j = \sum_{i=1}^n x_j \cdot w_{ij} + \theta_j \quad (3.2)$$

Burada,

$x_j$  - Girdi değeri,

$w_{ij}$  - Ağırlık katsayısı,

$\theta_j$  - Sapmadır.

Net değeri bir aktivasyon fonksiyonundan geçirilerek, nöron çıktısı ( $Y_j$ ) elde edilir (Eşitlik 3.3). Bu çıktı, ağın yapısına göre, girdi olarak başka bir işlem elemanına veya bir dış bağlantıya gönderilir. Genellikle kullanılan transfer fonksiyonları eşik, sigmoid, hiperbolik tanjant vb. fonksiyonlardır (Shahin vd., 2001).

$$Y_j = f(Net_j) = f\left(\sum_{i=1}^n x_j \cdot w_{ij} + \theta_j\right) \quad (3.3)$$

Burada,

$Y_j$  - Nöronun çıktısı,

$f$  - Aktivasyon fonksiyonudur.

Öğrenme; eğitme yoluyla girdi/çıkı verilerinin işlenmesi sonucu gerçekleşir. Yapay sinir ağları öğrenme biçimine göre “yönlendirmeli (supervised)” ve “yönlendirmesiz (unsupervised)” olmak üzere iki şekilde sınıflandırılmaktadır. Yönlendirmeli eğitimde hem girdi hem de çıktı verileri kullanılır. Öncelikle, ağ rasgele belirlenen başlangıç ağırlıklarını kullanarak girdileri işler ve çıktıyı hedef çıktı ile karşılaştırır. Elde edilen hatalar, sistem içinde geriye gönderilir ve bu hatalar kullanılarak ağ kontrol eden bağlantı ağırlıkları güncellenir. Bu işlem defalarca tekrarlanır ve ağırlık katsayıları sürekli olarak ayarlanır. Yönlendirmesiz eğitim ise dış müdahale olmaksızın, girdilerin ağ tarafından analiz edilmesi ve bu analiz sonucunda bağlantıların oluşturulmasıdır (Rahman vd 2001).

### 3.4.2. Bulanık Mantık

Klasik mantık (Aristo mantığı) yaklaşımına göre bir önerme doğru veya yanlıştır. Bu yaklaşım; siyah yada beyaz, soğuk yada sıcak, uzun yada kısa gibi bir gruba ait olma

ya da olmama durumunu ifade etmektedir. Bununla birlikte, gerçek dünyadaki çoğu problemde bir görecelilik durumu söz konusudur ve bir çok durumda kesin çıkarımların yapılmasında büyük zorluklar söz konusudur. Tam ve kesin olmayan bilgilere bağlı olarak tutarlı ve doğru kararlar alınmasını sağlayan düşünme ve karar verme mekanizmasına “bulanık mantık” adı verilmektedir (Allahverdi, 2002).

Bulanık mantık kavramı ilk olarak Zadeh (1965) tarafından ortaya atılmıştır. Önemi gittikçe artarak günümüze kadar gelen bulanık mantık, belirsizliklerin anlatımı ve belirsizliklerle çalışılabilmesi için kurulmuş bir matematik düzen olarak tanımlanabilir. İncelenen olayın çok karmaşık olduğu ve yeterli bilginin bulunmadığı durumlar ile yargılama, değerlendirme ve karar verme işlemlerinin kişi tarafından yapılmasına gereksinim duyulduğu durumlarda, bulanık mantığın çok etkili olduğu düşünülmektedir (Şen, 2001).

#### **3.4.2.1. Bulanık Kümeler ve Üyelik Dereceleri**

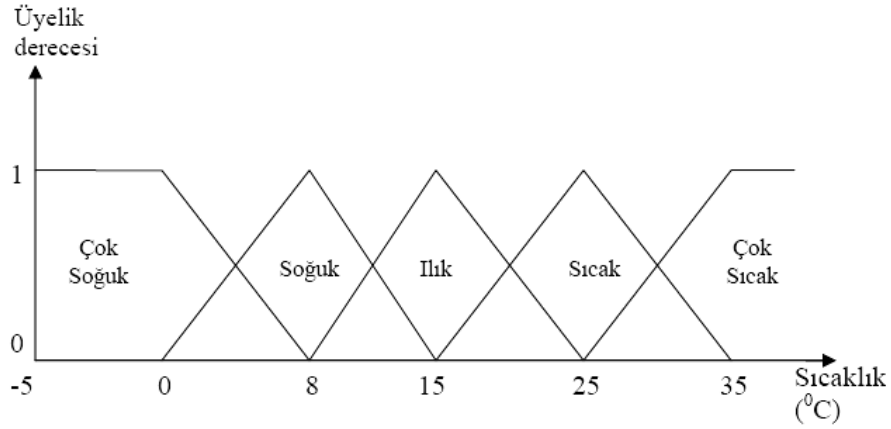
Bulanık mantıkta, herhangi bir olayın bir gruba (küme) ait olması yada olmaması gibi kesin bir sınıflandırma yoktur. Söz konusu olayın, bir kümeye ait olma derecelerini temsil etmek amacıyla üyelik fonksiyonları kullanılır. Yani klasik küme kavramında, evrendeki elemanların bir A kümesine ait olması durumunda üyelik dereceleri 1, A kümesine ait olmamaları durumunda ise üyelik dereceleri 0 olarak dikkate alınır. Bulanık kümelerde ise, evrendeki elemanların A kümesine ait olma durumu 0 ile 1 arasında değişen üyelik dereceleriyle temsil edilmektedir. Eğer üyelik derecesi 1 ise eleman bulanık kümeye tamamen aittir. Eğer bu değer 0 ise, eleman bulanık kümeye ait değildir. Eğer üyelik derecesi 0 ile 1 arasında ise eleman bulanık kümenin kısmi üyesidir. Başka bir ifadeyle, siyah ile beyaz arasında yer alan sonsuz sayıda gri tonlarını, farklı üyelik dereceleriyle tanımlamak mümkündür. (Babuska, 1998; Şen, 2001; Allahverdi, 2002).

Şekil 3.14. ve 3.15.’te sırasıyla klasik mantık ve bulanık mantık için örnek hava sıcaklığı sınıflaması görülmektedir. Şekil 3.14. ‘e göre, klasik mantıkta  $7.9^{\circ}\text{C}$  nin

soğuk, 8.1 °C nin ise ılık olarak sınıflandırıldığı görülmektedir. Bulanık mantıkta ise aralıklar arasında birbiriyle örtüşmeli geçişler söz konusudur.



Şekil 3.14. Klasik mantıkta bitişik dikdörtgen gösterim (Şen, 2001)



Şekil 3.15. Bulanık mantıkta örtüşmeli üçgen gösterim (Şen, 2001)

### 3.4.2.2. Bulanık Mantık Kuralları

Bulanık mantık, sözel bilgileri işleme konusunda etkili bir yöntemdir. Herhangi bir problemin çözümü için, öncelikle, sözel bilgilerin bilgisayara kurallar vasıtasıyla tanıtılması gereklidir. Bu amaçla “eğer - ise (if - then)” yaklaşımı kullanılmaktadır. Genel kural olarak, “eğer X A ise Y B dir “ (Eğer su muhtevası yüksek ise şişme azdır) şeklinde yazılır. Burada eğer ve ise kelimeleri arasında bulunan kısma öncül yada ön şart, ise’ den sonra gelen kısma ise soncul yada çıkarım denilmektedir. Bir

bulanık mantık kuralında birden fazla ön şart bulunabilir ve bu ön şartlar “ve/veya” gibi operatörlerle bağlanabilirler.

### **3.4.2.3. Bulanık Sonuç Çıkarma ve Bulanık Mantık Modelleme**

Bulanık sonuç çıkarma sistemi; veri tabanı, kural tabanı, bulanık çıkarım motoru ve çıktı birimlerinden oluşan bir yapıya sahiptir. Veri tabanı; incelenen problem için girdi değişkenlerini ve bunlarla ilgili tüm bilgileri içerir. Kural tabanı; veri tabanındaki girdileri, çıktılar ile ilişkilendiren, “eğer ise” şeklinde yazılan kurallar topluluğudur. Bulanık çıkarım motoru; girdi ve çıktı bulanık kümeleri arasında kurulan ilişkileri derleyerek, modelin bir girdi için nasıl çıktı vereceğini belirleyen işlemler topluluğudur. Çıktı birimi ise elde edilen çıktı değeri topluluğudur (Şen 2001).

Bulanık çıkarım motoru, sonuç çıkarma işlemini 5 adımda gerçekleştirmektedir:

1. Girdi değişkenlerinin, üyelik fonksiyonları vasıtasıyla bulanıklaştırılması,
2. Kuralların öncül kısımlarına bulanık işlemlerin uygulanması,
3. Kural sonucunun; her bir kuralın öncül kısmından, çıktının üyelik derecesiyle elde edilmesi,
4. Kural çıktılarının bulanık çıktı kümesinde birleştirilmesi,
5. Bulanık çıktı kümesinin durulaştırılması yoluyla, rakamsal çıktının elde edilmesi (Yüksel, 2003).

### **3.4.2.4. Bulanıklaştırma**

İncelenecek herhangi bir problemde, girdi değişkenleri için küme değişim aralıklarının, üyelik fonksiyonlarının ve üyelik derecelerinin belirlenmesi bulanıklaştırma olarak isimlendirilmektedir. Üyelik fonksiyonlarının ve üyelik derecelerinin belirlenmesinde kullanılan başlıca yöntemler; kişisel sezgi, mantık, tecrübe, açılı bulanık kümeler, yapay sinir ağları, genetik algoritmalar ve çıkarımlı muhasebe olarak sıralanabilir. Literatürde, üçgen, trapez, Gaussian, sigmoidal ve çan eğrisi şeklindeki üyelik fonksiyonları kullanılmaktadır. Bunlar arasında yaygın

olarak kullanılan fonksiyon, üçgen üyelik fonksiyonudur (Jang vd., 1997, Şen, 2001).

#### **3.4.2.5. Bulanık Çıkarım**

İncelenen bir problemde sebep-sonuç ilişkileri birden fazla kural ile tanımlanır ve böylece bulanık mantık kurallar tabanı oluşturulur. Bulanık modelden bir sonuç elde edilebilmesi için, her bir kurala bağlı olarak ortaya çıkan sonuçların harmanlanması gerekmektedir. Böylece mevcut kuralların tümünün katkısını yansıtan genel bir çıkarıma gidilmektedir. Literatürde bir çok harmanlama yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler 3 grupta toplanır:

1. Mamdani sistemi,
2. Sugeno sistemi,
3. Tsukamoto sistemi.

Bu sistemler arasında Sugeno sistemi oldukça pratiktir ve bulanık modellemede yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca Sugeno sisteminde durulaştırmaya gerek yoktur. Bu sisteme göre 2 girdi değişkenli bir sistem için bir bulanık kural,

Eğer  $x_1 \in A$  ve  $x_2 \in B$  ise  $y=f(x_1, x_2)$

şeklinde tanımlanır.  $f$ , genellikle 1. derece doğrusal fonksiyon olarak kullanılmaktadır (Yüksel, 2003).

#### **3.4.2.6. Durulaştırma**

Bulanık işlemler yapılarak, bulanık çıkarım kümesinin elde edilmesinden sonra; elde edilenlerin kesin ifadeler veya sayısal çıktılara dönüştürülmesi için yapılan işlemdir. Dolayısıyla bulanıklaştırma işleminin tersidir. Durulaştırma işlemi için farklı yöntemler kullanılabilir. Bu yöntemler; en büyük üyelik ilkesi, sentroid yöntemi, ağırlıklı ortalama yöntemi, ortalama en büyük üyelik, toplamların merkezi, en büyük alanın merkezi ve en büyük ilk veya son üyelik derecesi olarak



sıralanabilir. Bu yöntemlerden hangisinin kullanılacağına, problemin türüne bağlı olarak karar verilmektedir (Jang vd., 1997).

### 3.4.3. Adaptif Sinir Ağına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS)

Neurofuzzy ağları, bulanık sistemlerin dilsel bilgi sunumu ile sinir ağlarının öğrenme gücünü birleştiren modelleme teknikleridir. Bu tür teknikler bulanık mantık ASMOD, ANFIS, LOLIMOD, GARIC, FALCON, NEFCON, EFuNN vb. birçok neurofuzzy modelleme algoritması bulunmaktadır (Abraham, 2001; Shahin, 2003).

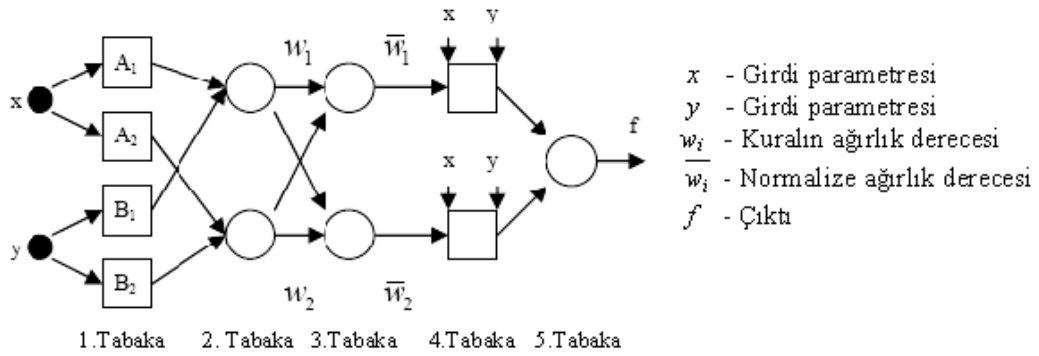
ANFIS, öğrenme ve adaptasyon işlemlerini kolaylaştırmak için, adaptif sistemlerden yararlanan bulanık Sugeno modelidir. Böyle bir yaklaşım bulanık mantığı daha sistematik ve tecrübeye daha az bağlı hale getirmektedir.

Aşağıda verilen iki bulanık kurala bağlı olarak 1. derece bulanık Sugeno modeli için olası ANFIS mimarisi Şekil 3.16.' da verilmiştir.

Kural 1: Eğer  $x = A_1$  ve  $y = B_1$  ise  $f_1 = (p_1x + q_1y + r_1)$

Kural 2: Eğer  $x = A_2$  ve  $y = B_2$  ise  $f_2 = (p_2x + q_2y + r_2)$

Bu kurallarda  $p_i$ ,  $q_i$  ve  $r_i$  her bir kural için, denklem sabitleridir.



Şekil 3.16. ANFIS mimarisi (Himer vd., 2004)

Şekilden görüleceği gibi ANFIS, 5 tabakalı ileri beslemeli bir yapay sinir ağı mimarisine sahiptir. Bu mimari için öğrenme algoritmasının temel görevi, ANFIS çıktısı ile öğrenme verilerini benzetmek için tüm uyarlanabilir parametreleri ayarlamaktır. Eğitim veri seti, sinir ağına tanıtılır ve herhangi bir eğitim algoritması yardımıyla ağı eğitilir. Model çıktısı ile öğrenme verileri arasındaki hata fonksiyonun minimum olduğu şartların belirlenmesi hedeflenir (Himer vd., 2004).

1. tabakadaki hücreler, adaptif (uyarlanabilir) hücrelerdir ve hücre sayısı girdi değişkeni sayısına eşittir. Bu tabakadaki hücrelerin çıktıları ( $O_{1i}$ ) için Eşitlik 3.4 ve 3.5 verilmektedir (Jang vd., 1997).

$$O_{1i} = \mu_{A_i}(x) \quad i = 1, 2 \quad (3.4)$$

$$O_{1i} = \mu_{B_{i-2}}(x) \quad i = 3, 4 \quad (3.5)$$

Burada,  $A_i$  ve  $B_i$  herhangi bir bulanık küme parametresi,  $\mu_{A_i}$  ve  $\mu_{B_i}$  bu küme parametreleri için üyelik dereceleridir. Çan eğrisi şeklinde üyelik fonksiyonu kullanıldığında,  $\mu_{A_i}$  için aşağıdaki eşitlik verilebilir.

$$\mu_{A_i} = \frac{1}{1 + \left[ \left( \frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right]^{b_i}} \quad i = 1, 2 \quad (3.6)$$

Burada,  $a_i$ ,  $b_i$  ve  $c_i$  sırasıyla, çan eğrisi şekilli üyelik fonksiyonun sigması, eğimi ve merkezidir.

2. tabakadaki hücreler sabittir ve hücre sayısı kural sayısına eşittir. Hücre girdileri, kuralların öncül kısmındaki değişkenlerin üyelik fonksiyonu değerleridir ve hücre çıktıları ( $O_{2i}$ ) kuralların ağırlık derecelerini ( $w_i$ ) vermektedir.

$$O_{2i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y) \quad i = 1, 2 \quad (3.7)$$

3. tabakadaki hücreler de sabit hücrelerdir, girdileri önceki tabakadan aldıkları ağırlık dereceleri. Bu tabakada ağırlık dereceleri normalize edilir.

$$O_{3i} = \overline{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i = 1, 2 \quad (3.8)$$

4. tabakadaki hücreler adaptif hücrelerdir ve bu hücrelerin çıktısı Eşitlik 3.9' daki şekilde hesaplanır.

$$O_{4i} = \overline{w}_i \cdot f_i = \overline{w}_i \cdot (p_i x + q_i y + r_i) \quad i = 1, 2 \quad (3.9)$$

Burada  $p_i$ ,  $q_i$  ve  $r_i$  model parametreleridir.

5. tabakada çıktı elde edilir. Bu tabaka basit toplama fonksiyonu olarak çalışmaktadır.

$$O_{5i} = f = \sum \overline{w}_i \cdot f_i = \frac{\sum w_i \cdot f_i}{\sum w_i} \quad i = 1, 2 \quad (3.10)$$

Bu tez çalışmasında ANFIS analizleri, MATLAB 7.0 Fuzzy Logic Toolbox programı kullanılarak yapılmıştır. Tüm analizlerde bulanıklaştırma aşamasında üçgen üyelik fonksiyonu, durulaştırma aşamasında ise ağırlıklı ortalama yöntemi kullanılmıştır.

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, kullanılan zemin numuneleri üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinin sonuçları değerlendirilmiş ve şişme karakteristiklerinin tahmin edilmesi için ANFIS yaklaşımının kullanılabilirliği tartışılmıştır. Öncelikle, kullanılan zemin numuneleri standart zemin mekaniği deneyleri ile tanımlanmış ve bazı indeks özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra, numunelerin mineralojik bileşimlerinin belirlenmesi amacıyla X-ray difraksiyon analizleri yapılmış; ayrıca, killerin temel kimyasal özelliklerinden biri olan katyon değiştirme kapasitesi değerleri belirlenmiştir. Belli başlangıç koşuluna sahip olacak şekilde dinamik kompaksiyonla hazırlanan kil numuneleri üzerinde; ödometre serbest şişme yöntemi ile şişme yüzdesi, ödometre sabit hacim yöntemi ile şişme basıncı ve saykrometre tekniği ile emme basıncı değerleri belirlenmiştir. Zemin numunelerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin; şişme yüzdesi, şişme basıncı ve emme basıncı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ayrıca, Keskin vd. (1999) tarafından tanımlanan emme kapasitesi ( $W_{em}$ ) ile Hanafy (1999) tarafından tanımlanan bağıl su muhtevası (RM) parametreleri belirlenerek, şişme ve emme karakteristikleriyle ilişkileri incelenmiştir. Elde edilen tüm veriler değerlendirilerek; şişme yüzdesi, şişme basıncı ve emme basıncı gibi zemin özelliklerinin ANFIS yaklaşımıyla tahmin edilebilirliği araştırılmıştır.

##### 4.1. Zemin Numunelerinin Tanımlanması

Çalışmada kullanılan zemin numunelerinin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre zemin sınıfları; tane boyutu analizleri ve kıvam limitleri deneylerinin sonuçlarına bağlı olarak belirlenmiştir. Buna göre, Numune 5, düşük plastisiteli kil (CL), diğer tüm numuneler ise yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfına girmektedir.

X-ray difraksiyon analizlerinin sonuçları (Bkz. Ek 2) incelendiğinde; Burdur bölgesinden alınan Numune 1 ve Numune 2 içerisinde illit ve smektit kil mineralleri ile kalsit ve aragonit bulunduğu görülmektedir. Numune 2 içerisinde ayrıca, kaolinit ve vermikülit kil mineralleri bulunmaktadır. Ankara'dan alınan Numune 3 içerisinde, montmorillonit, illit ve vermikülit kil mineralleri ile kuvars ve biyotit mevcuttur.

Kütahya bölgesinden alınan Numune 4 içinde montmorillonit, kalsit ve kuvars bulunmaktadır. Kütahya bölgesinden alınan Numune 5 içerisinde montmorillonit, dolomit ve kuvars mineralleri olduğu görülmektedir.

İncelenen zeminlerin kıvam limitleri, aktiviteleri ve kil yüzdeleri belirlenerek, bunlara bağlı olarak farklı araştırmacılar tarafından verilen kriterlere (Bkz. Bölüm 2.4.2.2.) göre şişme potansiyelleri belirlenmiştir (Çizelge 4.1.). Numuneler üzerinde yapılan serbest şişme indisi (FSI), modifiye serbest şişme indisi (MFSI) ve katyon değiştirme kapasitesi (CEC) deneylerinin sonuçları Çizelge 4.2. de verilmiştir.

Çizelge 4.1. İncelenen zeminlerin şişme potansiyelleri

Numune	Şişme Potansiyeli			
	Seed vd. (1962)	Van der Merwe (1964)	Dakshanamurthy ve Raman (1973)	Basma (1993)
1	Orta	Orta	Yüksek	Orta
2	Düşük	Düşük	Yüksek	Orta
3	Yüksek	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Yüksek
4	Yüksek	Orta	Çok Yüksek	Yüksek
5	Düşük	Düşük	Orta	-
6	Çok Yüksek	Yüksek	Aşırı Yüksek	Yüksek
7	Orta	Orta	Yüksek	Orta
8	Yüksek	Düşük	Çok Yüksek	Yüksek

Çizelge 4.2. Zemin numunelerinin şişme indisi ve katyon değiştirme kapasitesi değerleri

Numune	FSI	MFSI	CEC (meq/100 gr)
Num 1	1.7	3.68	20.42
Num 2	1.6	3.24	15.00
Num 3	2.3	5.42	31.92
Num 4	1.8	3.93	22.45
Num 5	1.5	2.98	16.95
Num 6	2.0	4.62	26.44
Num 7	1.8	3.97	20.99
Num 8	2.2	5.18	25.03

#### 4.2. Şişme ve Emme Deneyleri

Bu tez çalışmasında, zemin numunelerinin farklı başlangıç koşullarındaki şişme yüzdeleri, ödometre serbest şişme deney yöntemi; şişme basınçları ise ödometre sabit hacim deney yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Emme basınçlarının

belirlenmesinde ısı çift saykrometre tekniğinden yararlanılmıştır. İncelenen zemin numunelerinin farklı başlangıç koşulları altındaki şişme yüzdesi, şişme basıncı ve emme basıncı değerleri aşağıda çizelgeler halinde verilmiştir. Çizelge 4.3. 'te Numune 1 için elde edilen sonuçlar görülmektedir. Numune 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8 için elde edilen sonuçlar, sırasıyla Çizelge 4.4., 4.5., 4.6., 4.7., 4.8., 4.9. ve 4.10.' da yer almaktadır.

Çizelge 4.3. Numune 1 için farklı başlangıç koşullarındaki emme ve şişme karakteristikleri

Başlangıç Koşulları		Serbest Şişme			Sabit Hacim	Saykrometre
$\gamma_k$ (gr/cm <sup>3</sup> )	w <sub>0</sub> (%)	W <sub>em</sub> (%)	RM (%)	S (%)	P <sub>s</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	$\psi_T$ (kg/cm <sup>2</sup> )
1.35	15	45.7	32.8	13.5	0.77	31.1
	20	43.4	46.1	10.6	0.64	15.8
	25	39.5	63.3	7.6	0.38	9.3
	30	36.9	81.3	4.7	0.19	5.0
1.40	15	45.0	33.3	15.4	0.91	31.8
	20	42.7	46.8	11.9	0.76	16.4
	25	38.9	64.3	8.4	0.50	9.5
	30	36.2	82.9	4.9	0.22	5.0
1.45	15	43.2	34.7	16.7	1.09	34.3
	20	41.7	48.0	12.5	0.91	17.1
	25	37.9	66.0	9.1	0.58	9.9
	30	35.4	84.7	5.1	0.28	5.2
1.50	15	42.3	35.5	17.4	1.34	35.5
	20	40.2	49.8	13.4	1.09	17.6
	25	37.6	66.5	9.6	0.72	10.2
	30	34.5	87.0	5.4	0.33	5.3

Çizelge 4.4. Numune 2 için farklı başlangıç koşullarındaki emme ve şişme karakteristikleri

Başlangıç Koşulları		Serbest Şişme			Sabit Hacim	Saykrometre
$\gamma_k$ (gr/cm <sup>3</sup> )	w <sub>0</sub> (%)	W <sub>em</sub> (%)	RM (%)	S (%)	P <sub>s</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	$\psi_T$ (kg/cm <sup>2</sup> )
1.35	15	42.8	35.1	9.8	0.44	16.0
	20	40.6	49.2	8.2	0.37	10.8
	25	38.5	64.9	6.1	0.20	6.8
	30	36.5	82.3	4.7	0.10	3.8
1.40	15	41.4	36.2	10.4	0.52	16.8
	20	39.5	50.6	8.6	0.42	11.0
	25	36.2	69.1	6.4	0.28	7.6
	30	34.8	86.1	4.9	0.13	4.2
1.45	15	39.8	37.7	10.7	0.58	18.8
	20	38.2	52.3	8.9	0.49	11.7
	25	35.2	71.1	6.8	0.27	7.7
	30	33.1	90.5	5.1	0.13	4.4
1.50	15	38.5	39.0	10.9	0.72	20.4
	20	37.0	54.1	9.1	0.58	11.7
	25	33.6	74.3	7.1	0.34	7.9

Çizelge 4.5. Numune 3 için farklı başlangıç koşullarındaki emme ve şişme karakteristikleri

Başlangıç Koşulları		Serbest Şişme			Sabit Hacim	Saykrometre
$\gamma_k$ (gr/cm <sup>3</sup> )	w <sub>0</sub> (%)	W <sub>em</sub> (%)	RM (%)	S (%)	P <sub>s</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	$\psi_T$ (kg/cm <sup>2</sup> )
1.35	15	49.8	30.1	20.3	1.36	50.6
	20	47.8	41.8	17.6	1.14	23.6
	25	45.2	55.3	13.2	0.76	11.0
	30	42.9	69.9	9.8	0.33	5.1
1.40	15	48.5	30.9	20.9	1.64	52.2
	20	46.8	42.7	18.2	1.38	25.6
	25	43.9	56.9	14.2	0.76	11.8
	30	41.7	71.9	10.7	0.37	5.9
1.45	15	47.9	31.3	21.6	1.97	54.0
	20	45.9	43.6	18.7	1.68	28.0
	25	42.6	58.7	15.4	0.92	12.5
	30	40.9	73.3	11.8	0.47	6.6
1.50	15	45.6	32.9	22.9	2.29	54.6
	20	43.8	45.7	19.4	1.97	29.2
	25	41.1	60.8	15.7	1.11	13.4
	30	38.9	77.1	12.6	0.55	7.0

Çizelge 4.6. Numune 4 için farklı başlangıç koşullarındaki emme ve şişme karakteristikleri

Başlangıç Koşulları		Serbest Şişme			Sabit Hacim	Saykrometre
$\gamma_k$ (gr/cm <sup>3</sup> )	w <sub>0</sub> (%)	W <sub>em</sub> (%)	RM (%)	S (%)	P <sub>s</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	$\psi_T$ (kg/cm <sup>2</sup> )
1.35	15	48.2	31.1	14.9	0.92	43.5
	20	43.9	45.6	10.5	0.75	21.3
	25	39.7	63	6.3	0.45	10.4
	30	35.4	84.7	4.3	0.23	5.1
1.40	15	46.7	32.1	16.7	1.17	48.1
	20	43.1	46.4	12.8	0.99	22.3
	25	39.4	63.5	8.7	0.51	11.0
	30	35.6	84.2	4.4	0.25	5.2
1.45	15	45.6	32.9	18.6	1.34	53.6
	20	42.3	47.3	14.5	1.11	22.7
	25	39.2	63.8	10.6	0.65	11.4
	30	36.0	83.3	7.4	0.31	5.3
1.50	15	44.1	34	20.5	1.50	58.7
	20	41.6	48.1	16.4	1.29	23.4
	25	39.0	64.1	12.9	0.72	12.6
	30	35.1	85.4	8.9	0.36	5.3

Çizelge 4.7. Numune 5 için farklı başlangıç koşullarındaki emme ve şişme karakteristikleri

Başlangıç Koşulları		Serbest Şişme			Sabit Hacim	Saykrometre
$\gamma_k$ (gr/cm <sup>3</sup> )	w <sub>0</sub> (%)	W <sub>em</sub> (%)	RM (%)	S (%)	P <sub>s</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	$\psi_T$ (kg/cm <sup>2</sup> )
1.35	15	39.6	37.9	5.3	0.25	6.5
	20	37.2	53.8	3.0	0.21	3.8
	25	34.6	72.2	0.4	0.13	2.1
1.40	15	38.2	39.3	6.6	0.29	6.9
	20	35.3	56.6	3.7	0.24	4.2
	25	32.3	77.3	0.7	0.15	2.5
1.45	15	36.8	40.8	7.7	0.35	7.9
	20	33.5	59.7	4.6	0.30	4.4
	25	30.1	83.0	0.9	0.17	3.0
1.50	15	35.3	42.5	9.4	0.38	8.7
	20	31.7	63.1	5.1	0.33	5.1
	25	27.8	89.8	1.0	0.19	3.8

Çizelge 4.8. Numune 6 için farklı başlangıç koşullarındaki emme ve şişme karakteristikleri

Başlangıç Koşulları		Serbest Şişme			Sabit Hacim	Saykrometre
$\gamma_k$ (gr/cm <sup>3</sup> )	w <sub>0</sub> (%)	W <sub>em</sub> (%)	RM (%)	S (%)	P <sub>s</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	$\psi_T$ (kg/cm <sup>2</sup> )
1.35	15	56.3	26.6	23.3	1.41	52.9
	20	51.9	38.5	19.6	1.13	25.8
	25	47.7	52.4	16.4	0.80	13.0
	30	43.5	69.0	12.1	0.34	5.7
1.40	15	56.5	26.6	24.4	1.71	58.2
	20	52.8	37.9	21.5	1.46	27.0
	25	49.1	50.9	17.7	0.78	13.6
	30	45.4	66.1	12.5	0.37	7.1
1.45	15	54.6	27.5	25.2	2.05	61.7
	20	51.4	38.9	22.4	1.73	27.7
	25	48.3	51.8	19.1	0.98	14.5
	30	45.1	66.5	13.2	0.50	7.3
1.50	15	50.6	29.7	25.7	2.51	66.6
	20	48.0	41.7	23.7	2.10	28.9
	25	45.4	55.0	20.1	1.17	15.3
	30	43.1	69.6	13.7	0.58	7.7



Çizelge 4.9. Numune 7 için farklı başlangıç koşullarındaki emme ve şişme karakteristikleri

Başlangıç Koşulları		Serbest Şişme			Sabit Hacim	Saykrometre
$\gamma_k$ (gr/cm <sup>3</sup> )	w <sub>0</sub> (%)	W <sub>em</sub> (%)	RM (%)	S (%)	P <sub>s</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	$\psi_T$ (kg/cm <sup>2</sup> )
1.35	15	43.6	34.4	13.5	0.65	9.4
	20	39.6	50.5	12.4	0.59	5.6
	25	36.3	68.9	5.7	0.39	3.3
	30	32.8	91.5	2.0	0.16	1.9
1.40	15	42.5	35.3	14.3	0.80	10.1
	20	38.8	51.5	12.6	0.67	5.7
	25	35.7	70.0	6.3	0.38	3.5
	30	32.5	92.4	2.5	0.20	2.1
1.45	15	41.3	36.3	15.2	1.00	11.1
	20	38.0	52.6	12.8	0.83	6.3
	25	35.1	71.2	6.9	0.47	3.7
	30	32.1	93.4	2.9	0.23	2.2
1.50	15	40.2	37.4	15.9	1.17	11.6
	20	37.2	53.7	13.0	0.96	6.5
	25	34.5	72.4	7.6	0.55	3.9
	30	31.8	94.3	3.4	0.27	2.3

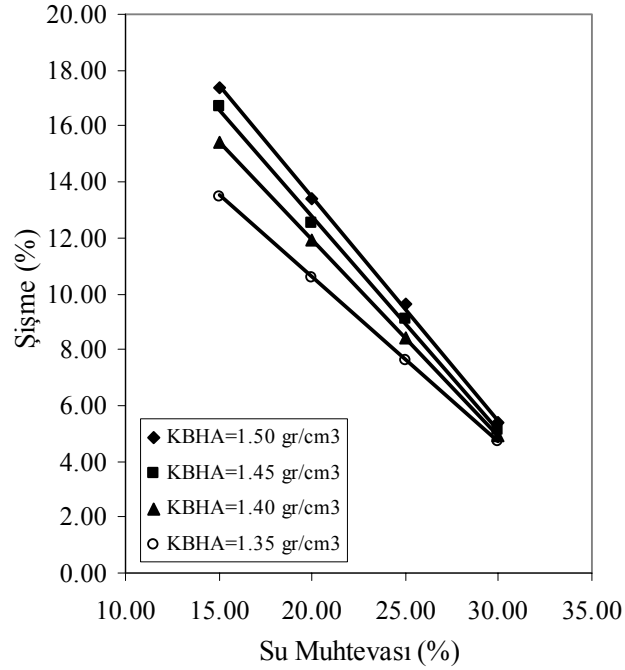
Çizelge 4.10. Numune 8 için farklı başlangıç koşullarındaki emme ve şişme karakteristikleri

Başlangıç Koşulları		Serbest Şişme			Sabit Hacim	Saykrometre
$\gamma_k$ (gr/cm <sup>3</sup> )	w <sub>0</sub> (%)	W <sub>em</sub> (%)	RM (%)	S (%)	P <sub>s</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	$\psi_T$ (kg/cm <sup>2</sup> )
1.35	15	52.1	28.8	23.7	1.19	12.5
	20	50.0	40.0	19.9	0.99	7.4
	25	46.4	53.9	16.2	0.54	4.4
	30	43.4	69.1	11.7	0.28	2.6
1.40	15	50.7	29.6	25.6	1.36	13.2
	20	48.9	40.9	22.7	1.13	8.0
	25	45.6	54.8	17.5	0.64	4.7
	30	43.1	69.6	12.6	0.32	2.8
1.45	15	49.9	30.1	27.7	1.60	14.2
	20	48.0	41.7	24.9	1.31	8.6
	25	45.9	54.4	20.4	0.70	5.1
	30	42.9	69.9	13.7	0.35	3.1
1.50	15	49.1	30.6	28.6	1.97	15.2
	20	47.0	42.6	26.4	1.60	9.3
	25	44.9	55.7	21.8	0.89	5.5
	30	42.8	70.1	14.3	0.47	3.3

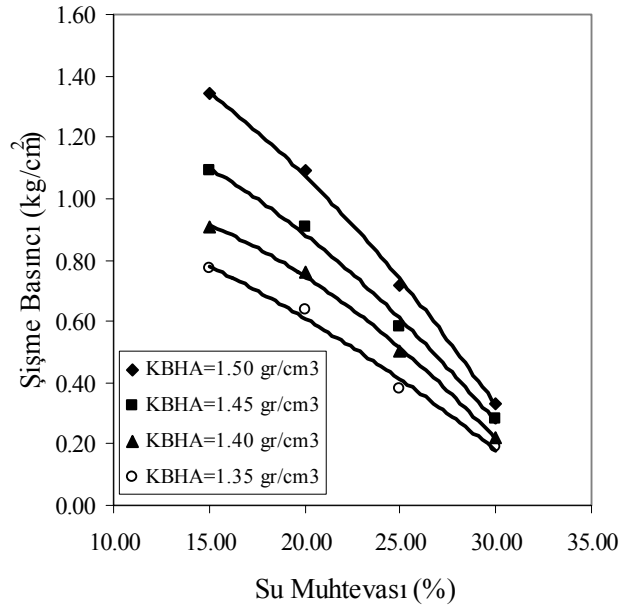
#### 4.2.1. Başlangıç Su Muhtevasının Şişme ve Emme Karakteristikleriyle İlişkisi

Deneylerden elde edilen sonuçlara bağlı olarak; başlangıç su muhtevasının şişme yüzdesi, şişme basıncı ve emme basıncı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tüm zemin numuneleri üzerinde benzer davranışlar gözlemlendiğinden, örnek olması bakımından sadece Numune 1 için elde edilen grafikler ayrı ayrı sunulmuştur.

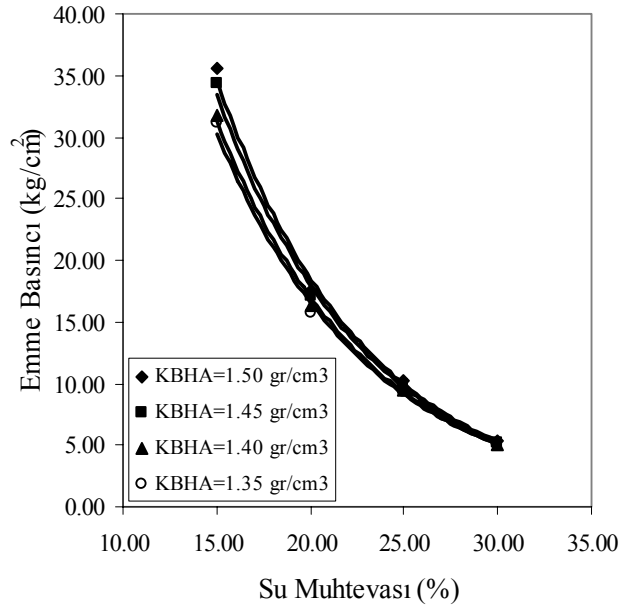
Şekil 4.1. de başlangıç su muhtevasının şişme yüzdesi üzerindeki etkisi, Şekil 4.2.'de başlangıç su muhtevasının şişme basıncı üzerindeki etkisi, Şekil 4.3.'te başlangıç su muhtevasının emme basıncı üzerindeki etkisi görülmektedir.



Şekil 4.1. Başlangıç su muhtevasının şişme yüzdesi üzerindeki etkisi (Numune 1)



Şekil 4.2. Başlangıç su muhtevasının şişme basıncı üzerindeki etkisi (Numune 1)



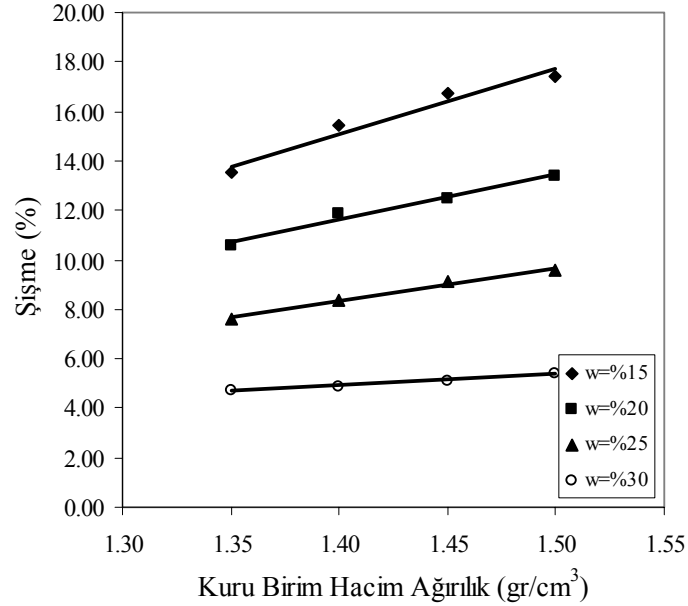
Şekil 4.3. Başlangıç su muhtevasının emme basıncı üzerindeki etkisi (Numune 1)

Şekil 4.1. ve 4.2.'de görüldüğü gibi, başlangıç su muhtevasının artmasıyla, şişme yüzdesi ve şişme basıncı azalmaktadır. Bu azalma şişme yüzdesinde lineerken, şişme

basıncında doğrusal olmayan bir durum sergilemektedir. Başlangıç su muhtevastındaki artış sonucunda, emme basıncı üstel olarak azalmaktadır.

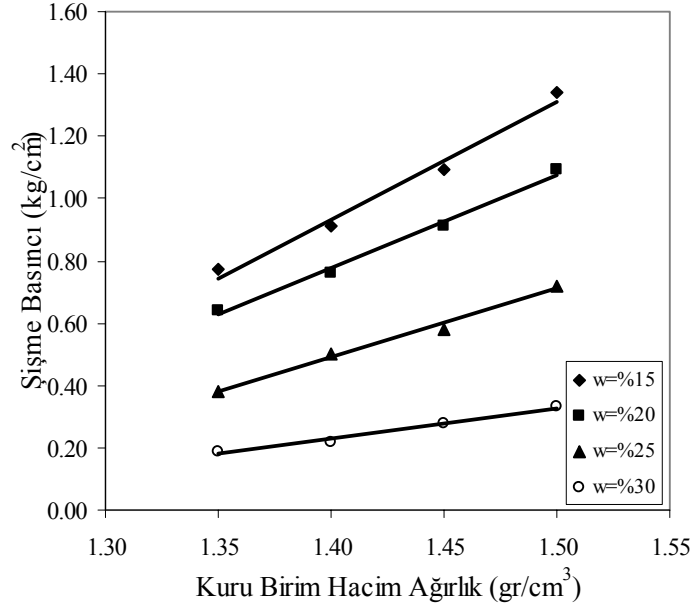
#### 4.2.2. Başlangıç Kuru Birim Hacim Ağırlığının Şişme ve Emme Karakteristikleriyle İlişkisi

Numune 1 için başlangıç kuru birim hacim ağırlığının şişme yüzdesi, şişme basıncı ve emme basıncı üzerindeki etkisi, sırasıyla Şekil 4.4., Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.'da verilmiştir. Diğer zemin numuneleri için de benzer davranışlar gözlemlendiğinden örnek olması açısından sadece Numune 1 için elde edilen grafikler verilmiştir.



Şekil 4.4. Başlangıç kuru birim hacim ağırlığının şişme yüzdesi üzerindeki etkisi (Numune 1)

Şekil 4.4.'ten görüldüğü gibi başlangıç kuru birim hacim ağırlığının artması sonucunda, şişme yüzdesi lineer olarak artmaktadır.

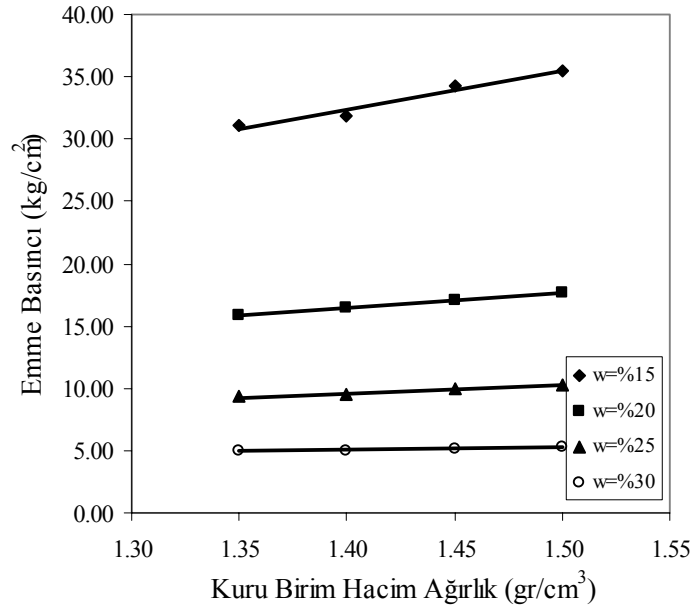


Şekil 4.5. Başlangıç kuru birim hacim ağırlığının şişme basıncı üzerindeki etkisi (Numune 1)

Şekil 4.4. incelendiğinde, şişme yüzdesi ile başlangıç kuru birim hacim ağırlığı arasında doğrusal bir ilişkinin bulunduğu görülmektedir. Başlangıç su muhtevasının artmasıyla, kuru birim hacim ağırlık – şişme yüzdesi ilişkisinin eğimi azalmaktadır.

Şekil 4.5. ise, başlangıç kuru birim hacim ağırlığının artmasıyla şişme basıncının doğrusal olarak arttığını göstermektedir. Su muhtevasının artması sonucunda, kuru birim hacim ağırlık – şişme basıncı ilişkisinin eğimi azalmaktadır.

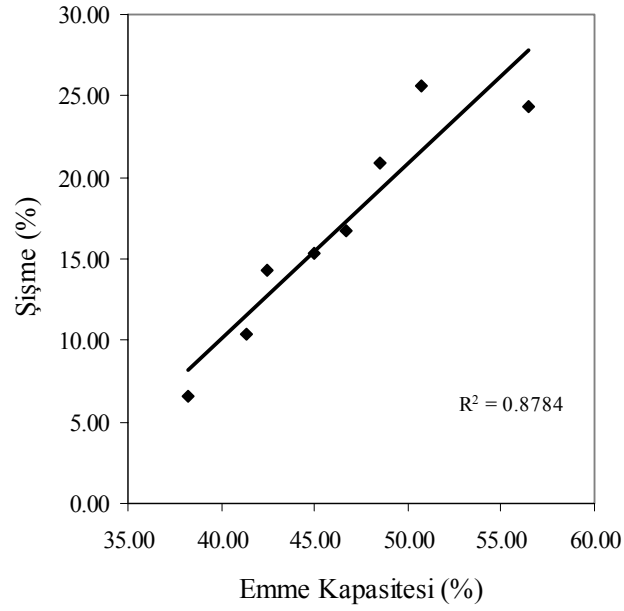
Başlangıç kuru birim hacim ağırlığı ile emme basıncı arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Bununla birlikte, özellikle yüksek su muhtevalarında, başlangıç kuru birim hacim ağırlığının emme basıncı üzerindeki etkisi çok düşüktür (Şekil 4.6.).



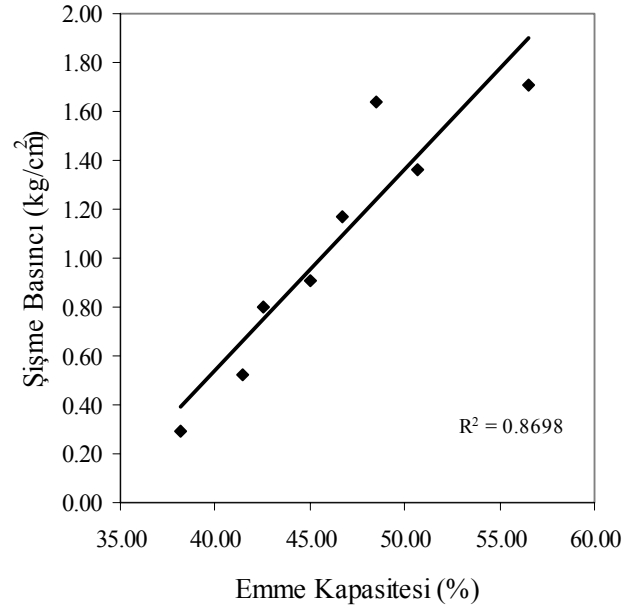
Şekil 4.6. Başlangıç kuru birim hacim ağırlığının emme basıncı üzerindeki etkisi (Numune 1)

#### 4.2.3. Emme Kapasitesi ile Zeminlerin Emme ve Şişme Karakteristikleri Arasındaki İlişkiler

İncelenen zeminlerin farklı başlangıç koşullarındaki emme kapasitesi değerleriyle şişme yüzdeleri arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Çizelge 4.3. - 4.10.' da verilen deney sonuçlarından, örnek olarak, başlangıç kuru birim hacim ağırlığının 1.40 gr/cm<sup>3</sup> ve başlangıç su muhtevasının % 15 olması durumu seçilmiştir; emme kapasitesi ve şişme yüzdesi arasındaki ilişki Şekil 4.7.'de verilmiştir. Elde edilen ilişkinin determinasyon katsayısı yaklaşık %88 olarak belirlenmiştir. Aynı başlangıç koşullarında, emme kapasitesi ile şişme basıncı arasındaki ilişki Şekil 4.8.' de görülmektedir. İlişkinin determinasyon katsayısı yaklaşık % 87 dir.



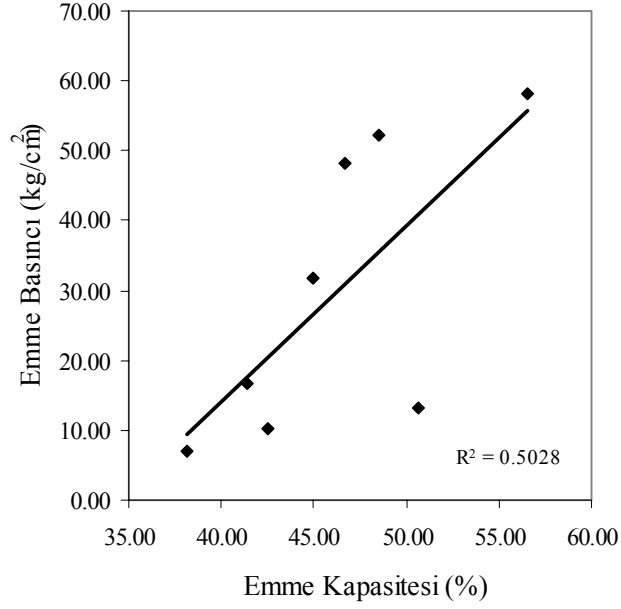
Şekil 4.7. Emme kapasitesi ile şişme arasındaki ilişki ( $\gamma_k=1.40 \text{ gr/cm}^3$ ,  $w=15 \%$ )



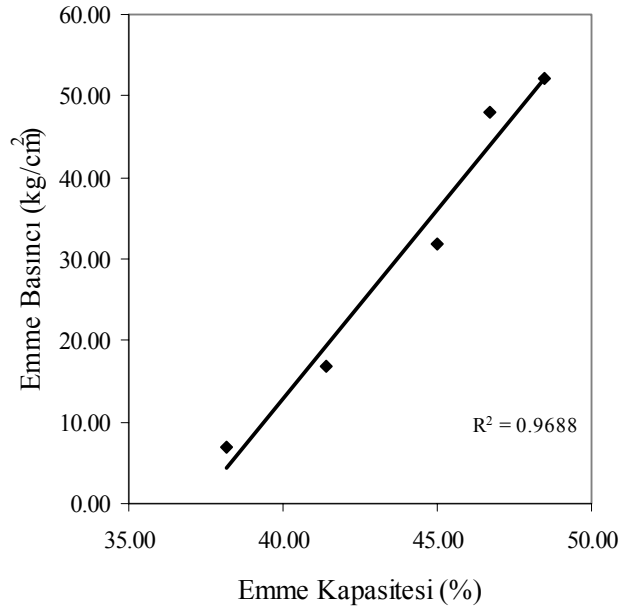
Şekil 4.8. Emme kapasitesi ile şişme basıncı arasındaki ilişki ( $\gamma_k= 1.40 \text{ gr/cm}^3$ ,  $w= 15 \%$ )

Emme kapasitesi ile emme basıncı arasındaki ilişki Şekil 4.9.' da verilmiştir. İncelenen tüm zeminler dikkate alındığında determinasyon katsayısı yaklaşık % 50

gibi düşük bir değerdir. Bununla birlikte, sadece doğal zeminler (Num 1, 2, 3, 4 ve 5) için elde edilen ilişkinin determinasyon katsayısı % 97 civarındadır (şekil 4.10.).



şekil 4.9.Emme kapasitesi ile emme basıncı arasındaki ilişki (  $\gamma_k= 1.40 \text{ gr/cm}^3$ ,  $w= 15 \%$ )

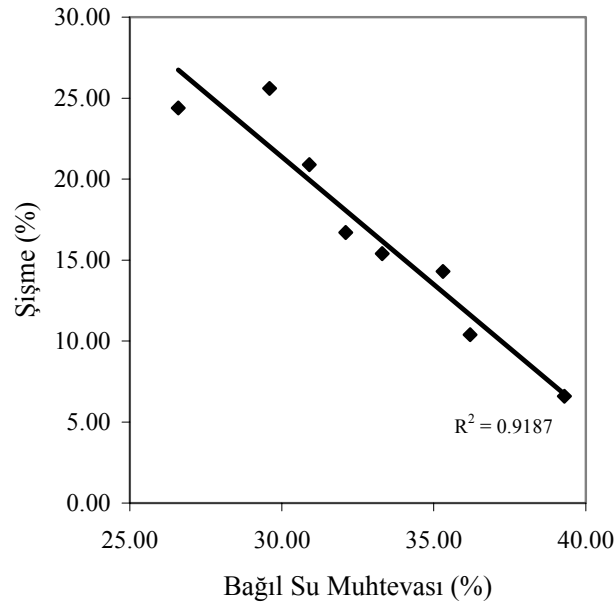


şekil 4.10.Emme kapasitesi ile emme basıncı arasındaki ilişki (Num 1, 2, 3, 4 ve 5)

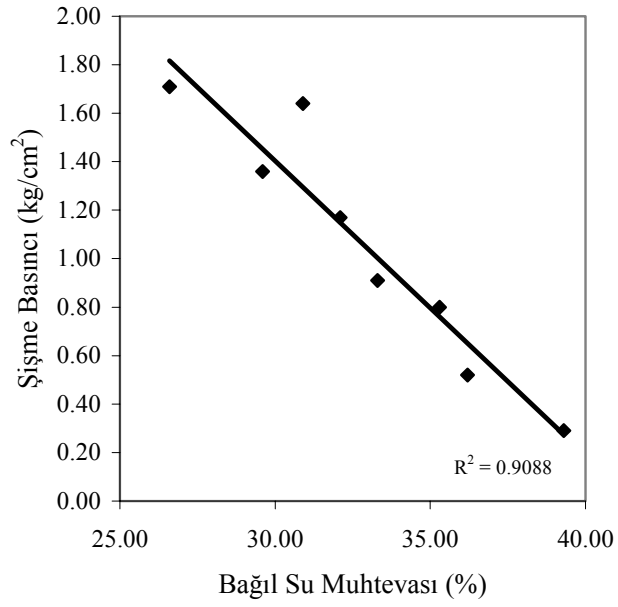


#### 4.2.4. Bağıl Su Muhtevası ile Zeminlerin Emme ve Şişme Karakteristikleri Arasındaki İlişkiler

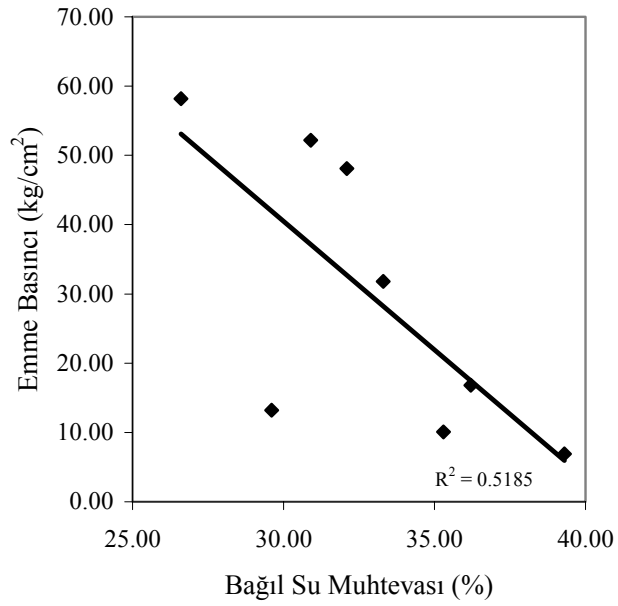
Başlangıç kuru birim hacim ağırlığının  $1.40 \text{ gr/cm}^3$  ve başlangıç su muhtevasının % 15 olması durumunda; bağıl su muhtevası (RM) ve şişme yüzdesi arasındaki ilişki Şekil 4.11. de verilmiştir. Elde edilen ilişkinin determinasyon katsayısı yaklaşık %91 olarak belirlenmiştir. Diğer tüm başlangıç koşullarında hemen hemen aynı ilişkiler elde edilmiştir. Aynı başlangıç koşullarında, bağıl su muhtevası ile şişme basıncı arasındaki ilişki Şekil 4.12.' de, bağıl su muhtevası ile emme basıncı arasındaki ilişki ise Şekil 4.13.' te verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, bağıl su muhtevasının şişme yüzdesi, şişme basıncı ve emme basıncı üzerindeki etkisinin, bir önceki bölümde verilen emme kapasitesi etkisiyle benzer olduğu görülmektedir.



Şekil 4.11. Bağıl su muhtevası ve şişme yüzdesi arasındaki ilişki ( $\gamma_k = 1.40 \text{ gr/cm}^3$ ,  $w = 15 \%$ )



Şekil 4.12. Bağlı su muhtevası ve şişme basıncı arasındaki ilişki ( $\gamma_k = 1.40 \text{ gr/cm}^3$ ,  $w = 15 \%$ )



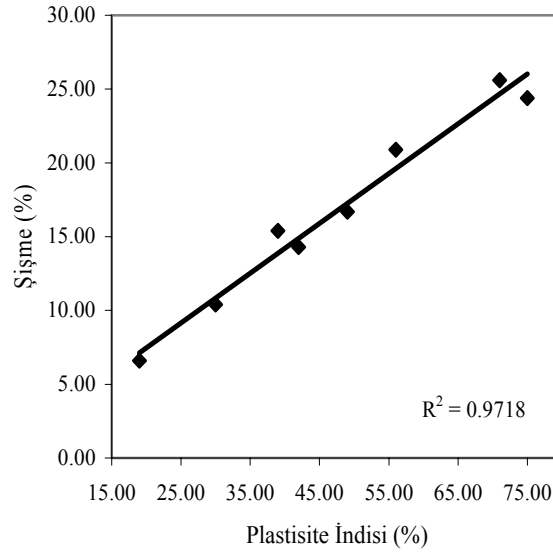
Şekil 4.13. Bağlı su muhtevası ve emme basıncı arasındaki ilişki ( $\gamma_k = 1.40 \text{ gr/cm}^3$ ,  $w = 15 \%$ )

### 4.3. Zeminlerin Bazı Fiziksel Özellikleri ile Emme ve Şişme Karakteristikleri Arasındaki İlişkiler

Bu bölümde, plastisite indisi, kation değişirme kapasitesi ve modifiye serbest şişme indisi ile zeminlerin emme ve şişme karakteristikleri arasında bulunan ilişkiler verilmiştir. Bu özellikler, zeminlerin mineralojik özelliklerindeki değişimleri yansıtmaları nedeniyle, emme ve şişme potansiyellerinin tahmininde kullanılmaktadır. Ancak, söz konusu parametreler, zeminlerin başlangıç koşullarından bağımsız olup, bir zemin için tek bir değere sahiptir.

#### 4.3.1. Plastisite İndisi ile Emme ve Şişme Karakteristikleri Arasındaki İlişkiler

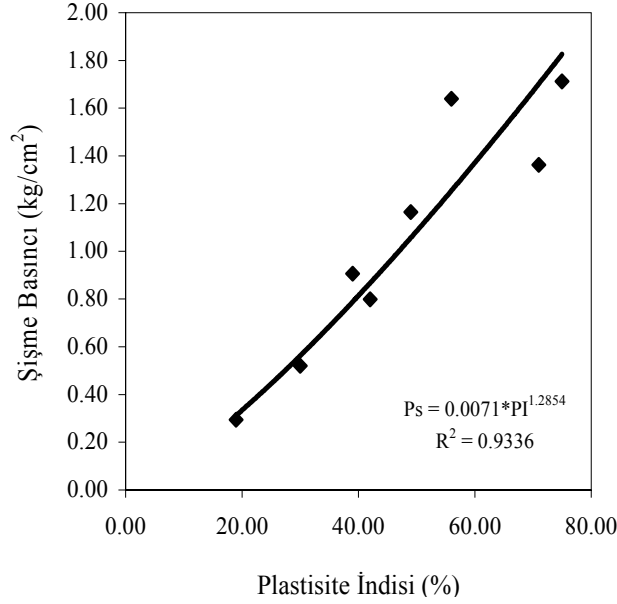
Zeminlerin tüm başlangıç koşulları için benzer ilişkilerin mevcut olması nedeniyle, burada örnek olarak  $\gamma_k = 1.40 \text{ gr/cm}^3$  ve  $w = \%15$  koşullarındaki durumlar verilmiştir. Plastisite indisi ile şişme yüzdesi arasında elde edilen ilişki Şekil 4.14.' te verilmiştir.



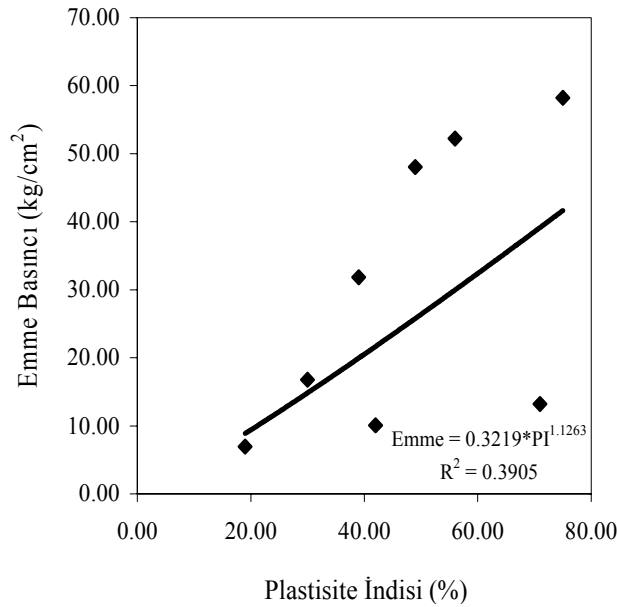
Şekil 4.14. Plastisite indisi ile şişme yüzdesi arasındaki ilişki

Şekil 4.14.' ten görüleceği gibi ilişki doğrusal olup determinasyon katsayısı %97 civarındadır. İncelenen zeminler için şişme yüzdesinin tahmin edilmesinde plastisite indisi oldukça iyi sonuçlar vermektedir.

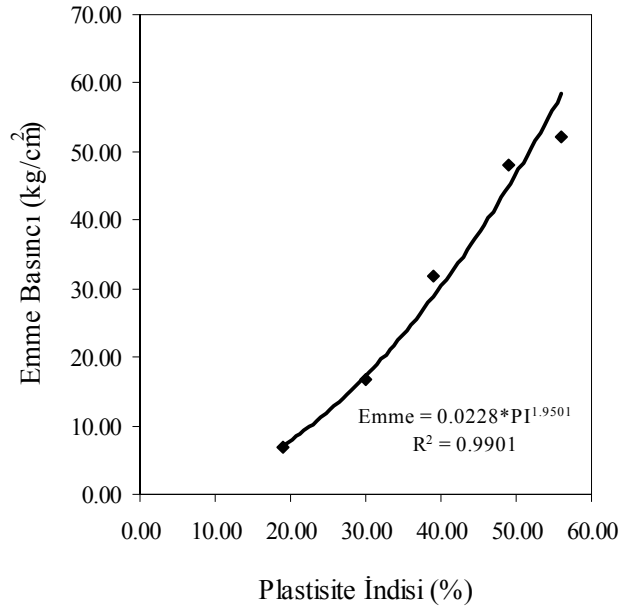
Şekil 4.15. te görüldüğü gibi, plastisite indisi ile şişme basıncı arasındaki ilişki üssel olup, determinasyon katsayısı yaklaşık %93 tür. Emme basıncı ile plastisite indisi arasındaki ilişki ise Şekil 4.16. da verilmiştir. İlişkinin determinasyon katsayısı %39 gibi oldukça düşük bir değerdir. Bununla birlikte, sadece doğal killer (Numune 1, 2, 3, 4 ve 5) için elde edilen ilişkinin determinasyon katsayısı %99 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.17.).



Şekil 4.15. Plastisite indisi ile şişme basıncı arasındaki ilişki



Şekil 4.16. Plastisite indisi ile emme basıncı arasındaki ilişki

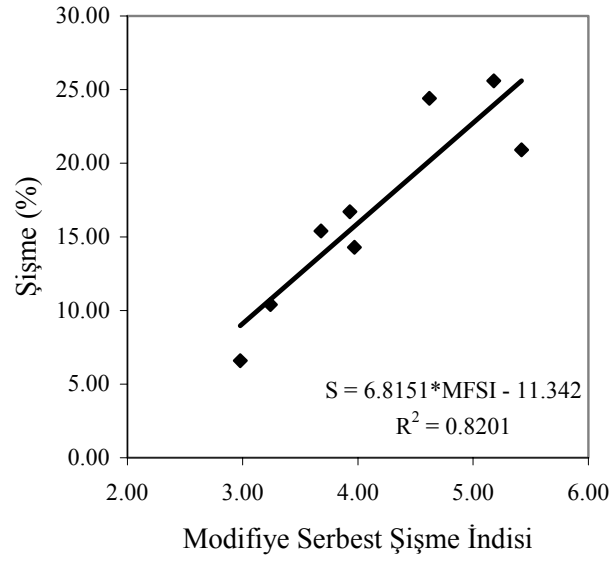


Şekil 4.17. Plastisite indisi ile emme basıncı arasındaki ilişki (Numune 1,2, 3, 4 ve 5)

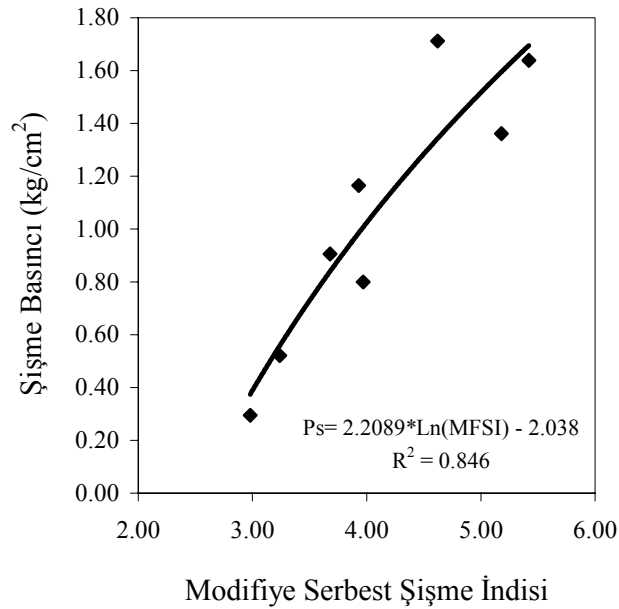
Numune 4 ve 5' e belli oranlarda bentonit katılarak elde edilen numunelerde; plastisite indisi, emme kapasitesi, şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerlerinde önemli bir artış meydana gelmiş; ancak, emme basıncı değerlerindeki artışlar nispeten daha düşük olmuştur. Bu durumun, toplam emmenin (matris emme bileşeni nedeniyle) zemin granülometrisinden etkilenmesinin bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Çünkü, % 5 ve % 10 oranlarında bentonit ilavesi, zeminin özellikle iri taneli kısmının granülometrisi üzerinde çok önemli bir farklılık meydana getirmemektedir (Ek 2.). Bu nedenle, emme basınçlarının gerçekçi şekilde tahmin edilebilmesi için zeminlerin bazı granülometrik karakteristiklerinin de dikkate alınması gerekmektedir.

#### 4.3.2. Modifiye Serbest Şişme İndisi ile Emme ve Şişme Karakteristikleri Arasındaki İlişkiler

Modifiye serbest şişme indisi ile şişme yüzdesi ve şişme basıncı arasındaki ilişki, sırasıyla Şekil 4.18. ve 4.19.' da verilmiştir.

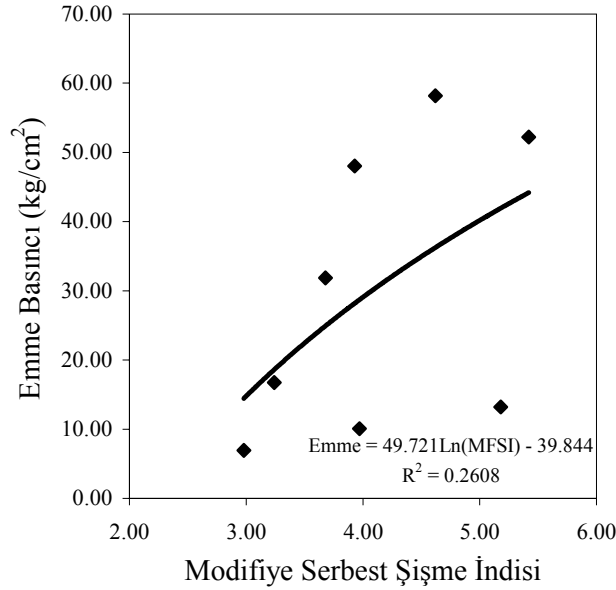


Şekil 4.18. Modifiye serbest şişme indisi ile şişme yüzdesi arasındaki ilişki



Şekil 4.19. Modifiye serbest şişme indisi ile şişme basıncı arasındaki ilişki

Şekil 4.18. ve 4.19.' da görüldüğü üzere modifiye serbest şişme indisi ile incelenen zeminlerin şişme karakteristikleri arasında anlamlı ilişkiler bulunmaktadır. Modifiye serbest şişme indisi ile emme basıncı arasındaki ilişki Şekil 4.20.' de verilmiştir.

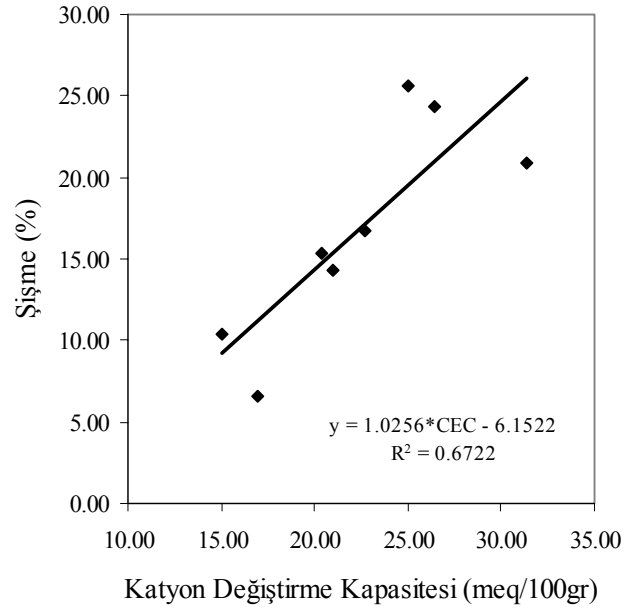


Şekil 4.20. Modifiye serbest şişme indisi ile emme basıncı arasındaki ilişki

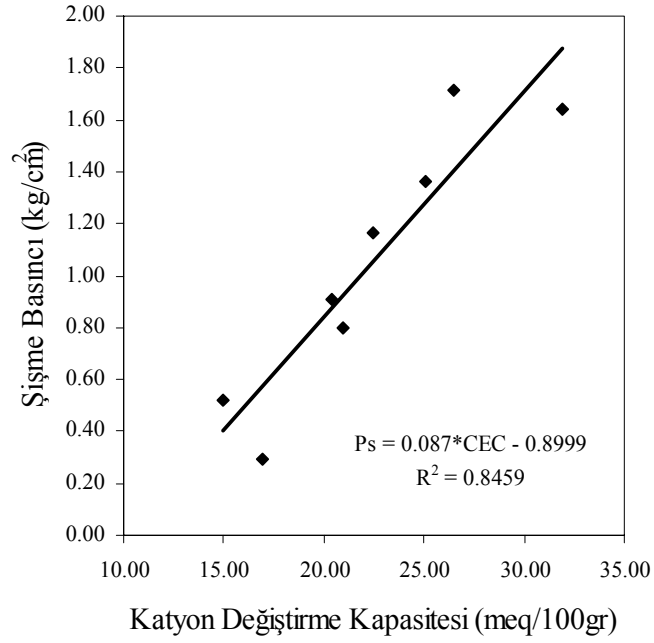
Şekil 4.20. 'de görülebileceği gibi modifiye serbest şişme indisi ve emme arasındaki ilişkinin determinasyon katsayısı %26 olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, sadece doğal zeminler dikkate alındığında ilişkinin determinasyon katsayısı %81 civarında elde edilmektedir.

#### 4.3.3. Katyon Değiştirme Kapasitesi ile Emme ve Şişme Karakteristikleri Arasındaki İlişkiler

Katyon değiştirme kapasitesi ile şişme yüzdesi arasındaki ilişki Şekil 4.21.' de görülmektedir. İlişki doğrusaldır ve determinasyon katsayısı %67 olarak belirlenmiştir. Katyon değiştirme kapasitesi ile şişme basıncı ve emme basıncı arasındaki ilişkiler, sırasıyla Şekil 4.22. ve 4.23.' te verilmiştir. Katyon değiştirme kapasitesi ile şişme basıncı ilişkisi doğrusaldır ve determinasyon katsayısı yaklaşık %85 tir. Katyon değiştirme kapasitesi ile emme basıncı ilişkisinin determinasyon katsayısı %46 civarındadır. Sadece doğal zeminler için söz konusu ilişkinin determinasyon katsayısı %73 olarak belirlenmiştir.

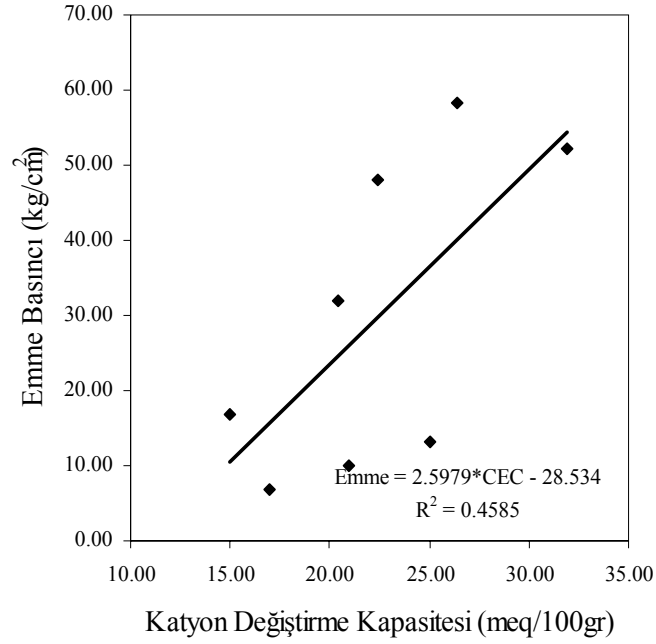


Şekil 4.21. Kasyon değiştirme kapasitesi ile şişme yzdesi arasındaki ilişki



Şekil 4.22. Kasyon değiştirme kapasitesi ile şişme basıncı arasındaki ilişki





Şekil 4.23. Katyon değiştirme kapasitesi ile emme basıncı arasındaki ilişki

#### 4.4. Emme ve Şişme Karakteristiklerinin ANFIS Yaklaşımıyla Tahmin Edilmesi

Çalışmada, 8 farklı zemin numunesi üzerinde yapılan çeşitli deneylerin sonuçları kullanılarak; değişen başlangıç koşulları altındaki Şişme yüzdesi, Şişme basıncı ve emme basıncı değerlerinin tahmin edilebilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, uyarlanabilir sinir ağına dayalı bulanık çıkarım sisteminden (ANFIS) yararlanılmıştır. ANFIS analizleri MATLAB 7.0 Fuzzy Logic Toolbox programı kullanılarak yapılmıştır. Tüm analizlerde bulanıklaştırma aşamasında üçgen üyelik fonksiyonu ve durulaştırma aşamasında da ağırlıklı ortalama yöntemi kullanılmıştır. Her bir numune üzerinde, farklı başlangıç koşullarında yapılan her bir deney grubundan (ödometre serbest Şişme, ödometre sabit hacim ve saykrometre deney grupları) elde edilen, ayrı ayrı 123' er adet deney verisinden, rastgele seçilen 98 adeti modellerin eğitilmesinde ve kalan 25 adeti de modellerin tahmin yeteneklerinin test edilmesinde kullanılmıştır. Çizelge 4.11.'de test aşamasında kullanılan 25 er adet deneysel veri seti verilmiştir.

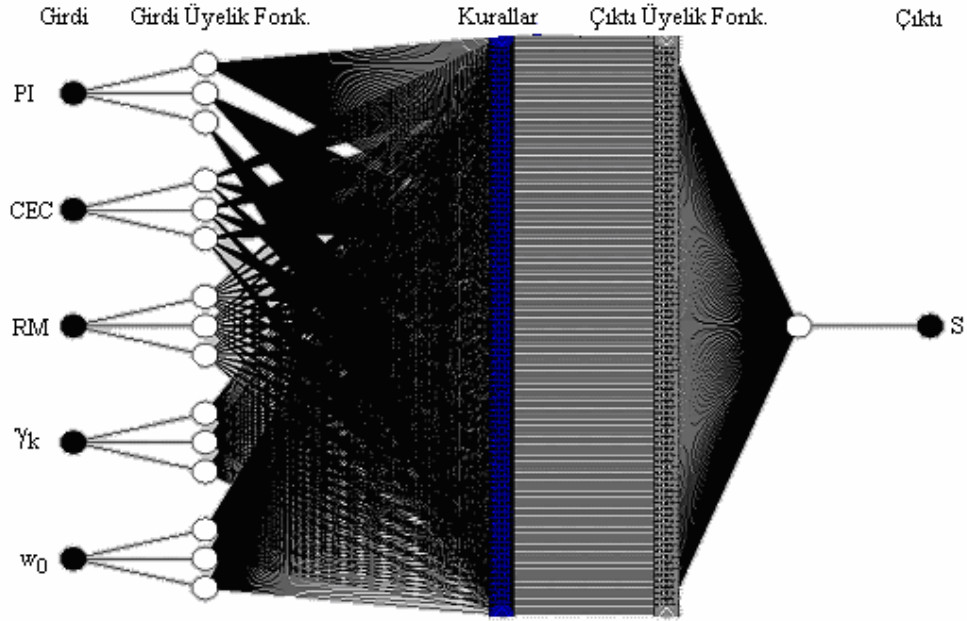
Çizelge 4.11. Modellerin test aşamasında kullanılan deneysel sonuçlar

Numune	PI	MFSI	CEC	D <sub>60</sub>	$\gamma_k$	w <sub>0</sub>	W <sub>em</sub>	RM	S	P <sub>s</sub>	$\Psi_T$
1	39	3.68	20.42	0.008	1.40	15	45.0	33.3	15.4	0.91	31.8
1	39	3.68	20.42	0.008	1.45	25	37.9	66.0	9.1	0.58	9.9
1	39	3.68	20.42	0.008	1.50	30	34.5	87.0	5.4	0.33	5.3
1	39	3.68	20.42	0.008	1.35	20	43.4	46.1	10.6	0.64	15.8
2	30	3.24	15.00	0.013	1.35	20	40.6	49.2	8.2	0.37	10.8
2	30	3.24	15.00	0.013	1.40	15	41.4	36.2	10.4	0.52	16.8
2	30	3.24	15.00	0.013	1.45	30	33.1	90.5	5.1	0.13	4.4
3	56	5.42	31.42	0.008	1.35	25	45.2	55.3	13.2	0.76	11.0
3	56	5.42	31.42	0.008	1.40	30	41.7	71.9	10.7	0.37	5.9
3	56	5.42	31.42	0.008	1.50	20	43.8	45.7	19.4	1.97	29.2
4	49	3.93	22.69	0.011	1.35	30	35.4	84.7	4.3	0.23	5.1
4	49	3.93	22.69	0.011	1.50	25	39.0	64.1	12.9	0.72	12.6
4	49	3.93	22.69	0.011	1.45	15	45.6	32.9	18.6	1.34	53.6
5	19	2.98	16.95	0.021	1.40	20	35.3	56.6	3.7	0.24	4.2
5	19	2.98	16.95	0.021	1.45	25	30.1	83.0	0.9	0.17	3.0
6	75	4.62	26.44	0.010	1.35	15	56.3	26.6	23.3	1.41	52.9
6	75	4.62	26.44	0.010	1.40	20	52.8	37.9	21.5	1.46	27.0
6	75	4.62	26.44	0.010	1.45	25	48.3	51.8	19.1	0.98	14.5
6	75	4.62	26.44	0.010	1.50	30	43.1	69.6	13.7	0.58	7.7
7	42	3.97	20.99	0.020	1.35	25	36.3	68.9	5.7	0.39	3.3
7	42	3.97	20.99	0.020	1.40	30	32.5	92.4	2.5	0.2	2.1
7	42	3.97	20.99	0.020	1.50	20	37.2	53.7	13.0	0.96	6.5
8	71	5.18	25.03	0.018	1.35	15	52.1	28.8	23.7	1.19	12.5
8	71	5.18	25.03	0.018	1.40	20	48.9	40.9	22.7	1.13	8.0
8	71	5.18	25.03	0.018	1.45	30	42.9	69.9	13.7	0.35	3.1

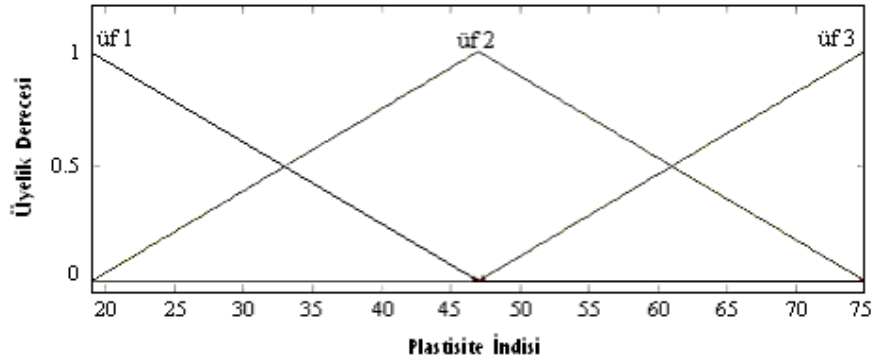
PI - Plastisite indisi (%), MFSI - Modifiye serbest şişme indisi, CEC - Katyon değiştirme kapasitesi (meq/100gr), D<sub>60</sub> - Zemin tanelerinin ağırlıkça %60'ının geçtiği çap (mm),  $\gamma_k$  - Kuru birim hacim ağırlık (gr/cm<sup>3</sup>), w<sub>0</sub> - Başlangıç su muhtevası (%), W<sub>em</sub> - Emme kapasitesi (%), RM - Bağlı su muhtevası (%), S - Şişme yüzdesi, P<sub>s</sub> - Şişme basıncı (kg/cm<sup>2</sup>)  $\Psi_T$  - Emme basıncı (kg/cm<sup>2</sup>)

#### 4.4.1. Şişme Yüzdesinin ANFIS ile Tahmin Edilmesi

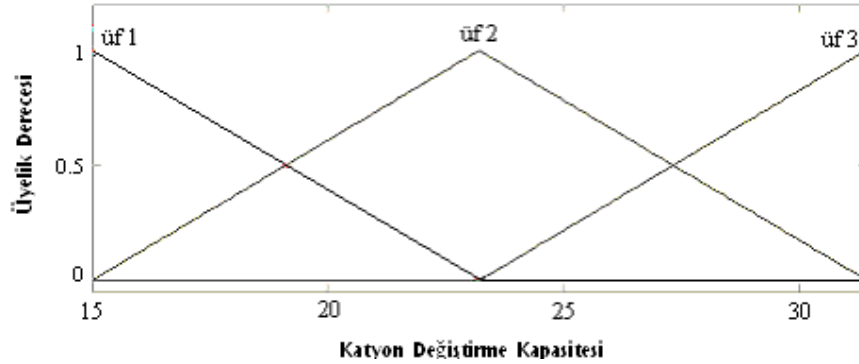
Şişme yüzdesinin, bazı zemin özelliklerinden faydalanılarak ANFIS yöntemiyle tahmin edilmesi amacıyla çeşitli modeller kurulmuş; burada örnek olması açısından üç modele yer verilmiştir. Şekil 4.24.' te, plastisite indisi, katyon değiştirme kapasitesi, bağlı su muhtevası, başlangıç kuru birim hacim ağırlığı ve başlangıç su muhtevasına bağlı olarak şişme yüzdesinin tahmin edilmesi amacıyla kurulan Model 1' in mimarisi görülmektedir. Her bir girdi değeri, üç alt kümeye ayrılmıştır. Girdi değişkenleri için seçilen üyelik fonksiyonu grafikleri Şekil 4.25. - 4.29.' da verilmiştir.



Şekil 4.24. Şişme yüzdesinin tahmini amacıyla kurulan Model 1' in mimarisi



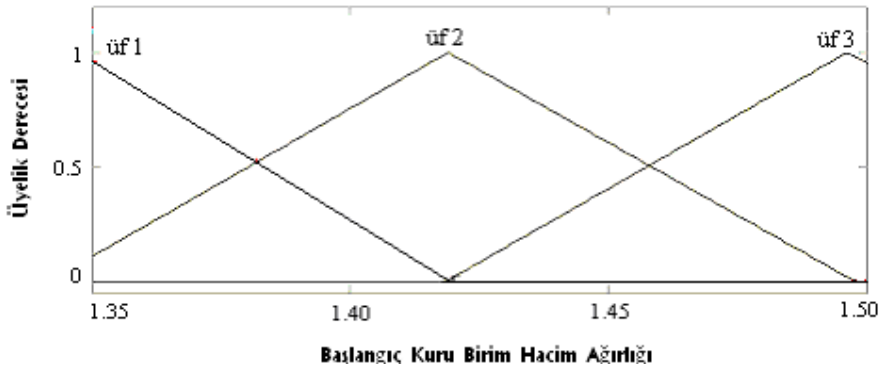
Şekil 4.25. Plastisite indisi için üyelik fonksiyonu grafiği



Şekil 4.26. Katyon değiştirme kapasitesi için üyelik fonksiyonu grafiği



Şekil 4.27. Bağlı su muhtevası için üyelik fonksiyonu grafiği

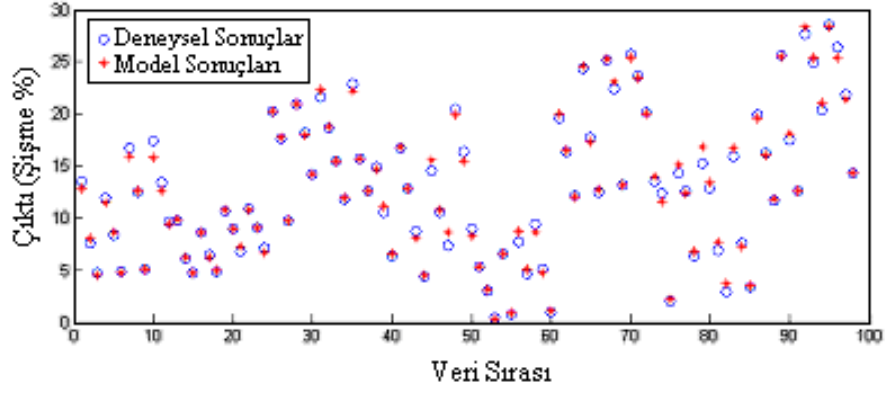


Şekil 4.28. Başlangıç kuru birim hacim ağırlığı için üyelik fonksiyonu grafiği

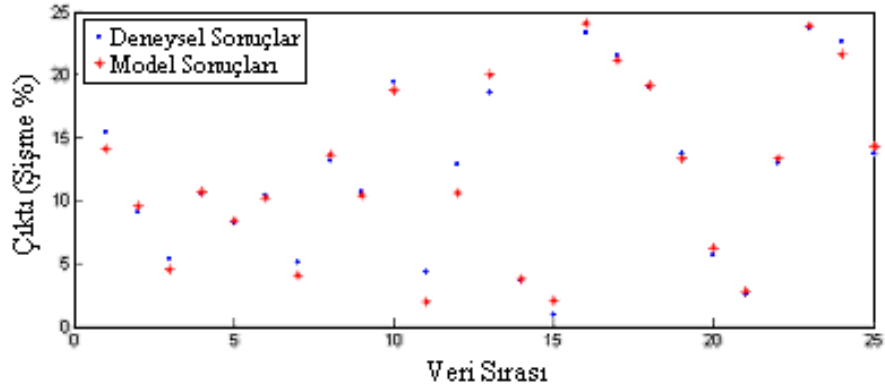


Şekil 4.29. Başlangıç su muhtevası için üyelik fonksiyonu grafiği

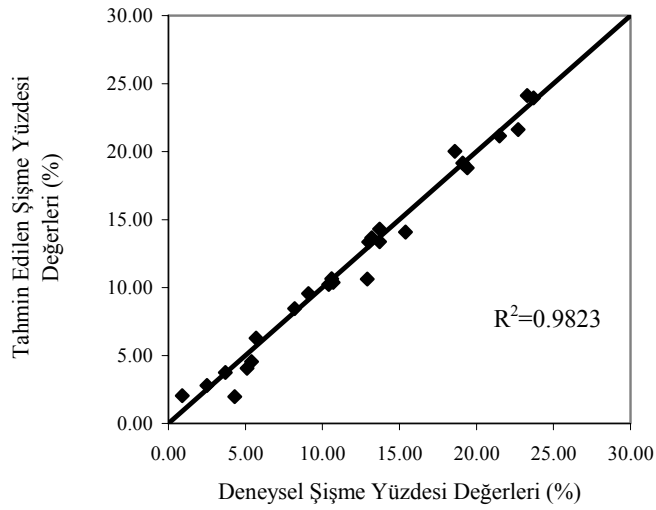
Şekil 4.30.'da Model 1 'in eğitim aşaması için deneysel sonuçlar ve model sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 4.31.'de ise test verileri için modelin bulduğu sonuçlar ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Test aşaması için modelin ortalama hatası % 0.827 olarak belirlenmiştir. Deneysel şişme yüzdesi değerleri ile tahmin edilen şişme yüzdesi değerleri arasındaki ilişkinin determinasyon katsayısı yaklaşık % 98 dir (Şekil 4.32.).



Şekil 4.30. Eğitim aşaması için deneysel sonuçlar ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 1)

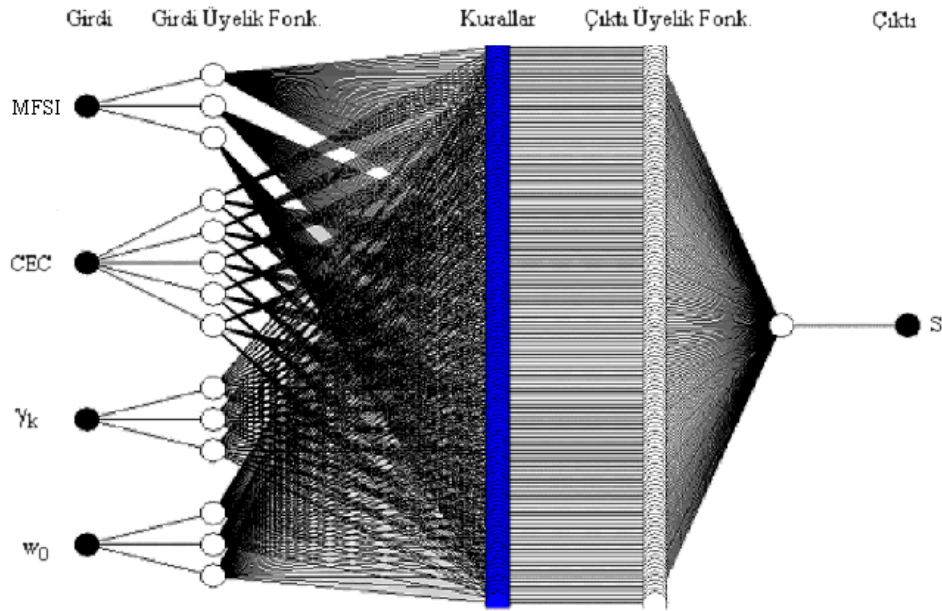


Şekil 4.31. Test aşaması için deneysel sonuçlar ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 1)

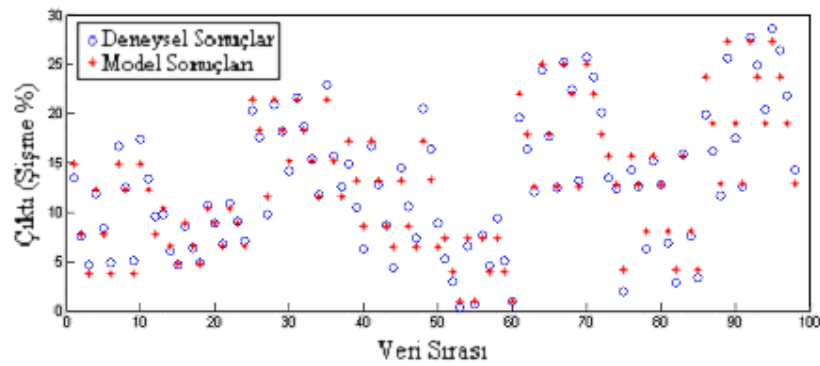


Şekil 4.32. Model sonuçları ile deneysel şişme yüzdesi sonuçları arasındaki ilişki

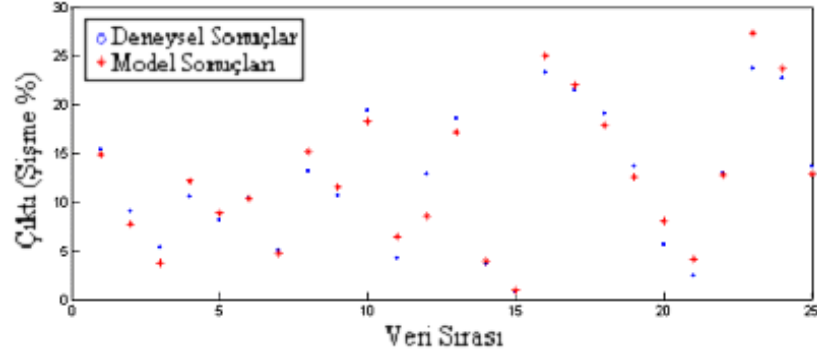
Şişme yüzdesinin tahmin edilmesi amacıyla kurulan Model 2' de girdi parametreleri için modifiye serbest şişme indisi, katyon değiştirme kapasitesi, kuru birim hacim ağırlık ve su muhtevası seçilmiştir (Şekil 4.33.). Eğitim ve test aşamaları için deneysel sonuçlar ile model sonuçları sırasıyla Şekil 4.34. ve 4.35.'te karşılaştırılmıştır. Test aşaması için modelin ortalama hatası % 1.86 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.33. Şişme tahmini amacıyla kurulan Model 2' nin mimarisi

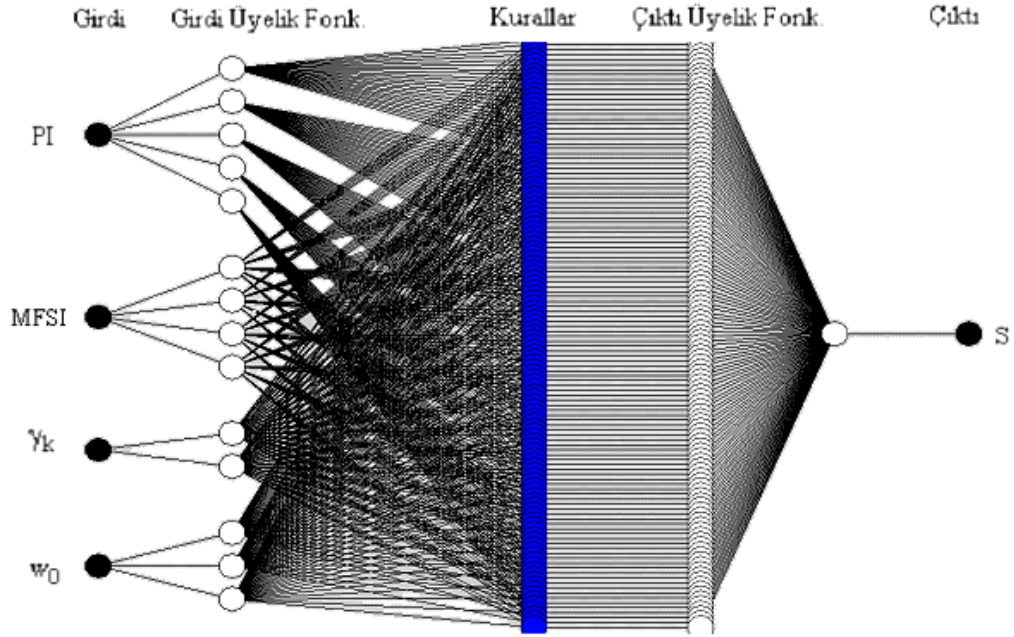


Şekil 4.34. Eğitim aşaması için deneysel sonuçlar ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 2)

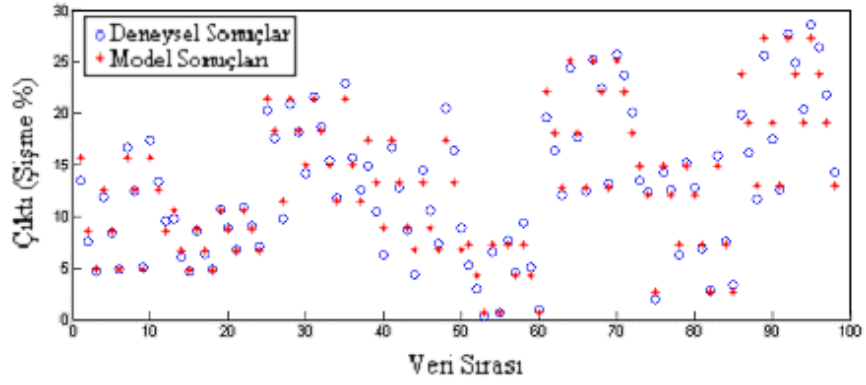


Şekil 4.35. Test aşaması için deneysel sonuçlar ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 2)

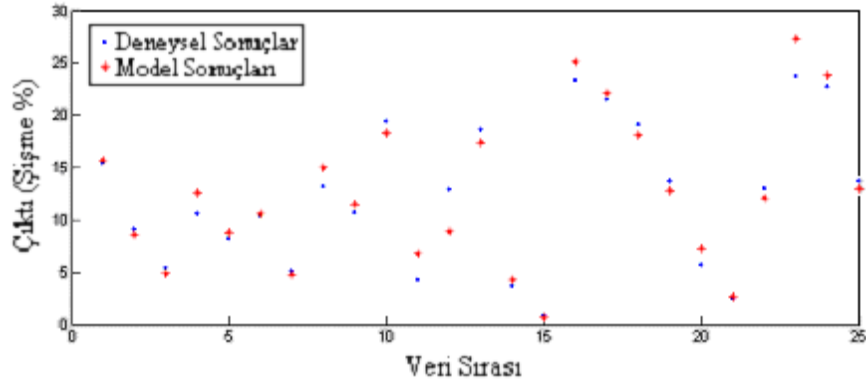
Şişme yüzdesinin tahmin edilmesi için kurulan Model 3' te ise; plastisite indisi, modifiye serbest şişme indisi, kuru birim hacim ağırlık ve su muhtevası girdi parametreleri olarak seçilmiştir. Model 3' ün mimarisi Şekil 4.36.'da görülmektedir. Bu model için eğitim aşamasında kullanılan deney şişme yüzdeleri ve modelin tahmin ettiği şişme yüzdeleri Şekil 4.37.' de karşılaştırılmıştır. Test aşaması için elde edilen sonuçlar ise Şekil 4.38.'de görülmektedir. Test aşaması için modelin ortalama tahmin hatası yaklaşık %1.54 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.36. Şişme tahmini amacıyla kurulan Model 3' ün mimarisi



Şekil 4.37. Eğitim aşaması için deneysel sonuçlar ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 3)



Şekil 4.38. Test aşaması için deneysel sonuçlar ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 3)

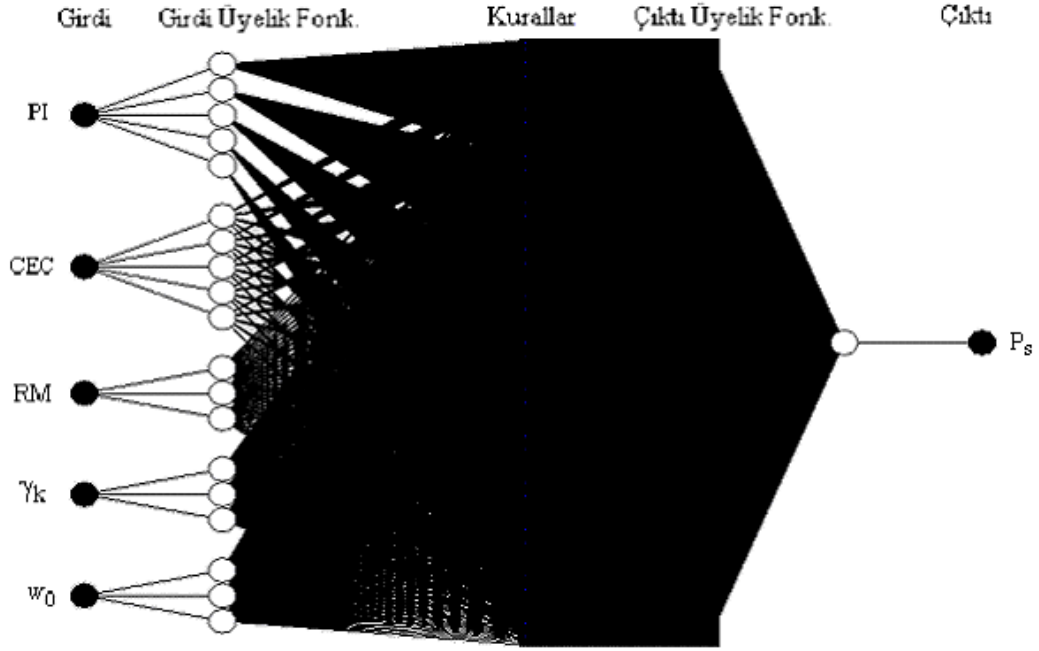
Şişme yüzdesinin tahmin edilmesi amacıyla burada verilenler dışında modeller kurulmuş ancak bu çalışmada üç model örnek olarak verilmiştir. Kurulan modeller içerisinde, deneysel sonuçlara en yakın sonucu verenin Model 1 olduğu gözlenmiştir.

#### 4.4.2. Şişme Basıncının ANFIS ile Tahmin Edilmesi

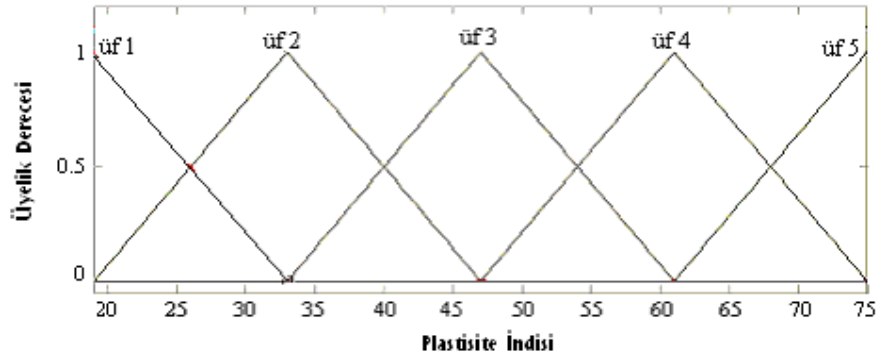
Çalışmada incelenen zeminlerin şişme basınçlarının ANFIS yaklaşımıyla tahmin edilmesi amacıyla kurulan bazı modeller ve tahmin yetenekleri aşağıda verilmiştir. Şişme basıncı tahmini için kurulan Model 1' de girdi parametreleri; plastisite indisi, kation değiştirme kapasitesi, bağıl su muhtevası, başlangıç kuru birim hacim ağırlığı ve başlangıç su muhtevası olarak seçilmiştir. Modelde plastisite indisi ve kation



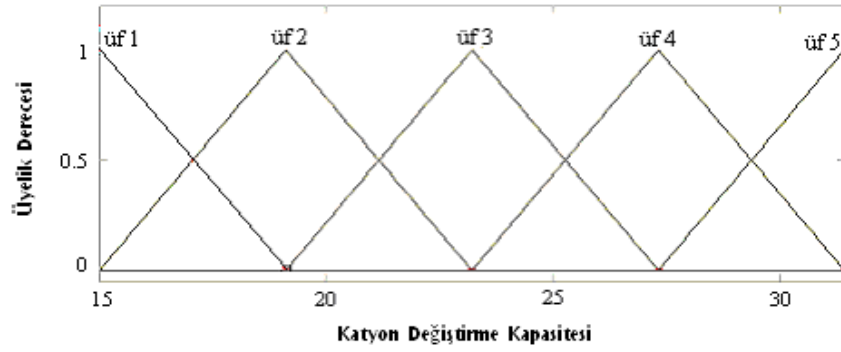
değiştirme kapasitesi değerleri 5 alt kümeye ve diğer girdiler üç alt kümeye ayrılmıştır (Şekil 4.39.). Burada, sadece Model 1' e ait girdiler için üyelik fonksiyonu grafikleri, örnek olarak sunulmuştur (Şekil 4.40. - 4.44.).



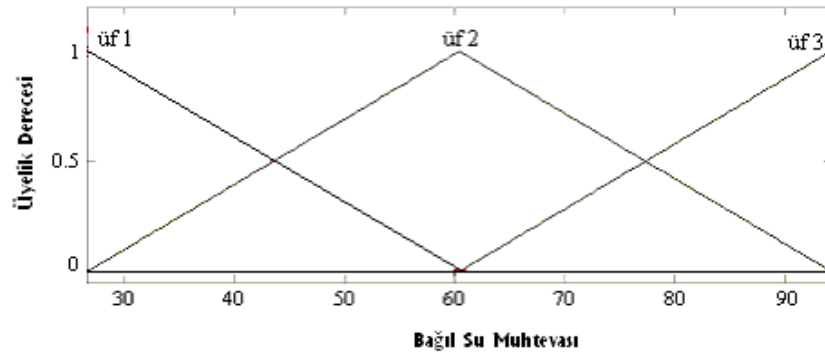
Şekil 4.39. Şişme basıncı tahmini amacıyla kurulan Model 1' in mimarisi



Şekil 4.40. Plastisite indisi için üyelik fonksiyonu grafiği



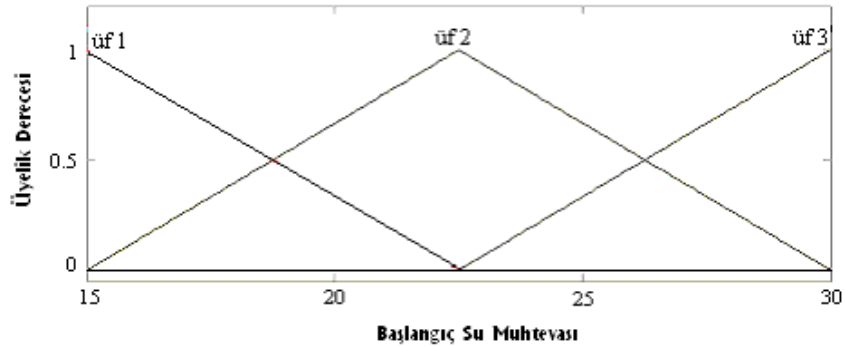
Şekil 4.41. Katyon değiştirme kapasitesi için üyelik fonksiyonu grafiği



Şekil 4.42. Bağıl su muhtevası için üyelik fonksiyonu grafiği

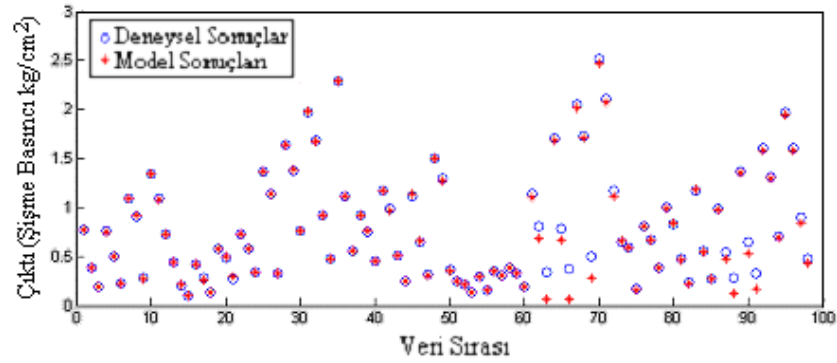


Şekil 4.43. Kuru birim hacim ağırlık için üyelik fonksiyonu grafiği

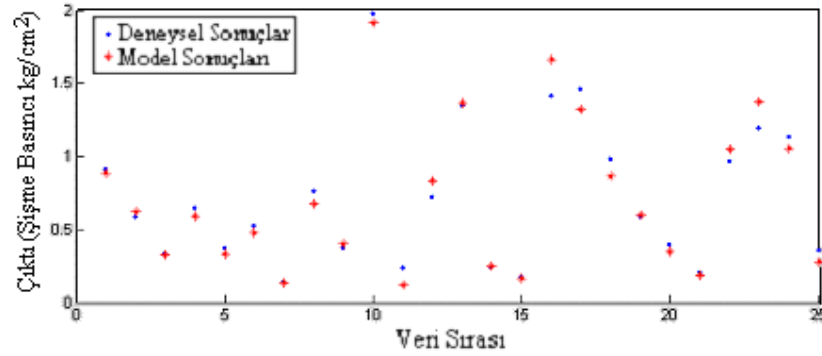


Şekil 4.44. Su muhtevası için üyelik fonksiyonu grafiği

Şişme basıncının tahmin edilmesi amacıyla kurulan Model 1' in eğitim aşaması için; deneylerden elde edilen sonuçlar ile modelden tahmin edilen şişme basınçları değerleri Şekil 4.45.' te karşılaştırılmıştır. Test aşaması için deneysel sonuçlarla model tahminleri arasındaki karşılaştırma ise Şekil 4.46'da verilmiştir. Model 1'in test aşamasındaki ortalama tahmin hatası  $0.089 \text{ kg/cm}^2$  olarak belirlenmiştir.

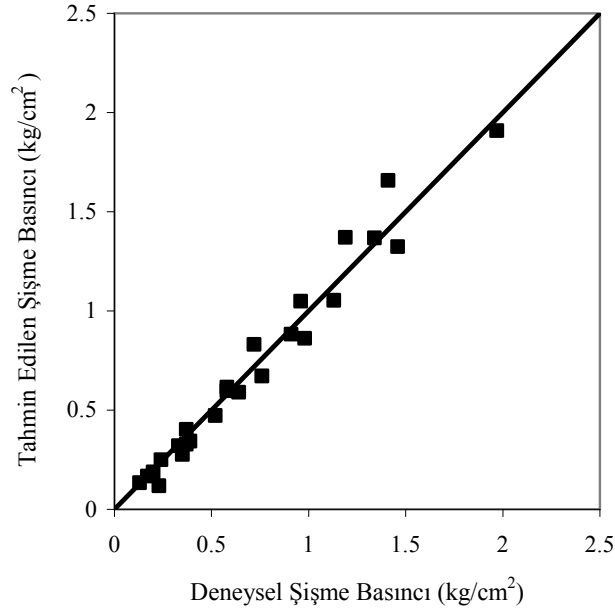


Şekil 4.45. Eğitim aşaması için deneysel şişme basıncı değerleri ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 1)



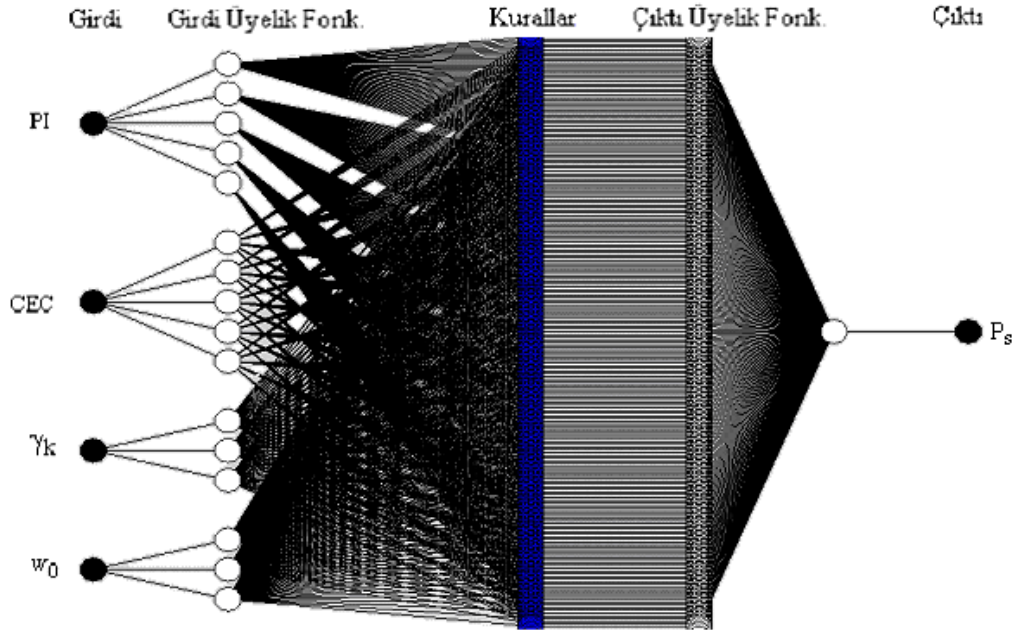
Şekil 4.46. Test aşaması için deneysel şişme basıncı değerleri ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 1)

Şişme basıncı için, modelin tahmin ettiği değerler ile deneysel sonuçlar arasındaki ilişki Şekil 4.47.' de grafik olarak verilmiştir. İlişkinin determinasyon katsayısı yaklaşık % 97 olarak belirlenmiştir.



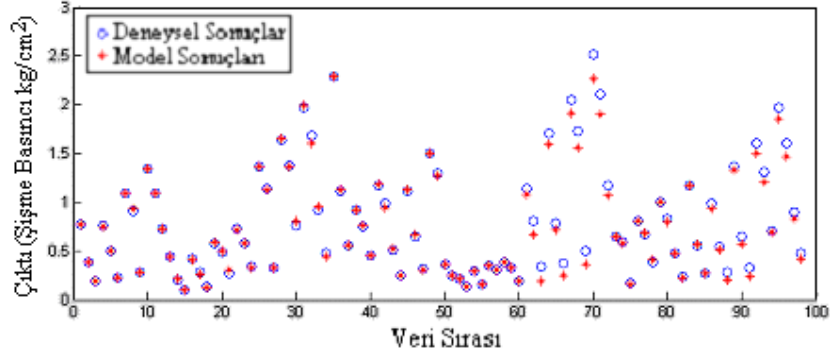
Şekil 4.47. Model sonuçları ile deneysel şişme basıncı sonuçları arasındaki ilişki

Şişme basıncı tahmini için kurulan bir diğer modelin mimarisi Şekil 4.48.' de görülmektedir. Model de plastisite indisi, katyon değiştirme kapasitesi, başlangıç kuru birim hacim ağırlığı ve su muhtevası, girdi parametreleri olarak kullanılmıştır.

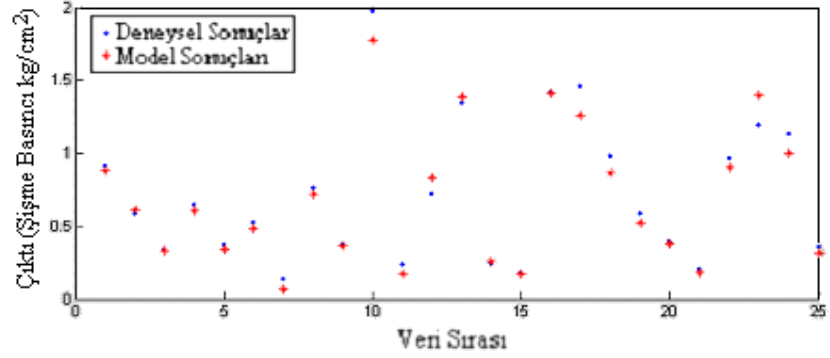


Şekil 4.48. Şişme basıncı tahmini amacıyla kurulan Model 2' nin mimarisi

Şekil 4.49. ve 4.50.' de sırasıyla eğitim ve test aşamalarında, Model 2' nin tahmin ettiği şişme basıncı değerleri ile deneysel şişme basıncı değerleri kıyaslanmıştır. Model 2' nin ortalama test hatası  $0.087 \text{ kg/cm}^2$  olarak belirlenmiştir. Test aşaması için deneysel sonuçlar ile model tahminleri arasındaki ilişkinin determinasyon katsayısı %97 civarındadır.

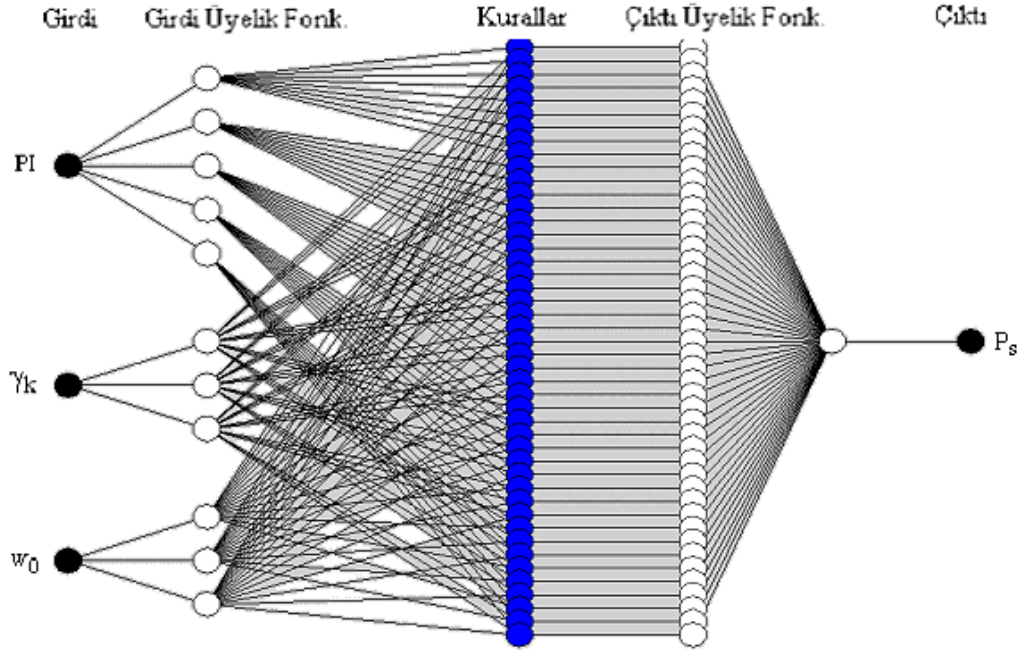


Şekil 4.49. Eğitim aşaması için deneysel şişme basıncı değerleri ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 2)

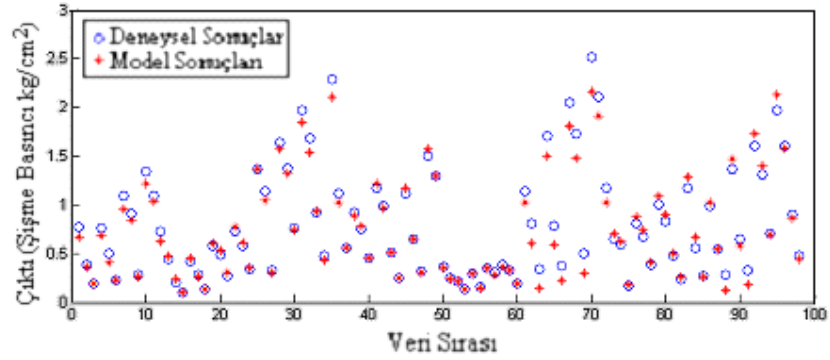


Şekil 4.50. Test aşaması için deneysel şişme basıncı değerleri ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 2)

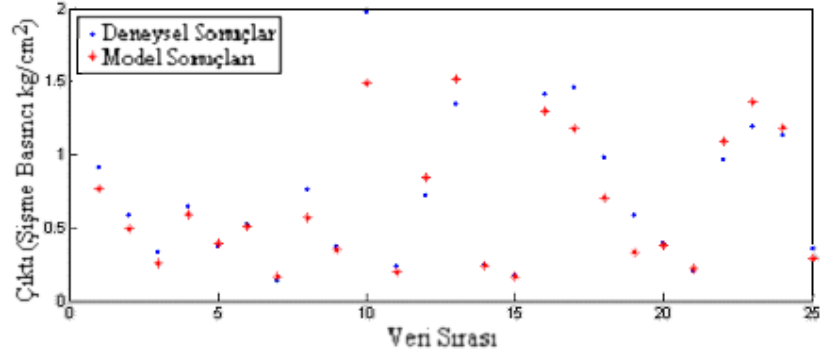
Şişme basıncının sadece plastisite indisi ve başlangıç koşullarına bağlı olarak tahmin edilmesi amacıyla kurulan Model 3 'ün mimarisi Şekil 4.51.'de görülmektedir. Bu modelde, plastisite indisi 5 alt kümeye, diğer girdi parametreleri ise 3 alt kümeye ayrılmıştır. Şekil 4.52.' de Model 3 için eğitim aşamasındaki deneysel şişme basıncı değerleri ile tahmin edilen şişme basıncı değerleri karşılaştırılmıştır. Söz konusu karşılaştırma, test aşaması için Şekil 4.53.' ta görülmektedir. Test aşaması için ortalama tahmin hatası  $0.16 \text{ kg/cm}^2$  olarak belirlenmiştir. Tahmin edilen şişme basınçları ile deneysel şişme basınçları arasındaki ilişkinin determinasyon katsayısı % 90 civarındadır.



Şekil 4.51. Şişme basıncı tahmini amacıyla kurulan Model 3' ün mimarisi

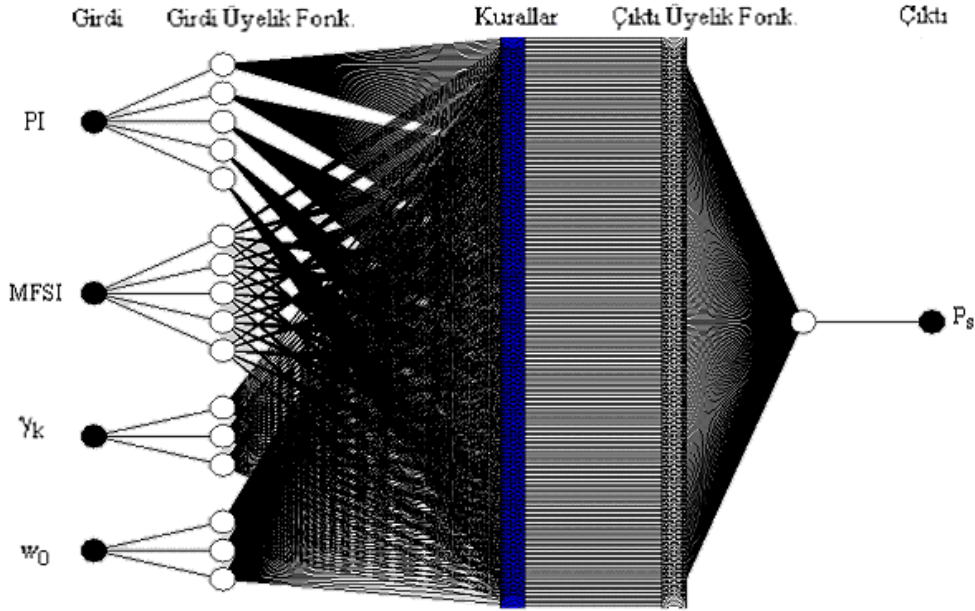


Şekil 4.52. Eğitim aşaması için deneysel şişme basıncı değerleri ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 3)



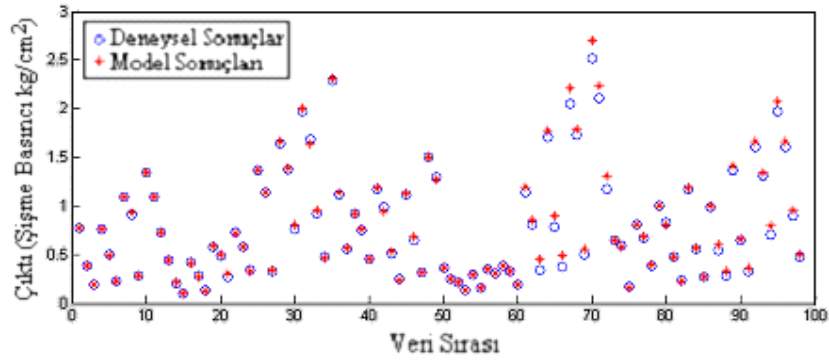
Şekil 4.53. Test aşaması için deneysel şişme basıncı değerleri ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 3)

Model 4'te plastisite indisi, modifiye serbest şişme indisi, kuru birim hacim ağırlık ve su muhtevası girdi parametreleri olarak kullanılmıştır. Plastisite indisi ve modifiye serbest şişme indisi 5 alt kümeye ve diğer girdi parametreleri 3 alt kümeye ayrılmıştır (Şekil 4.54.)

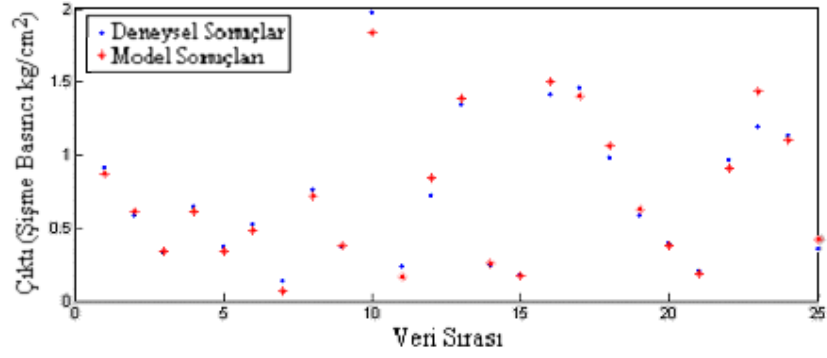


Şekil 4.54. Şişme basıncı tahmini amacıyla kurulan Model 4' ün mimarisi

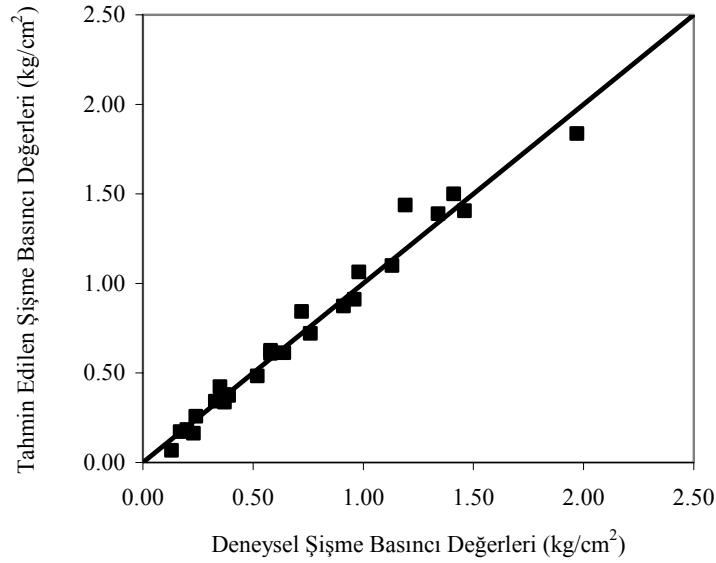
Model 4 için eğitim ve test aşamalarında, deneysel sonuçlar ile tahminler arasındaki karşılaştırmalar sırasıyla Şekil 4.55 ve 4.56' da verilmiştir. Test aşaması için modelin ortalama tahmin hatası  $0.075 \text{ kg/cm}^2$  dir. Test aşamasında tahmin edilen şişme basıncı değerleri ile deneysel şişme basıncı değerleri arasındaki ilişkinin determinasyon katsayısı yaklaşık %98 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.57.).



Şekil 4.55. Eğitim aşaması için deneysel şişme basıncı değerleri ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 4)



Şekil 4.56. Test aşaması için deneysel şişme basıncı değerleri ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 4)



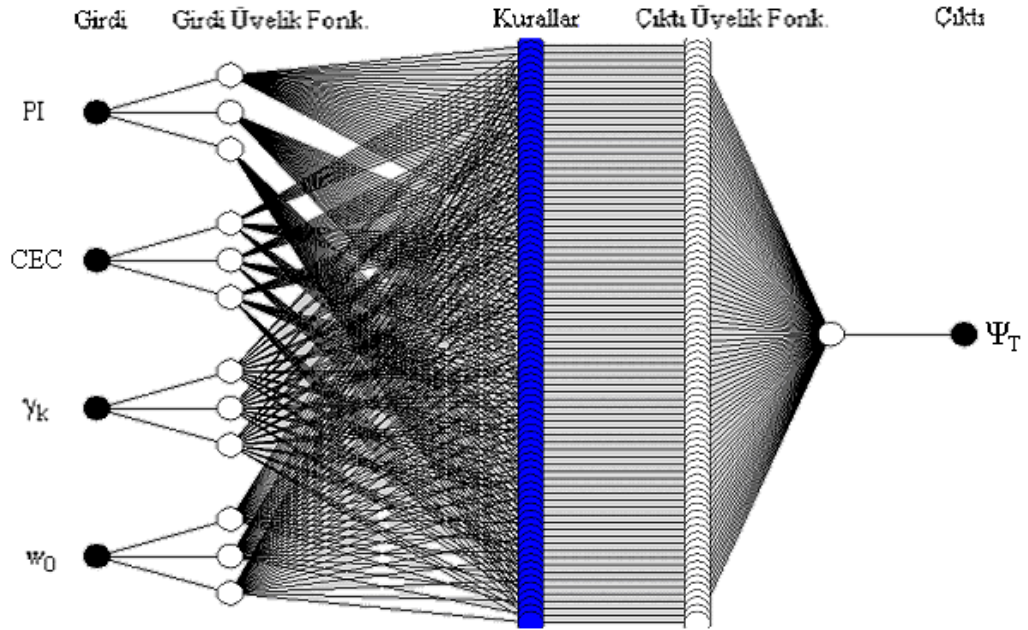
Şekil 4.57. Model 4 tahminleri ile deneysel şişme basıncı sonuçları arasındaki ilişki

Şişme basıncının tahmin edilmesi amacıyla kurulan modeller içerisinde Model 4' ün deneysel sonuçlara en yakın tahmini verdiği görülmektedir. Girdi parametresi olarak, plastisite indisi ve başlangıç koşullarının dikkate alındığı Model 3, diğer modellerle karşılaştırıldığında, deneysel sonuçlara daha uzak tahminler vermiştir. Yani, şişme basıncı tahminlerinde; plastisite indisi yanında zeminin farklı kimyasal ve fiziksel özelliklerini yansıtacak zemin parametrelerinin kullanılmasıyla modellerin tahmin yeteneklerinin arttığı gözlenmiştir.



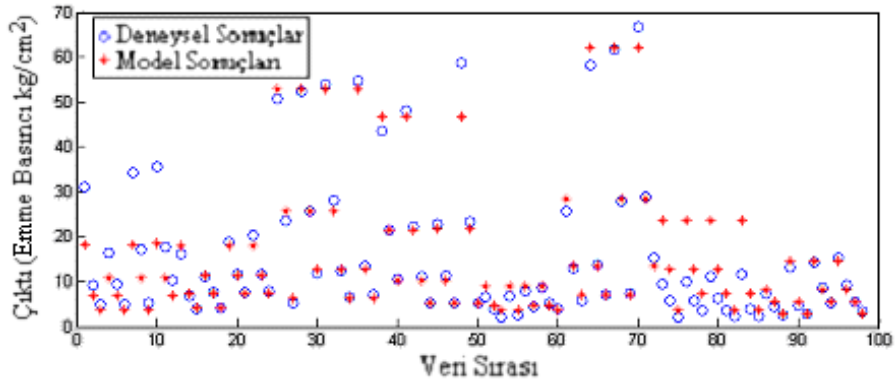
#### 4.4.3. Emme Basıncının ANFIS ile Tahmin Edilmesi

İncelenen zeminlerin emme basınçlarının, bazı zemin özelliklerinden faydalanılarak ANFIS yöntemiyle tahmin edilmesi amacıyla çeşitli modeller kurulmuş; burada örnek olması açısından iki modele yer verilmiştir. Şekil 4.58.'de, plastisite indisi, kation değiştirme kapasitesi, bağlı su muhtevası, başlangıç kuru birim hacim ağırlığı ve başlangıç su muhtevasına bağlı olarak şişme yüzdesinin tahmin edilmesi amacıyla kurulan Model 1' in mimarisi görülmektedir. Her bir girdi değeri, üç alt kümeye ayrılmıştır.

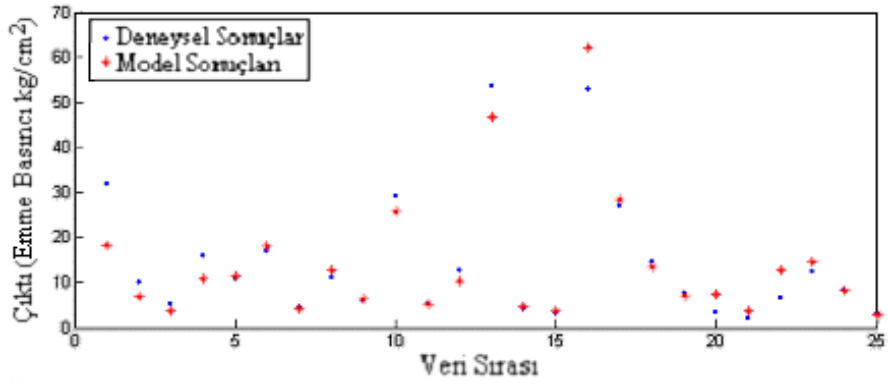


Şekil 4.58. Emme basıncı tahmini amacıyla kurulan Model 1' in mimarisi

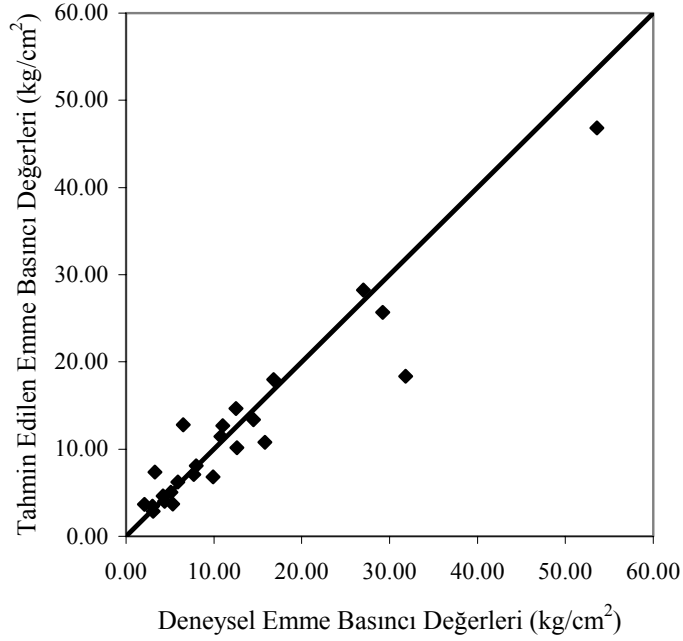
Model 1' in eğitim aşaması için tahmin edilen değerlerle, saykrometre deneylerinden elde edilen toplam emme değerleri Şekil 4.59.' da karşılaştırılmıştır. Test aşaması için söz konusu karşılaştırma Şekil 4.60.' ta görülmektedir. Model 1'in test aşamasındaki ortalama tahmin hatası  $4.18 \text{ kg/cm}^2$  olarak belirlenmiştir. Test aşaması için deneysel sonuçlar ve tahmin edilen emme basınçları arasındaki ilişkinin determinasyon katsayısı %91 civarındadır (Şekil 4.61.)



Şekil 4.59. Eğitim aşaması için deneysel emme basıncı değerleri ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 1)

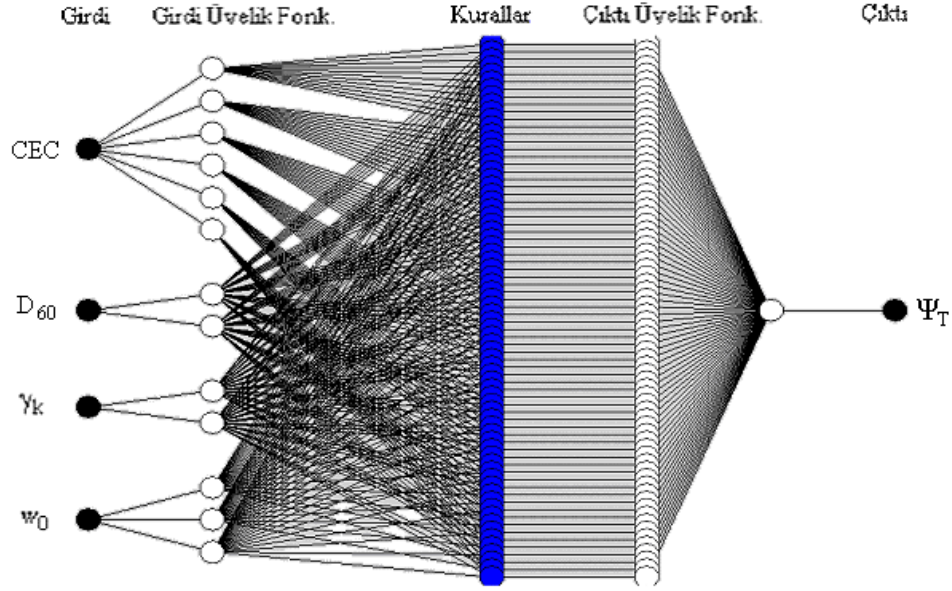


Şekil 4.60. Test aşaması için deneysel emme basıncı değerleri ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 1)



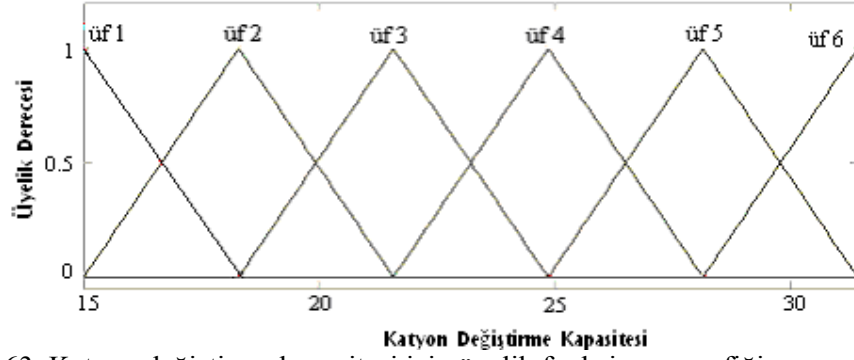
Şekil 4.61. Model 1 tahminleri ile deneysel emme basıncı değerleri arasındaki ilişki

Emme basıncı tahmini için kurulan Model 2’de, katyon değiştirme kapasitesi, numunenin ağırlıkça %60 ’ının sahip olduğu dane apı ( $D_{60}$ ), başlangıç kuru birim hacim ağırlığı ve su muhtevası girdi parametreleri olarak kullanılmıştır. Model 2’ nin mimarisi Şekil 4.62.’de görülmektedir.

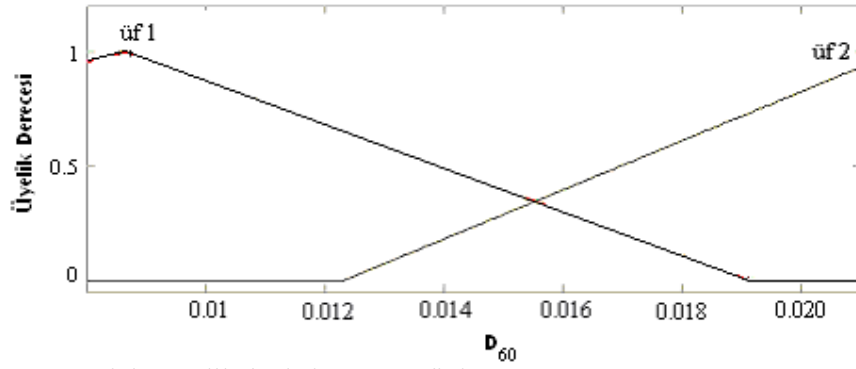


Şekil 4.62. Emme basıncı tahmini amacıyla kurulan Model 2’ nin mimarisi

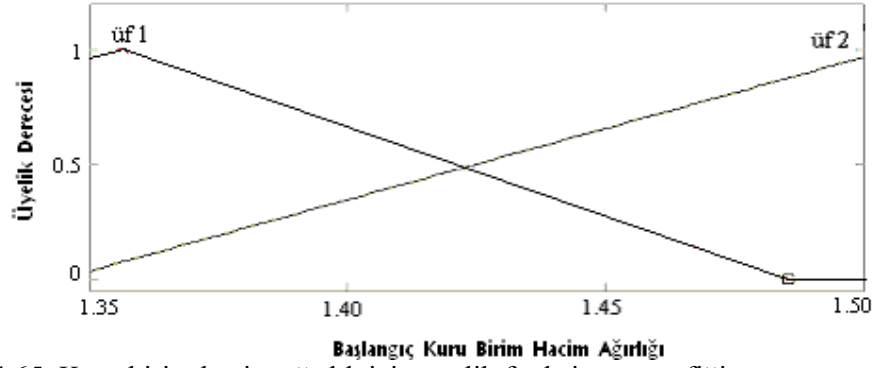
Toplam emme basıncı bilindiği gibi, matris ve ozmotik emme olarak iki bileşenden meydana gelmektedir. Matris emme (kapiler emme) zemin granülometrisinden önemli lde etkilenmektedir. Dolayısıyla, doğru bir emme basıncı tahmini yapılabilmesi için, zeminin mineralojik ve kimyasal özelliklerinin yanı sıra granülometrik karakteristiklerinin de dikkate alınması gerekmektedir. Bentonit katkılı numunelerde plastisite indisi, katyon değiştirme kapasitesi, serbest şişme indisi, emme kapasitesi gibi özelliklerde önemli artışlar meydana gelmektedir. Dolayısıyla şişme yüzdelerinde ve şişme basınclarında benzer artışlar gözlenmektedir. Bununla birlikte, aynı koşullarda emme basınclarındaki artış sınırlı olmaktadır. Bu durumun zemin içerisinde kil olmayan kısmın miktarı ve boyutlarıyla ilişkisi olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle, incelenen zeminlerin emme basınclarının tahmini amacıyla kurulan Model 2 de  $D_{60}$  parametresi girdi olarak kullanılmıştır. Model 2 de dikkate alınan girdi parametrelerinin üyelik fonksiyonu grafikleri Şekil 4.63. – 4.66’ da verilmiştir.



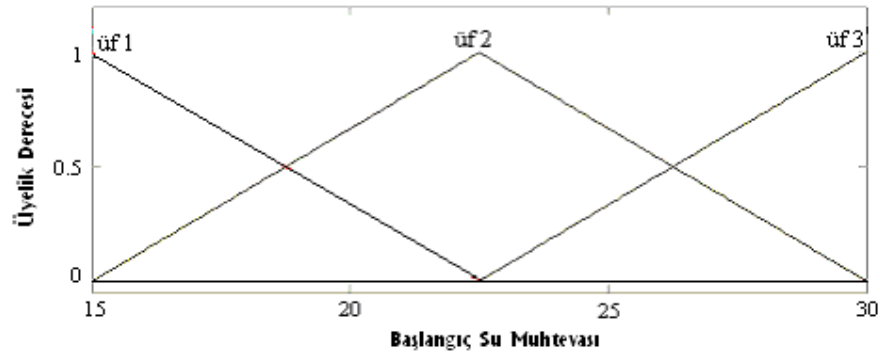
Şekil 4.63. Katyon değiştirme kapasitesi için üyelik fonksiyonu grafiği



Şekil 4.64.  $D_{60}$  için üyelik fonksiyonu grafiği

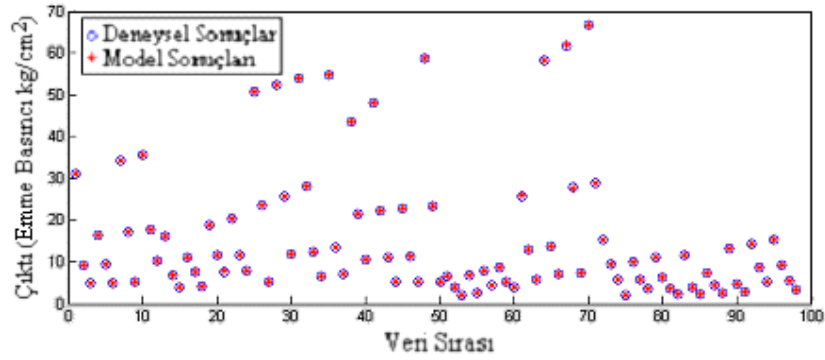


Şekil 4.65. Kuru birim hacim ağırlık için üyelik fonksiyonu grafiği

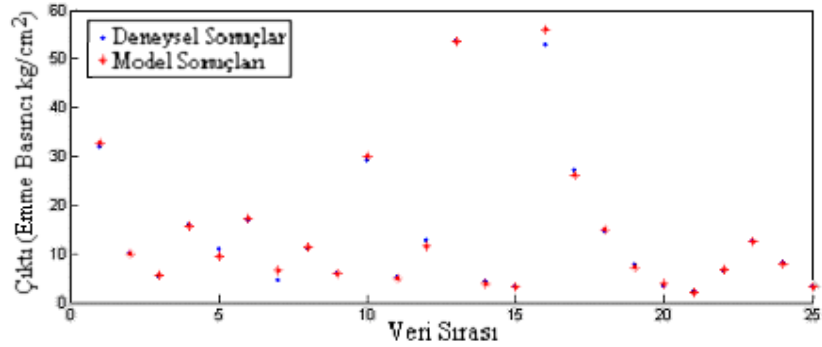


Şekil 4.66. Su muhtevası için üyelik fonksiyonu grafiği

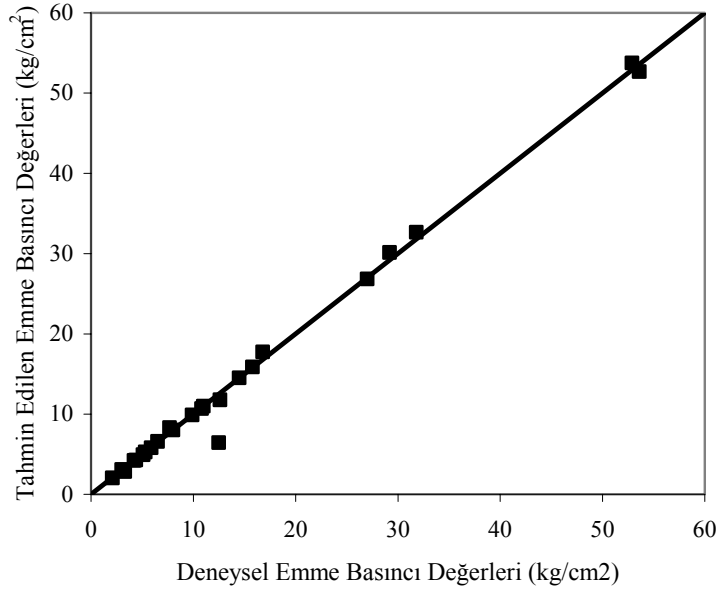
Model 2' nin eğitim aşamasındaki tahmin edilen emme basıncı değerleri ile deneysel emme basıncı değerleri Şekil 4.67.' de karşılaştırılmıştır. Test aşaması için tahmin edilen değerler ile deneysel sonuçlar arasındaki karşılaştırma Şekil 4.68.' de verilmiştir. Model 2' nin test aşamasındaki ortalama tahmin hatası  $0.093 \text{ kg/cm}^2$  olarak belirlenmiştir. Test aşaması için, deneysel sonuçlarla modelin tahmin ettiği emme basınçları arasındaki ilişki Şekil 4.69.' da verilmiştir. İlişkinin determinasyon katsayısı yaklaşık %100 dür.



Şekil 4.67. Eğitim aşaması için deneysel emme basıncı değerleri ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 2)



Şekil 4.68. Test aşaması için deneysel emme basıncı değerleri ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Model 2)



Şekil 4.69. Model 2 tahminleri ile deneysel emme basıncı değerleri arasındaki ilişki

## 5. SONUÇLAR

Şişen zeminlerin ıslanma-kuruma etkilerine maruz kalması durumunda üniform olmayan şişme-büzülme deformasyonları meydana gelmektedir. Bu deformasyonlar, bu tür zeminler üzerine oturan çeşitli mühendislik yapılarında önemli hasarlara neden olmaktadır. Şişen zemin problemi nedeniyle, tüm dünyada ortaya çıkan maddi hasarın boyutu yıllık 10 milyar \$' a ulaşmaktadır. Ülkemizde de bu tür zeminler nedeniyle çeşitli yapılarda hasarlar meydana geldiği bilinmektedir. Bununla birlikte, şişen zemin davranışı ve zemin-yapı etkileşimi, projelendirme ve uygulama aşamasında genellikle göz ardı edilmektedir. Bu tez çalışmasında Ankara, Burdur ve Kütahya yörelerinden alınan 5 farklı doğal zeminin ve bunlara bentonit ilave edilerek elde edilen 3 ayrı zemin örneğinin emme ve şişme davranışları üzerine etki eden zemin özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Modelleme çalışmaları yapılarak; şişme yüzdesi, şişme basıncı ve emme basıncı parametrelerinin tahmin edilmesi amacıyla, uyarlanabilir sinir ağına dayalı bulanık mantık sistemi (ANFIS) kullanılmış; deneysel sonuçlarla model çalışmalarının sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, öncelikle incelenen zeminlerin bazı fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri belirlenmiştir.

Kıvam limitleri, tane boyutu dağılımı, tane birim hacim ağırlığı, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası gibi temel mühendislik özelliklerinin belirlenmesi için, standart zemin mekaniği deneyleri yapılmıştır. Ayrıca, serbest şişme indisi, modifiye serbest şişme indisi gibi parametreler belirlenmiştir. İncelenen zeminlerin, katyon değiştirme kapasitesi analizleri, TÜBİTAK Marmara Araştırma Enstitüsü Kimya Teknolojileri Biriminde, Chapman (1965) yöntemi kullanılarak tayin edilmiştir. Zeminlerin bazı mineralojik karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla, SDÜ Jeotermal Enerji, Yeraltı Suyu ve Mineral Kaynakları Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde, X-ray difraksiyon analizleri yapılmıştır.

Şişme yüzdesi, şişme basıncı ve emme basıncı parametrelerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan zemin numuneleri; farklı başlangıç su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık koşullarında dinamik kompaksiyonla hazırlanmıştır. Bu sayede,

zeminlerin başlangıç koşullarının emme ve şişme davranışları üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Şişme yüzdeleri, ASTM D 4546-B; şişme basınçları ise ASTM D 4546-C yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca, şişme yüzdesi deneyleri sırasında, emme kapasitesi ve bağıl su muhtevası parametreleri belirlenmiştir. Emme basınçlarının belirlenmesinde ısı çift saykrometre tekniği kullanılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda, maddeler halinde özetlenmiştir.

1. Çalışmada kullanılan zemin numuneleri, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre sınıflandırılmıştır. Buna göre, Numune 5, düşük plastisiteli kil (CL); diğer tüm numuneler ise yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfına girmektedir.
2. X-ray difraksiyon analizlerinin sonuçları ASTM indeks kartlarına göre değerlendirilmiştir. Numune 1 ve Numune 2 içerisinde illit – smektit kil mineralleri ile kalsit ve aragonit bulunmaktadır. Numune 3 içerisinde illit-smektit-vermikülit kil mineralleri ile kuvars ve biyotit olduğu belirlenmiştir. Numune 4 içinde montmorillonit, kalsit ve kuvars bulunmaktadır. Numune 5 içerisinde ise montmorillonit, dolomit ve kuvars mineralleri olduğu belirlenmiştir.
3. Aynı kuru birim hacim ağırlığa sahip olacak şekilde hazırlanan zemin numunelerinin su muhtevaları arttıkça şişme yüzdesi, şişme basıncı ve emme basıncı değerleri azalmaktadır. İncelenen zeminler için, şişme yüzdesi – su muhtevası ve şişme basıncı – su muhtevası ilişkilerinin doğrusal, emme basıncı – su muhtevası ilişkisinin ise logaritmik olduğu tespit edilmiştir.
4. Aynı su muhtevasına sahip olacak şekilde hazırlanan zemin numunelerinin kuru birim hacim ağırlıkları arttıkça; şişme yüzdesi, şişme basıncı ve emme basıncı değerleri doğrusal olarak artmaktadır. Yüksek su muhtevalarında, başlangıç kuru birim hacim ağırlığının incelenen parametreler üzerindeki (özellikle emme basıncı üzerindeki) etkisi azalmaktadır.



5. İncelenen zeminler için farklı başlangıç koşullarındaki emme kapasitesi değerleriyle şişme yüzdeleri, şişme basınçları ve emme basınçları arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Bağlı su muhtevası ile bahsedilen parametreler arasında benzer ilişkilerin olduğu gözlenmiştir.
6. İncelenen zeminler için, plastisite indisi ile şişme yüzdesi ve şişme basınçları arasında oldukça güçlü ilişkiler elde edilmiştir. Plastisite indisi ile şişme yüzdesi arasındaki ilişki doğrusal olup, determinasyon katsayısı % 97 dir. Plastisite indisi – şişme basıncı ilişkisi üssel olup, determinasyon katsayısı % 93 olarak belirlenmiştir.
7. Bentonit katkılı numuneler ile diğer numunelerin birlikte dikkate alındığı durumda emme basıncı ile plastisite indisi arasındaki ilişkinin determinasyon katsayısı ( $R^2$ ) %39 olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte, bentonit katkılı numuneler dikkate alınmadan, sadece doğal zeminler için söz konusu ilişkinin determinasyon katsayısı %99' a yükselmiştir.
8. Modifiye serbest şişme indisi (MFSI) ile şişme yüzdesi arasında doğrusal bir ilişki bulunmuştur ( $R^2 = \%82$ ). MFSI ile şişme basıncı arasındaki ilişkinin determinasyon katsayısı yaklaşık %85 tir. Sadece doğal zeminler için MFSI – emme basıncı ilişkisinin determinasyon katsayısı %81 civarındadır.
9. İncelenen zeminler için katyon değiştirme kapasitesi (CEC) ile şişme yüzdesi, şişme basıncı ve emme basıncı arasında doğrusal ilişkilerin olduğu gözlenmiştir. CEC – şişme yüzdesi ilişkisinin determinasyon katsayısı %67; CEC – şişme basıncı ilişkisinin determinasyon katsayısı %85 olarak belirlenmiştir. Doğal zeminlerin emme basınçları ve katyon değiştirme kapasiteleri arasındaki ilişkinin determinasyon katsayısı %73 tür. İncelenen tüm zeminler dikkate alındığında ilişkinin determinasyon katsayısı % 46' ya düşmektedir.

10. Doğal zemin numunelerine bentonit ilave edilmesi sonucunda; plastisite indisi, katyon değiştirme kapasitesi, serbest şişme indisi, emme kapasitesi gibi özelliklerde önemli artışlar meydana gelmektedir. şişme yüzdesinde ve şişme basınçlarında benzer artışlar gözlenmektedir. Bu nedenle bentonit katkılı zeminler ve doğal zeminlerin birlikte dikkate alındığı durumlarda; zeminlerin kimyasal ve fiziksel özellikleri ile şişme yüzdesi ve şişme basıncı arasında kuvvetli ilişkiler elde edilmiştir. Aynı koşullarda emme basınçlarındaki artış ise diğer zemin özelliklerine oranla daha az olmaktadır. Bu nedenle tüm zeminler dikkate alındığında emme basıncı ile diğer zemin özellikleri arasında zayıf bir ilişki olduğu görülmüştür. Bu durumun zemin içerisinde kil olmayan kısmın miktarı ve boyutlarıyla ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır. Çünkü toplam emmenin bileşeni olan matris emme (kapiler emme) zemin granülo metrisinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Dolayısıyla, doğru bir emme basıncı tahmini yapılabilmesi için, zeminin mineralojik ve kimyasal özelliklerinin yanı sıra granülo metrik karakteristiklerinin de dikkate alınması gerekmektedir.

11. şişme yüzdesinin, bazı zemin özelliklerinden faydalanılarak ANFIS yöntemiyle tahmin edilmesi amacıyla çeşitli modeller kurulmuş; deneysel sonuçlara en yakın sonucu verenin Model 1 olduğu gözlenmiştir. Bu modelde, girdi parametreleri olarak plastisite indisi, katyon değiştirme kapasitesi, bağıl su muhtevası, başlangıç kuru birim hacim ağırlığı ve başlangıç su muhtevası kullanılmıştır. Test aşaması için modelin ortalama hatası % 0.827 olarak belirlenmiştir. Deneysel şişme yüzdesi değerleri ile tahmin edilen şişme yüzdesi değerleri arasındaki ilişkinin determinasyon katsayısı yaklaşık % 98 olarak belirlenmiştir.

12. şişme basıncının tahmin edilmesi amacıyla kurulan modellerde; plastisite indisi ve başlangıç koşullarına ilave olarak zeminin farklı fiziksel ve kimyasal özelliklerini yansıtan zemin parametrelerinin girdi olarak kullanılmasıyla, modellerin tahmin yetenekleri artmıştır. şişme basıncının, ANFIS yöntemiyle tahmin edilmesi amacıyla kurulan modeller arasında en uygun sonuç;

plastisite indisi, modifiye serbest şişme indisi, başlangıç kuru birim hacim ağırlığı ve başlangıç su muhtevasının girdi olarak kullanıldığı modelde elde edilmiştir. Modelin test aşamasındaki ortalama tahmin hatası  $0.075 \text{ kg/cm}^2$  dir. Tahmin ettiği değerler ile deneysel sonuçlar arasındaki ilişkinin determinasyon katsayısı yaklaşık % 98 olarak belirlenmiştir.

13. Matris emmenin zemin granülometrisinden önemli ölçüde etkilenmesi nedeniyle; emme basıncının tahmin edilmesi için, plastisite indisi, katyon değiştirme kapasitesi gibi zemin özelliklerinin yanında granülometrik karakteristiklerin dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle, ANFIS yöntemiyle emme basıncının tahmin edilmesinde; katyon değiştirme kapasitesi,  $D_{60}$ , başlangıç kuru birim hacim ağırlık ve başlangıç su muhtevasının girdi parametreleri olarak kullanıldığı model oldukça uygun sonuçlar vermiştir. Modelin test aşamasındaki ortalama tahmin hatası  $0.093 \text{ kg/cm}^2$  dir. Test aşaması için, deneysel sonuçlarla modelin tahmin ettiği emme basınçları arasındaki ilişkinin determinasyon katsayısı yaklaşık %100 olarak belirlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- AASHTO T193, 1993. The California Bearing Ratio. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- Abdullah, W. S., Al-Zou'bi, M.S., Alshibli, K. A., 1997. On the Physicochemical Aspects of Compacted Clay Compressibility, Canadian Geotechnical Journal, 34, 551-559.
- Abdullah, W. S., Alshibli, K. A., Al-Zou'bi, M. S., 1999. Influence of pore water chemistry on the swelling behavior of compacted clays, Applied Clay Science, 15, 447-462.
- Abouleid, A.F., 1985. Foundation on swelling soils. Proceedings, seminar on Foundation Problems in Egypt and Northern Germany, Cairo, 4-43.
- Abraham, A., 2001. Neuro-Fuzzy Systems: State-of-the-Art Modeling Techniques. In Proceedings of the Sixth International Work Conference on Artificial and Natural Neural Networks, IWANN 2001.
- Acar, Y. B., Nyeretse, P., 1992. Total Suction of Artificial Mixtures of Soil Compacted at Optimum Water Content, Geotechnical Testing Journal, 15 (1), 65-73.
- Agus, S.S., Shanz, T., 2005. Comparison of Four Methods for Measuring Total Suction, Vadose Zone Journal, 4, 1087-1095.
- Alawaji, H. A., 1999. Swelling and compressibility characteristics of compacted sand-bentonite mixtures, Geotechnical Engineering Journal, 30 (1), 1-12.
- Allahverdi, N., 2002. Uzman Sistemler – bir yapay zeka uygulaması. Atlas Yayın Dağıtım. İstanbul, 248s.
- Al-Rawas, A. A., Guba, I., McGown, A., 1998. Geological and engineering characteristic of expansive soils and rocks in Northern Oman, Engineering Geology, 50, 267-281.
- Al-Rawas, A. A., 1999. The factors controlling the expansive nature of the soils and rocks of Northern Oman, Engineering Geology, 53, 327-350.
- Al-Rawas, A. A., McGown, A., 1999. Microstructure of Omani expansive soils, Canadian Geotechnical Engineering, 36, 272-290.
- Al-Shamrani, M. A., Dhowian, A.W., 2003. Experimental study of lateral restraint effects on the potential heave of expansive soils, Engineering Geology, 69, 63-81.

- Altmeyer, W. T., 1955. Discussion of Engineering Properties of Expansive Clays, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Testing and Materials*, 81 (2), 17-19.
- Ammann L., 2003. Cation exchange and adsorption on clays and clay minerals. Submitted for the degree Dr. rer. nat. of the faculty of mathematics and natural sciences Christian-Albrechts-Universität Kiel, Germany.
- Anderson, J.U., Elfadil, F.K., O'Conr, G.A., 1973. Factors affecting the coefficient of linear extensibility in Vertisols, *Soil Science Society of American Journal*, 37, 298– 299.
- Andraski, B.,J, Scanlon, B.R., 2002. Thermocouple Psychrometry, *Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods, SSSA Book Series 5*, 1692 p.
- ASTM D 4546-90, 1993. Standard Test Method for One-Dimensional Swell or Settlement Percent of Cohesive Soils, *Annual Book of ASTM Standards*, 04.08, 853-859.
- ASTM D 4829-88, 1993. Standard Test Method for Expansion Index of Soils, *Annual Book of ASTM Standards*, 04.08, 1082-1085.
- Azam, S., Abduljawwad, S. N., Al-Shayea, N. A., Al-Amoudi, O. S. B., 1998. Expansive characteristics of gypsiferous / anhydritic soil formations, *Engineering Geology*, 51, 89-107.
- Azam, S., Abduljawwad, S.N., Al-Shayea, N.A., and Baghabra, T., Al-Amoudi, O.S.B., 2000. Effect of calcium sulfafate on swelling potential of an expansive clay, *Geotechnical Testing Journal*, 23(4), 389-403.
- Azam, S., 2003. Influence of mineralogy on swelling and consolidation of soils in eastern Saudi Arabia, *Canadian Geotechnical Journal*, 40, 964-975.
- Babuska, R., 1998. *Fuzzy Modeling for Control*, Kluwer Academic Publisher.
- Barbour, S.L. 1998. The soil-water characteristic curve: a historical perspective Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium, *Canadian Geotechnical Journal*, 35 (5), 873-894.
- Basma, A. A., 1993. Prediction of expansion degree for natural compacted clays, *Geotechnical Testing Journal*, 16 (4), 542-549.
- Basma, A. A., Al-Sharif, M., 1994. Treatment of expansive soils to control swelling, *Geotechnical Engineering*, 25 (1), 3-18.
- Bjerrum, L., Lo, K.Y., 1963. Effects of aging on the shear strength properties of a normally-consolidated clay, *Geotechnique*, 13 (2), 147-157.

- Bolt, G. 1956. Physico-chemical analysis of the compressibility of pure clays. *Geotechnique*, 6, 920–934.
- Borchardt, G. 1989. Smectites, *Minerals in soil environments*, 2nd ed., Soil Sci. Soc. Am. Book Ser., No 1, Madison, 675-727.
- Brackley, I.J.A., 1973. Swell pressure and free swell in a compacted clay, *Proceedings of 3rd International Conference on Expansive Clay*, Haifa, Israel, Vol. 1, 169-176.
- Bradbury, M. H., Baeyens, B., 2003. Porewater chemistry in compacted re-saturated MX80 Bentonite, *Journal of Contaminant Hydrology*, 61, 329-338.
- Brewer, R., 1964, *Fabric and Mineral Analysis of Soils*: New York, John Wiley & Sons.
- Briaud, J. L., Zhang, X., Moon, S., 2003. Shrink test-water content method for shrink and swell predictions, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129 (7), 590-600.
- Bulut, R., Park, S.W., Lytton, R.L., 2000. A new matric suction calibration curve, *Proc. Asian Conference on Unsaturated Soils*, Singapore, 263-268.
- Bulut, R., Lytton, R.L., Wray, W.K., 2001. Soil Suction Measurements by Filter Paper, in *Expansive Clay Soils and Vegetative Influence on Shallow Foundations*, *Geotechnical Special Publication No.115*, ASCE, 243-279.
- Bulut, R., Leong, E.C. 2005 .State-of-the-Art Report on Indirect Measurement of Soil Suction, *International Symposium Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics*, Trento, Italy. [www.experus2005.ing.unitn.it/2\\_Bulut\\_Leong.pdf](http://www.experus2005.ing.unitn.it/2_Bulut_Leong.pdf)
- Cerato, A. B., Lutenecker, A. G., 2002. Determination of Surface Area of Fine Grained Soils by the Ethylene Glycol Methyl Ether EGME Method, *Geotechnical Testing Journal*, 25 (3), 1-9.
- Chabrilat, S., Goetz, A. F. E., Olsen, H. W., Krosley, L., D. C., 2000. The Search for Swelling Clays Along the Colorado Front Range: Results from field spectrometry and hyperspectral imagery, *Summaries of the 9th JPL Airborne Earth Science Workshop*, Pasadena, USA, JPL Publication.
- Chapman, H.D., 1965. *Methods of soil analysis Part 2, Chemical microbiological properties*, Amer. Soc. of Agron. Inc. Publ. Agron. Series, No. 9, Medison, Wis, USA.
- Chen, F. H., 1965. *Engineering Effects of Moisture Change in Soils*, *Concluding Proceedings International Research and engineering Conference on Expansive Clay Soils*. Texas A & M Press.

- Chen, F. H., 1988. *Foundation Expansive Soils*, 2nd ed. New York, Elsevier Scientific Pub. Co., 280p.
- Chen, F. H., Ma, G.S., 1987. Swelling and Shrinking Behaviour of Expansive Clays, 6th International Conference on Expansive Soils, New Delhi, India, 127-129.
- Cho, W. J., Lee, J. O., Kong, C. H., 2000. Influence of Temperature Elevation on the Sealing Performance of a Potential Buffer Material for a High – Level Radioactive Waste Repository, *Annals of Nuclear Energy*, 27, 1271-1284.
- Chu, T.Y., Mou, C.H., 1973. Volume change characteristics of expansive soils determined by controlled suction tests, *Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Soils*, Haifa, Israel, 177-185.
- Churchman, G. J., Askary, M, Peter, P., Wright, M., Raven, M. D., Self, P. G., 2002. Geotechnical properties indicating environmental uses for an unusual Australian bentonite, *Applied Clay Science*, 20, 199-209.
- Çokça, E., 1993. Metilen Mavisi Deneyi ile Killerin Katyon Değişim Kapasitelerinin Tespiti, VI. Ulusal Kil Sempozyumu, 335- 344.
- Çokça, E., Birand, A., 1993. Determination of Cation Exchange Capacity of Clayey Soils by the Methylene Blue Test, *Geotechnical Testing Journal*, 16 (4), 518-524.
- Çokça, E., 2002. Relationship between Methylene Blue Value, Initial Soil Suction and Swell Percent of Expansive Soils, *Turkish J. Eng. Env. Sci.* 26, 521- 529.
- Dakshnamurthy, V., Raman, V., 1973. A simple method of identifying expansive soil, *Soils and Foundations*, 13 (1), 97-104.
- Dakshnamurthy, V., 1978. A new method to predict swelling using a hyperbolic equation, *Geotechnical Engineering*, 9 (1), 29-38.
- Das, B. M., 1995. *Principles of Foundation. Engineering*. PWS Publishing Company, Boston, U.SA, 828 p.
- Day, R. W., 1992. Swell versus Saturation for Compacted Clay, *Journal of Geotechnical Engineering*, 118 (8), 1272-1278.
- Day RW., 1994. Shrink-swell behavior of compacted clay. *ournal of Geotechnical Engineering*, 120 (3) 618–623.
- Di Maio, C., 1996. Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effects, *Geotechnique*, 46 (4), 695–707.
- Dif, A. E., Bluemel, W. F., 1991. Expansive soils under cyclic drying and wetting, *Geotechnical Testing Journal*, 14 (1), 96-102.

- Dontsova K.M., Norton, L.D., Johnston, C.T., Bigham, J.M., 2004. Influence of Exchangeable Cations on Water Adsorption by Soil Clays, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68, 1218-1227.
- Dos Santos, M.P.P. and De Castro, E., 1965. Soil Erosion in Roads, *Proceedings of the 6 International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol 1, 116-118.
- Du, Y., Li, S., Hayashi, S., 1999. Swelling- shrinkage properties and soil improvement of compacted expansive soil, Ning-Liang Highway, China, *Engineering Geology*, 53, 351-358.
- Edil, T.B. and Motan, S.E., 1984. Laboratory Evaluation of Soil Suction Components, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 7 (4), 173-181.
- Edlefsen, N.E. and Anderson, A.B.C. 1943. *Thermodynamics of Soil Moisture*, Hilgardia, 15, 31-298.
- El-Sayed, S. T., Rabbaa, S. A., 1986. Factors affecting behaviour of expansive soils in the laboratory and field – a review, *Geotechnical Engineering*, 17 (1), 89-107.
- El-Sohby, M.A., 1981. Activity of soils, *Proceedings 10th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Sweden.
- El-Sohby, M. A., Rabba, E. A., 1981. Some factors affecting of clayey soils, *Geotechnical Engineering*, 12 (1), 19-39.
- El-Sohby, M. A., Mazen, O., 1983. Mineralogy and swelling of expansive clayey soils, *Geotechnical Engineering*, 14 (1), 79-87.
- Emerson, W.W., 1964. The slaking of soil crumbs as influenced by clay mineral composition, *Australian Journal of Soil Research*, 2, 211-217.
- Entwisle, D., Kemp, S., 2003. Specific Surface Area: An Aid to Identify Some Problem Soils, *International Conference on Poblematic Soils*, Nottingham, United Kingdom. 235-242.
- Erol, O., Dhowian, A., 1990. Swell behavior of arid climate shales from Saudi Arabia, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 23, 243-254.
- Erzin, Y., Erol, O. 2004. Correlations for Quick Prediction of Swell Pressures, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*.
- Feng, M., 1995. A study of swelling pressure using various laboratory testing methods, *Research Report*, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.



- Fityus, S., Smith, D.W., 2000. The Influence of Fabric and Mineralogy on the Expansivity of an Australian Residual Clay, *Unsaturated Soils for Asia*, 657-662.
- Fityus, S., Smith, D.W., Jennar, A.M., 2000. Surface Area Using Methylene Blue Adsorption as a Measure of Soil Expansivity, *Geo2000 Conference* on CD, Australia.
- Fredlund, D.G., Hasan, J.U., Filson, H., 1980. The prediction of total heave, *Proceedings of 4th International Conference on Expansive Soils*, Denver, Colorado, Vol.1, 1- 17.
- Fredlund, D.G. & Rahardjo, H., 1993. *Soil Mechanics for unsaturated soils*, John Willey & Sons, New York.
- Fredlund, D.G., Xing, A., 1994. Equations for the soil-water characteristic curve, *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 521-532.
- Gajo A., Loret B., 2003. Finite element simulations of chemo-mechanical coupling in elastic-plastic homoionic expansive clays, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 192, 3489-3530.
- Gens, A. and Alonso, E.E., 1992. A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays, *Canadian Geotechnical Journal*, 29, 1013-1032.
- Gilchrist, H.G., 1963. A study of volume change of a highly plastic clay, M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 215 p.
- Grabowska-Olszewska, B. 1970. Physical Properties of Clay Soils as a Function of Their Specific Surface, *Proceedings of the 1st International Congress of the International Association of Engineering Geology*, Vol. 1, 405-410.
- Gray, C.W., Allbrook, R., 2002. Relationships between shrinkage indices and soil properties in some New Zealand soils, *Geoderma*, 108, 287-299.
- Grim, R.E., 1962. *Applied Clay Mineralogy*. McGraw Hill Book Co. NewYork, 422p.
- Grim, R.E., 1968. *Clay Mineralogy*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 596 p.
- Gromko, G.J., 1974. Review of expansive soils, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 100 (6), 667-687.
- Guan, Y., 1996. The Measurement of Soil Suction, Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 331 p.

- Hanafy, E.A.D.E., 1991. Swelling / Shrinkage Characteristics Curve of Desiccated Expansive Clays, *Geotechnical Testing Journal*, 14 (2), 206-211.
- Hanafy, E.A.D.E., 1999. Relative moisture and moisture deficiency of desiccated expansive cohesive soil deposits, *Geotechnical Testing Journal*, 22 (4), 334-342.
- Hang, P.T. and Brindley, G.W., 1970. Methylene Blue Absorption by Clay Minerals. Determination of Surface Areas and Cation Exchange Capacities. *Clays and Clay Minerals*, 18, 203-212.
- Hardcastle, J.H., 2003. Evaluation and treatment of. expansive volcanic soils. US95, Owyhee County, Idaho. Final Report.
- Head, K H., 1992, *Manual of Soil Laboratory Testing*, I, Soil Classification and Compaction Tests, Pentech Press London.
- Himer, Z., Kovács, J., Benyó, I., Kortela, U., 2004. Neuro- fuzzy modeling and genetic algorithms optimization for flue gas oxygen control, 2nd IFAC Workshop on Advanced Fuzzy/Neural Control, University of Oulu.
- Holt, J.H., 1969, A study of physicochemical, mineralogical and engineering index properties of fine grained soils in relation to their expansive characteristics, Ph.D. Dissertation, Texas A&M Univ., College Station, TX, USA.
- Holtz, W. G., Gibbs, H. J., 1956. Engineering Properties of Expansive Clays, *ASCE Transactions*, 121, 641-663.
- Holtz, R.D., Kovacs, W.D., 1981. *An Introduction to Geotechnical Engineering*, Prentice Hall, New Jersey, 733 p.
- Huang, S., 1994. Evaluation and Laboratory Measurement of the Coefficient of Permeability in Deformable Unsaturated Soils, Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 317 p.
- Indian Standards, IS 2720, 1977. Methods of test for soils: Part 40 Determination of free swell index of soils.
- Ingles, O.G., 1968. *Soil Chemistry Relevant to the Engineering Behaviour of Soils*. *Soil Mechanics Selected Topics*, Elsevier, NewYork , 1-57.
- International Conference of Building Officials UBC, 1991. *Uniform Building Code*. Whittier, CA, 1050 p.
- Jang, J. –S. R., Sun, C., -T, Mizutani, E., 1997. *Neuro – Fuzzy and Soft Computin*, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 614 p.

- Jones, D. E., Holtz, W. G., 1973. Expansive Soils-The Hidden Disaster, Civil Engineering-ASCE, 49-51.
- Jullien, A., Proust, Ch., Le Forestier, L., Baillif, P., 2002. Hydro-chemio-mechanical coupling effects on permeability and swelling behaviour of a Ca smectite soaked by Cu solutions, Applied Clay Science, 21 (3-4), 143-153.
- Justo, J.L., Delgado, A., Ruiz, J., 1984. The influence of stress-path in the collapse swelling of soils at the laboratory, Proceedings of the 5th International Conference on Expansive Soils. Adelaide, South Australia, 67-71.
- Kaczyński, R., Grabowska-Olszewska, B., 1997. Soil mechanics of potentially expansive clays in Poland, Applied Clay Science, 11, 337-355.
- Karathanasis, A.D., Hajek, B.F., 1985. Shrink– swell potential of montmorillonitic soils in udic moisture regimes, Soil Sci. Soc. Am. J., 49, 159 – 166.
- Kariuki, P.C., T. Woldai, van der Meer, F. D., 2002. Determination of Soil Activity in Kenyan Soils from Spectroscopy, Proceedings of the Joint ISPRS Commission VI Workshop: Development and Techlogy Transfer in Geomatics for Environmental Resource Management, Tanzania, 50-53.
- Kariuki, P. C., Van der Meer, F., 2003a. Issues of effectiveness in empirical methods for describing swelling soils, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 4, 231-241.
- Kariuki, P.C., Van der Meer F. D., 2003b. Swelling Clay Mapping For Characterizing Expansive Soils; Results from Laboratory Spectroscopy and HySens DAIS Analysis, Proceedings of the Third EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, DLR, Oberpfaffenhofen.
- Kariuki P.C., Van Der Meer F., Siderius, W., 2003. Classification Of Soils Based On Engineering Indices And Spectral Data, Int. J. Remote Sensing, 24 (12), 2567–2574.
- Kariuki, P. C., Van der Meer, F., 2004. A unified swelling potential index for expansive soils, Engineering Geology, Vol 72 (1-2), 1-8.
- Kassif, G., Baker, R., 1971. Aging effects on swell potential of compacted clay. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 97 (3), 529-540.
- Keller, W. D., 1964. The origin of high-alumina clay minerals, Proceedings of the 12th National Conference on Clays and Clay Minerals, Macmillan Company, New York, 129-151.

- Keren, R. and I. Shainberg. 1975. Water vapor isotherms and heat of immersion of Na-Ca montmorillonite systems, I. Homoionic clay, *Clays and Clay Minerals*, 23, 193-200.
- Keskin, S.N., Yıldırım, H., Ansal, M.A., 1992. Killi zeminlerde yanal şişme davranışları, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi*, İstanbul, 14-30.
- Keskin, S.N., 1993. İstanbul neojen kilininin şişme davranışına, ön konsolidasyonun, mineralojik özelliklerin ve çevresel faktörlerin etkisi, *Doktora Tezi*, İTÜ, Fenbilimleri Enstitüsü, 152 p.
- Keskin, S.N., Yıldırım, H., Göksan, T.S., 1999. Sıkıştırılmış killi zeminlerde su emme kapasitesinin ve şişme basıncının tahmini için bir yöntem, *Teknik Dergi*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 10 (2), 1925-1939.
- Komine, H., Ogata, N., 1994. Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite, *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 478-490.
- Komine, H., Ogata, N., 1996. Prediction for swelling characteristics of compacted bentonite, *Canadian Geotechnical Journal*, 33, 11-22.
- Komornik, A. and D. David, 1969. Prediction of swelling pressure of clays, *Journal of SMFE Div., ASCE*, 95 (1), 209-225.
- Krahn, J., Fredlund, D.G., 1972. On Total Matric and Osmotic Suction, *Journal of Soil Science*, 114 (5), 339-348.
- Leong, E. C., Tripathy, S., Rahardjo, H., 2003. Total Suction Measurement of Unsaturated Soils with a Device Using the Chilled-Mirror Dew-Point Technique, *Geotechnique*, 53 (2), 173-182.
- Likos, W. J., Lu, N., 2003. Filter Paper Column for Measuring Transient Suction Profiles in Expansive Clay, *TRB 2003 Annual Meeting CD-ROM*. [http://www.ltrc.lsu.edu/TRB\\_82/TRB2003-000509.pdf](http://www.ltrc.lsu.edu/TRB_82/TRB2003-000509.pdf)
- Low, P.F. and J.F. Margheim. 1979. The swelling of clay: I. Basic concepts and empirical equations, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43, 473-481.
- Low, P.F., 1980. The Swelling of Clay: II. Montmorillonite, *Soil Science Society of America Journal*, 44 (4), 667-676.
- Low, P.F. 1981. The swelling of clay: III. Dissociation of exchangeable cations, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45, 1074-1078.
- Low, P.F., 1987. Structural components of the swelling pressure of clays, *Langmuir*, 3, 18-25.

- Low, P.F., 1992. Interparticle forces in clay suspensions: flocculation, viscous flow and swelling, Proceedings of the 1989 Clay Minerals Society Workshop on the Rheology of Clay/Water Systems.
- Luckham, P.F. and S. Rossi., 1999. The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions, *Adv. Coll. Int. Sci.* 82, 43 - 92.
- Lutenecker, A. J., Cerato, A. B., 2001. Surface area and engineering properties of fine-grained soils, Proc. 15th ICSMGE, Istanbul, Turkey, Vol. 1, 603-606.
- Ma, C.M., Hueckel, T., 1992. Effects of inter-phase mass transfer in heated clays: a mixture theory, *International Journal of Engineering Science*, 30 (11), 1567-1582.
- Matyas, E.L., 1969. Some properties of two expansive clays from western Canada, Proc. 2nd International Conference on Expansive Clay Soils, Texas A&M University, College Station, 263-278.
- McBride, M.B. 1989. Surface chemistry of soil minerals, *Minerals in soil environments*, 2nd ed, Soil Sci. Soc. Am. Book Ser, No. 1, Madison, WI. 35-88.
- McCormack, D.E., Wilding, L.P., 1975. Soil properties influencing swelling in Canfield and Geeburg soils, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 39, 496-502.
- McKeen, R.G., Hamberg, D.J., 1981. Characterization of expansive soils, *Transportation Research Record*, No. 790, Transportation Research Board, USA, 73- 78.
- McKeen, R.G., 1992. A Model for predicting expansive soil behavior, Proceedings of the 7th International Conference on Expansive Soils, Dallas, Texas, ASCE, New York, 1 -6.
- Mesri, G., and Olson, R.E., 1971. Mechanisms controlling the permeability of clays, *Clays and Clay Minerals*, 19, 151 - 158.
- Mitchell, J.K., 1976. *Fundamentals of Soil Behavior*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 422p.
- Mohan, D., Jain, G. S., and Sharma, D., 1973. Foundation Practice in Expansive Soils in India, Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Soils, Haifa, Israel, 125-132.
- Montes-H, G., Duplay, J., Martinez, L., Geraud, Y., Rousset-Tournier, B., 2003. Influence of interlayer cations on the water sorption and swelling-shrinkage of MX80 bentonite, *Applied Clay Science*, 23, 309-321.

- Morgenstern, N.R. and Balasubramanian, B.I., 1980. Effects of Pore Fluid on the Swelling of Clay-Shale, Proceedings of the 4th International Conference on Expansive Soils, Vol.1, 190-205.
- Mowafy, Y.M., Bauer, G.E., 1985. Prediction of swelling pressure and factors affecting the swell behavior of an expansive soil, Transportation Research Record, 1032, 23-28.
- Mowafy, Y.M., Bauer, G.E., Sakeb, F.H., 1985. Treatment of expansive soils: a laboratory study, Transportation Research Record, 1032, 34-39.
- Musso, G., Morales, E.R., Gens, A., Castellás, E., 2003. The role of structure in the chemically induced deformations of FEBEX bentonite, Applied Clay Science, 23 (1-4), 229-237.
- Nabiyev, V. V., 2005. Yapay Zeka, Seçkin Yayıncılık, 2. Baskı, Ankara, 764 p.
- Nalzeny , C.L., Li, M.C., 1967. Effect of soil moisture and tixotropic hardening on the swell behavior of compacted clay soils, Highway Research Record, No. 209, Highway Research Board, Washington D.C.
- Nayak, N. V., Christensen, R. W., 1974. Swelling characteristic of compacted expansive soils, Clays and Clay Minerals, 19, 251-261.
- Nelson J.D, Miller, D.J., 1992. Expansive soils problems and practice in foundation and pavement engineering, John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Noble, C.A., 1966. Swelling measurements and prediction of heave for lacustrine clay, Canadian Geotechnical Journal, 3 (1), 32-41.
- Nordquist, E.C., Bauman, R.D., 1967. Stabilization of expansive Mancos shale, Proceedings of 3rd Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, Vol. 1, 43-49.
- Obermeier, S.F., 1973. Evaluation of laboratory techniques for measurement of swell potential of clays, Proceedings of Workshop on Expansive Clays and Shales, Denver, 1, 214-247.
- Ohri, M.L., 2003. Swelling Pressure of Clays and Its Control, International Conference on Poblematic Soils, Nottingham, United Kingdom, Vol. 2, 427-433.
- Oloo, S.Y., Fredlund, D.G., 1995. Matric Suction Monitoring in an Expansive Soil Subgrade in Kenya, 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils UNSAT 95, Paris, France, Vol. 2, 631-636.
- Olsen, R. E., Mesri, G., 1970. Mechanisms Controlling Compressibility of Clay, J. Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 96, 1863-1978.

- Parker, J.C., Amos, D.F., Kaster, D.L., 1977. An evaluation of several methods of estimating soil volume change, *Soil Soc. Am. J.*, 41, 1059– 1064.
- Parker, J.C., L.W. Zelazny, and D.F. Amos. 1980. Swelling components of compacted Ca-montmorillonite, *Clays and Clay Minerals*, 28, 135-141.
- Parker, J.C., D.F. Amos, and L.W. Zelazny. 1982. Water adsorption and swelling of clay minerals in soil systems, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46, 450-456.
- Petersen, L.W., Moldrup, P., Jacobsen, O.H. and Rolston, D.E., 1996. Relations between specific surface area and soil physical and chemical properties, *Soil Science*, 161 (1), 9 - 21.
- Pidgeon, J.T., 1987. The prediction of differential heave for design of foundations in expansive soil areas, *Proceedings of 9th African Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Lagos, 117-128.
- Popescu, M. E., 1979. Engineering Problems Associated with Expansive Clays from Romania, *Engineering Geology*, 14, 45–53.
- Popescu, M. E., 1980. Behavior of expansive soils with crumb structures, *Proceedings of 4th International Conference on Expansive Soils*, Denver, Vol. 1, 158-171.
- Porter, A.A., Nelson, J.D., 1980. Strain controlled testing of expansive soils, *Proceedings of 4th International Conference on Expansive Soils*, Denver, Vol. 1, 34-44.
- Pusch, R., Karnland, O., Muurinen, A., 1990. Transport and microstructural phenomena in bentonite clay with respect to the behaviour and influence of Na, Cu and U, Helsinki, Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Report YJT-90-06, 92p.
- Rahimi, H., Barootkoob, S. H., 2002. Concrete canal lining cracking in low to medium plastic soils, *Irrigation and Drainage*, 51, 141-153.
- Rahman, M.S., Wang, J., Deng, W., Carter, J.P., 2001. A neural network model for uplift capacity of suction caissons, *Computers and Geotechnics*, 28, 269-287.
- Raman, V., 1967. Identification of expansive soils from the Plasticity and the Shrinkage Index Data, *Indian Engineering*, 11, 17–22.
- Rao, K.S.S., Satyadas, G.C., 1987. Swelling potential with cycles of swelling and partial shrinkage, *Proceedings of the 6th International Conference on Expansive Soils*, New Delhi, Vol. 1, 137-142.

- Rao, K.S.S., Tripathy, S., 2003. Effect of Aging on Swelling and Swell – Shrink Behaviour of a Compacted Expansive Soil, *Geotechnical Testing Journal*, 26 (1), 1-11.
- Rao, S. M., Reddy, B. V. V., Muttharam, M., 2001. The impact of cyclic wetting and drying on swelling behaviour of stabilized expansive soils, *Engineering Geology*, 60, 223-233.
- Richards, S.J., 1965. Soil suction measurements with tensiometers, *Methods of Soil Analysis*, Monograph No. 9, American Society of Agronomy, Madison, 153-163.
- Richards, B.G., Peter, P., Martin, R., 1984. The determination of volume change properties in expansive soils, *Proceedings, 5th I.C.E.S. Adelaide*, 179-186.
- Ridley, A.M., 1993. The measurement of soil moisture suction, PhD Disertation, University of London.
- Ridley, A.M., Wray W.K., 1996. Suction measurement - Theory and Practice, A state-of-the-art-review, In *Unsaturated Soils: Proc. 1st International Conference on Unsaturated Soils*, Paris, France, Vol. 3, 1293-1322.
- Ross, G.J., 1978. Relationships of Specific Surface Area and Clay Content to Shrink-Swell Potential of Soils Having Different Clay Mineralogic Compositions, *Canadian Journal of Soil Science*, 58, 159-166.
- Ruwaih, I.A., 1987. Experiences with expansive soils in Saudi Arabia, *Proceedings, 6th International Conference on Expansive Soils*, New Delhi, India. Oxford & IBH Publishing, New Delhi, 317– 322.
- Sabtan A.A. 2005. Geotechnical properties of expansive clay shale in Tabuk, Saudi Arabia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25, 747–757.
- Schafer, W.M. and M.J. Singer. 1976. Influence of physical and mineralogical properties on swelling of soils in Yolo County, California. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40, 557-562.
- Schreiner, H.D. 1988. Identification and classification of expansive soils, *Proc. 6th Intl. Conf. on Expansive Soils*. New Dehli, p. 23-29.
- Seed, H.B., Chan, C.K., 1959. Structure and Strength Characteristics of Compacted Clays, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division ASCE*, 85 (5), 87-128.
- Seed H. B., Woodward R. J., Lungreen R., 1962. Predicting of swelling potential of compacted clay, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division ASCE*, 88 (3), 53-87.



- Shahin, M.A., Jaksa, M.B., Maier, H.R., 2001. Artificial neural network applications in geotechnical engineering, *Australian Geomechanics*, 36, 49-62.
- Shahin, M. A., Maier, H. R. and Jaksa, M. B., 2003. Settlement Prediction of Shallow Foundations on Granular Soils Using B-Spline Neurofuzzy Models, *Computers and Geotechnics*, 30 (8), 637-647.
- Shanker, N.N., Rao, A.S, Swamy, A.S.R., 1982. Swelling behaviors of undisturbed and remolded samples of black cotton clay, *Indian Geotechnical Journal*, 12 (2), 152-159.
- Sharma, R.S., 1998. Mechanical behaviour of unsaturated highly expansive clays, PhD Disertation, University of Oxford, UK.
- Sharma, R.S., Wheeler, S.J., 2000. Behaviour of an Unsaturated Highly Expansive Clay During Cycles of Wetting and Drying, *UNSAT-ASIA 2000*, 721-726.
- Shi, B., Jiang, H., Liu, Z., Fang, H. Y., 2002. Engineering geological characteristic of expansive soils in China, *Engineering Geology*, 67, 63-71.
- Shuai, F. 1996. Simulation of swelling pressure. measurements on expansive soils, Ph.D. Disertation, University of Saskatchewan, Canada.
- Suhai, F., Fredlund, D. G., 1998. Model for the simulation of swelling pressure measurements on expansive soils, *Canadian Geotechnical Journal*, 35, 96-114.
- Sikh, T. S., 1993. Swell potential versus overburden pressure, *Geotechnical Testing Journal*, 16 (3), 393-396.
- Sivakugan, N., 2001. Clay Mineralogy, [http://www.geoengineer.org/files/Clay Mineralogy-Sivakugan.ppt](http://www.geoengineer.org/files/Clay%20Mineralogy-Sivakugan.ppt)
- Sivapullaiah, P. V., Sitharan, T. G., Subba Rao, K. S., 1987. Modified free swell index for clays, *Geotechnical Testing Journal*, 10 (2), 80-85.
- Sivapullaiah, P. V., Sridharan, A., Stalin, V. K., 1996. Swelling behaviour of soil-bentonite mixtures, *Canadian Geotechnical Journal*, 33, 808-814.
- Sivapullaiah, P.V., Savitha, S., 1999. Index properties of illite- bentonite mixtures in electrolyte solutions, *Geotechnical Testing Journal*, 22 (3), 257-265.
- Skempton, A. W., 1953. The Colloidal Activity of Clay, *Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Zurich, Vol. 1, 57-61.
- Skempton, A.W., 1961. Horizontal stresses in an over-consolidated Eocene clay, *Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Paris, France, Vol. 1, 351-357.

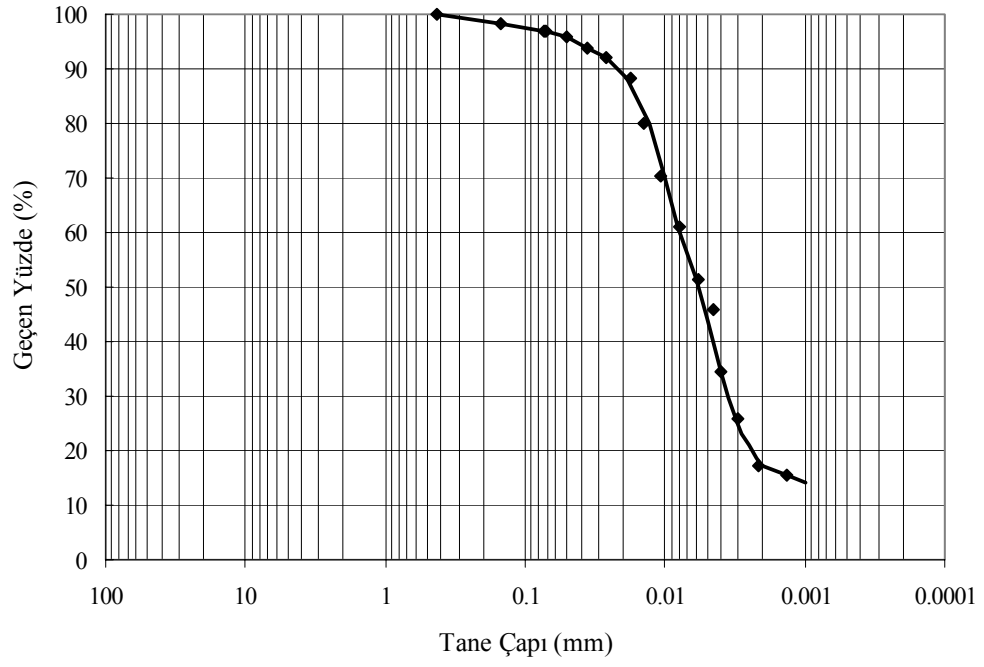
- Snethen, D.R., Johnson, L.D., and Patrick, D.M., 1977, An evaluation of expedient methodology for identification of potentially expansive soils, Soil and Pavements Laboratory, U.S. Army Eng. Waterway Exp. Sta., Vicksburg, MS, Rep. FHWA-RE-77-94, NTIS PB-289-164.
- Snethen, D.R. 1980. Characterization of Expansive Soils Using Soil Suction Data, 4th International Conference on Expansive Soils, 54-75.
- Snethen, D.R., 1984. Evaluation of expedient methods, for identification and classification of potentially expansive soils, Proceedings, 5th International Conference on. Expansive Soils, Adelaide, Australia, 22-26.
- Soemitro, R.A.A., Indarto. 2000. Swelling Characteristics of Compacted Clayey Soils Related to Their Wetting Curves, UNSAT-ASIA 2000, 727-730.
- Soil Survey Staff. 1993. Soil survey manual, USDA-SCS Agric. Handb. 18. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- Sposito, G. 1973. Volume changes in swelling soils, Soil Science, 115, 315-320.
- Sposito, G., Prost, R., 1982. Structure of water adsorbed on smectites, Chem. Rev. 82, 553-573.
- Sridharan, A., Rao, S.M., Murthy, N. S., 1985. Free swell index of soils: A need for re-definition, Indian Geotechnical Journal, 15, 94-95.
- Sridharan, A., Rao, A. S., Sivapullaiah, P. V., 1986. Swelling pressure of clays, Geotechnical Testing Journal, 9 (1), 24-33.
- Sridharan, A., Rao, S. M., 1988. A Scientific basis for the use of index tests in identification of expansive soils, Geotechnical Testing Journal, 11 (3), 208-212.
- Sridharan, A., Rao, S. M., Sashi, S., 1990. Classification of expansive soils by sediment volume method, Geotechnical Testing Journal, 13 (4), 375-380.
- Sridharan, A., Prakash, K., 1998. Mechanism controlling the shrinkage limit of soils, Geotechnical Testing Journal, 21 (3), 240-250.
- Sridharan, A., Prakash, K., 2000. Classification procedures for expansive soils, P I Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 143, 235-240.
- Sridharan, A., Choudhury, D., 2002. Swelling pressure of sodium montmorillonites, Geotechnique, 52 (6), 459-462.
- Sridharan, A., Gurtug, Y., 2004. Swelling behaviour of compacted fine-grained soils, Engineering Geology, 72 (1-2), 9-18.

- Stalin, V.K., Lakshmi, G.A., Pachaiyappan, K., 2003. Effect of Acid Rain on the Index and Strength Properties of Swelling Soils. International Conference on Problematic Soils, United Kingdom, Vol. 2, 503-506.
- Şen, Z., 2001. Bulanık Mantık ve Modelleme İlkeleri, Bilge Kültür Sanat Mühendislik Dizisi, 176 p.
- Terzaghi, K. 1927. Soil classification for foundation purposes, Trans. 1 Intl. Cong. Soil Science, 4, 127-157.
- Terzaghi, K., 1931. The influence of elasticity and permeability on the swelling of two-phase systems, Colloidal Chemistry, 3, 65-88.
- Thakur, V.K.S., Singh, D.N., 2005a. Rapid Determination of Swelling Pressure of Clay Minerals, Journal of Testing and Evaluation, 33 (4), 239-245.
- Thakur, V.K.S., Singh, D.N., 2005b. Swelling and suction in clay minerals, International Symposium Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics, Trento, Italy.
- Thomas, P.J., 1998. Quantifying Properties and Variability of Expansive Soils in Selected Map Units, PhD Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Thomas, P. J., Baker, J. C., Zelazny, L. W., 2000. An expansive soil index for predicting shrink-swell potential, Soil Sci. Soc. Am. J., 64, 268-274.
- Tourtelot, H. A., 1973. Geologic origin and distribution of swelling clays. Proceedings of the Workshop on Expansive Clays and Shales in Highway Design and Construction, FHWA, Denver, Vol. 1, 44– 69.
- Tovey, N. K., 1986. Microfabric, chemical and mineralogical studies of soils: techniques, Geotechnical Engineering, 17 (2), 131-166.
- U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2005. National Soil Survey Handbook, title 430-VI. [Online] Available: <http://soils.usda.gov/technical/handbook/>.
- Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., and Pufahl, D.E., 1999. Influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till, Geotechnique, 49 (2), 143-159.
- Van Der Merwe, D.H., 1964. The prediction of heave from the plasticity index and percentage clay fraction of soils, Civil Engineers in South Africa, 6, 103– 107.
- Van Olphen, H., 1977. An Introduction to Clay Colloid Chemistry, 2nd ed., Wiley Interscience, New York.

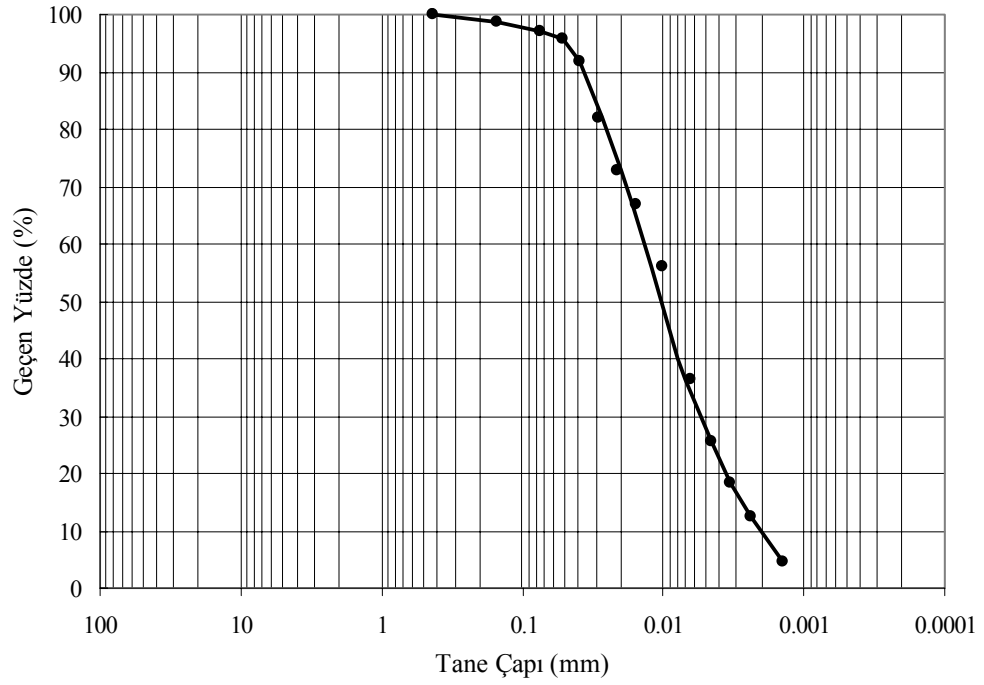
- Verwey, E. J. W., Overbeek, J.T.G., 1948. Theory of the Stability of Lyophobic Colloids, Elsevier, New York.
- Viani, B.E., Low, P.F., Roth, C.B. 1983. Direct measurement of relation between interlayer force and interlayer distance in the swelling of montmorillonite, J. Colloid. Interface Sci., 96, 229- 244.
- Vijayvergiya, V. N., Ghazzaly, O.I., 1973. Prediction of swelling potential for natural clays. 3rd International Conference on Expansive Soils, Haifa, 227-236.
- Vogt, D., 2002. Lecture Notes, Introduction to Soils, University of Washington. [www.cfr.washington.edu/classes/esc.210](http://www.cfr.washington.edu/classes/esc.210)
- Wesley, L.D., 1990. Influence of structure and composition on residual soils. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 116 (4), 589-603.
- Wiseyesekera, D.C., 2003. Cation Exchange Capacity and Swelling Characteristics of Geosynthetic Clay Liners, International Conference on Poblematic Soils, Nottingham, United Kingdom, Vol. 2, 553-560.
- Wong, R. C. K., 1998. Swelling and softening behaviour of La Biche shale, Canadian Geotechnical Journal, 35, 206-221.
- Wooltoton, F.L.D., 1954. The scientific basis of road design. Edward Arnold Publishers Ltd. London.
- Wray, W.K., 1984. The Principle of Soil Suction and its Geotechnical Engineering Applications, Fifth International Conference on Expansive Soils, Adelaide, South Australia, 114-118.
- Yong, R. N., Warkentin, B. P., 1975. Soil properties and behaviour, Elsevier Scientific, Amsterdam, 449 p.
- Yong, R. N., and Mohamed, A. M. O., 1992. A study of particle interaction energies in wetting of unsaturated expansive clays, Canadian Geotechnical Journal, 29 6, 1060–1070.
- Yong, R.N., 1999. Soil suction and soil-water potentials in swelling clays in engineering clay barriers, Engineering Geology, 54, 3-13.
- Yule, D.F., Ritchie, J.T., 1980. Soil shrinkage relationships of Texas vertisols: 1 small cores, Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 1285– 1291.
- Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy sets, Information and Control, 8, 338-353.

## **EKLER**

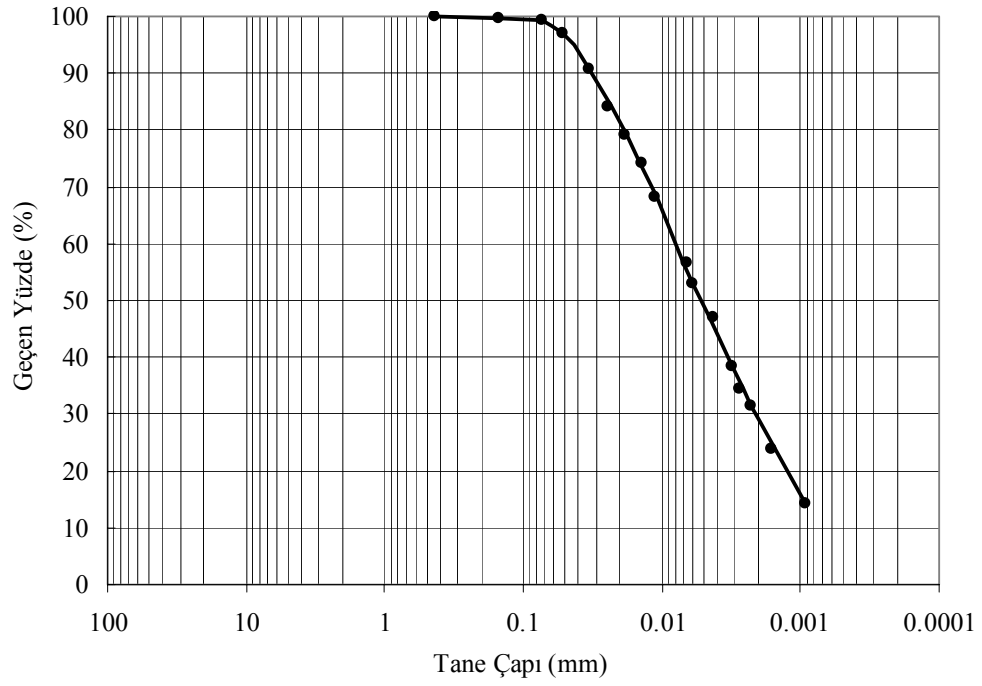
**EK 1. Kullanılan Zemin Numunelerine Ait Dane Boyutu Dağılım Eğrileri**



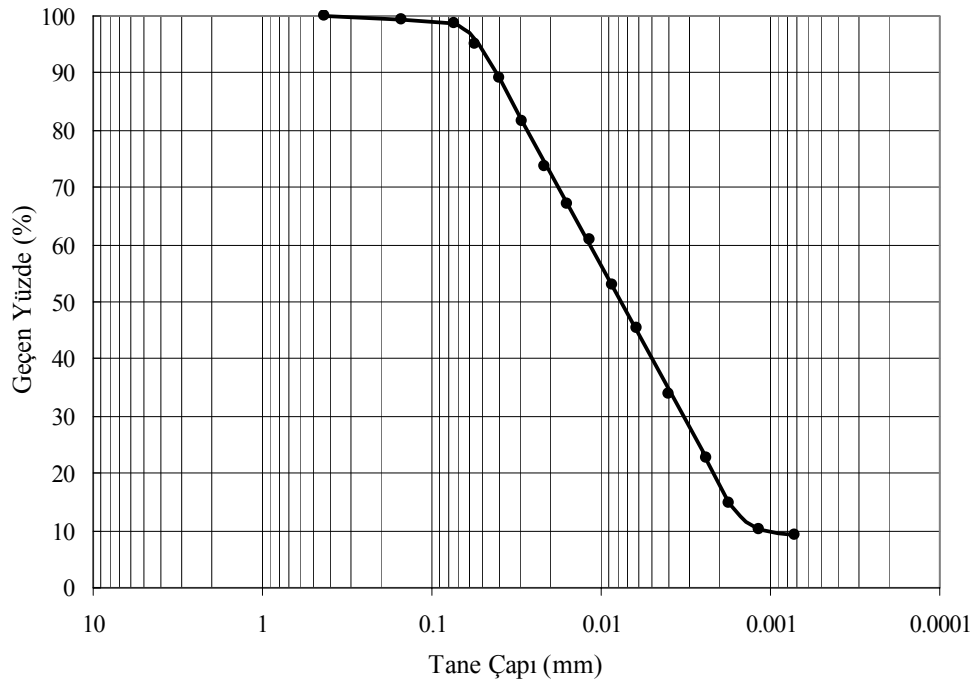
Ek1.1. Numune 1' in tane boyutu dağılım eğrisi



Ek1.2. Numune 2' nin tane boyutu dağılım eğrisi

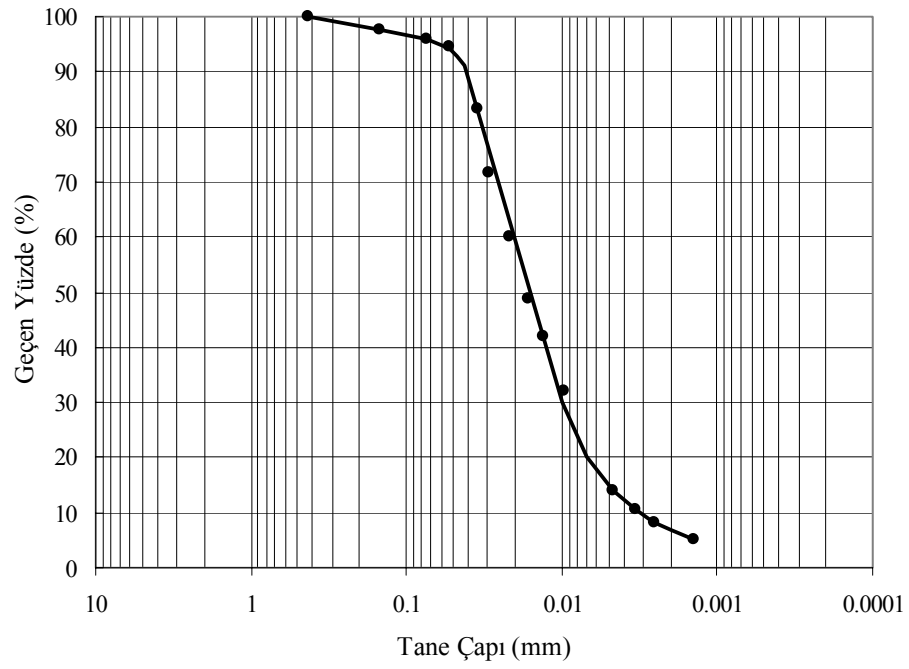


Ek1.3. Numune 3' ün tane boyutu dağılım eğrisi

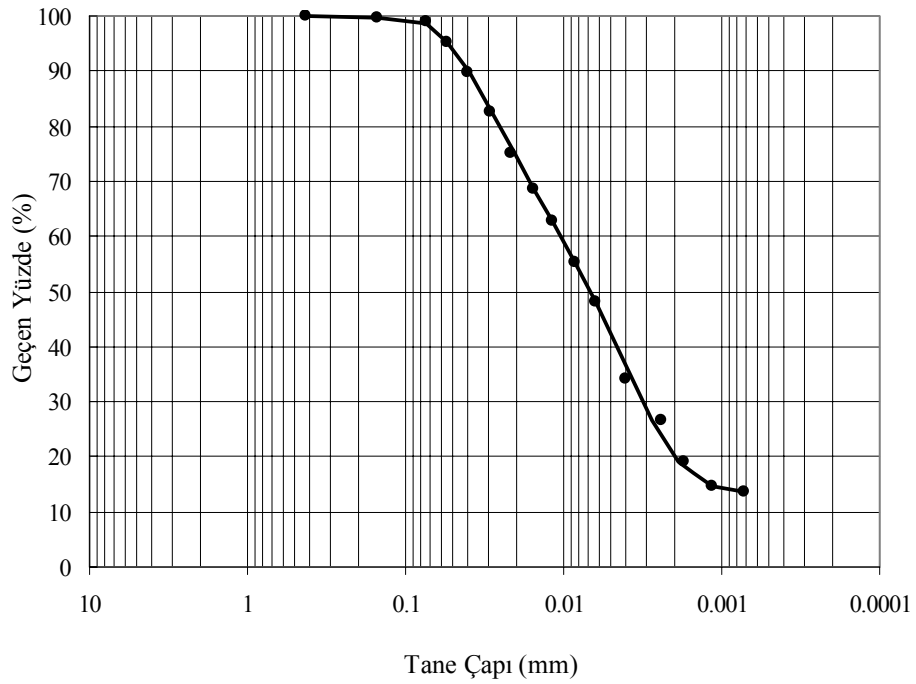


Ek1.4. Numune 4' ün tane boyutu dağılım eğrisi

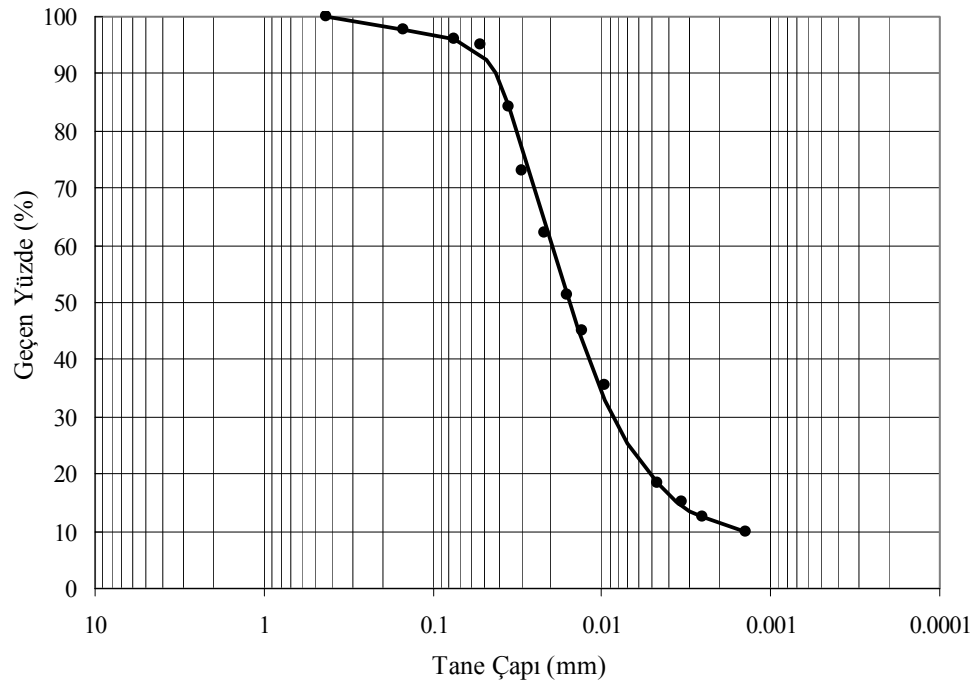




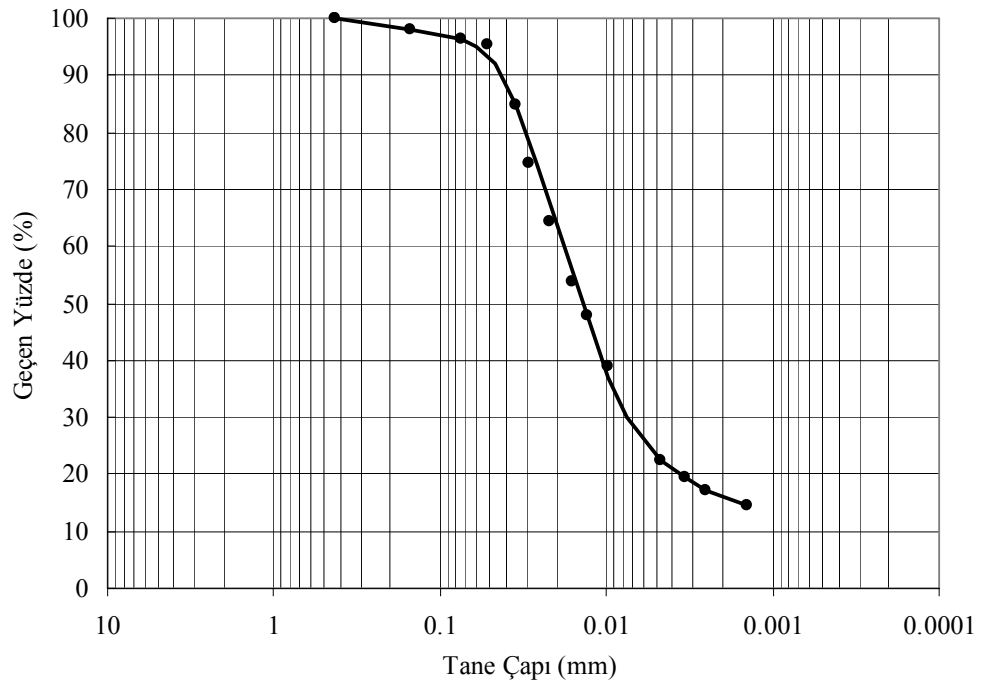
Ek1.5. Numune 5' in tane boyutu dağılım eğrisi



Ek1.6. Numune 6' nın tane boyutu dağılım eğrisi

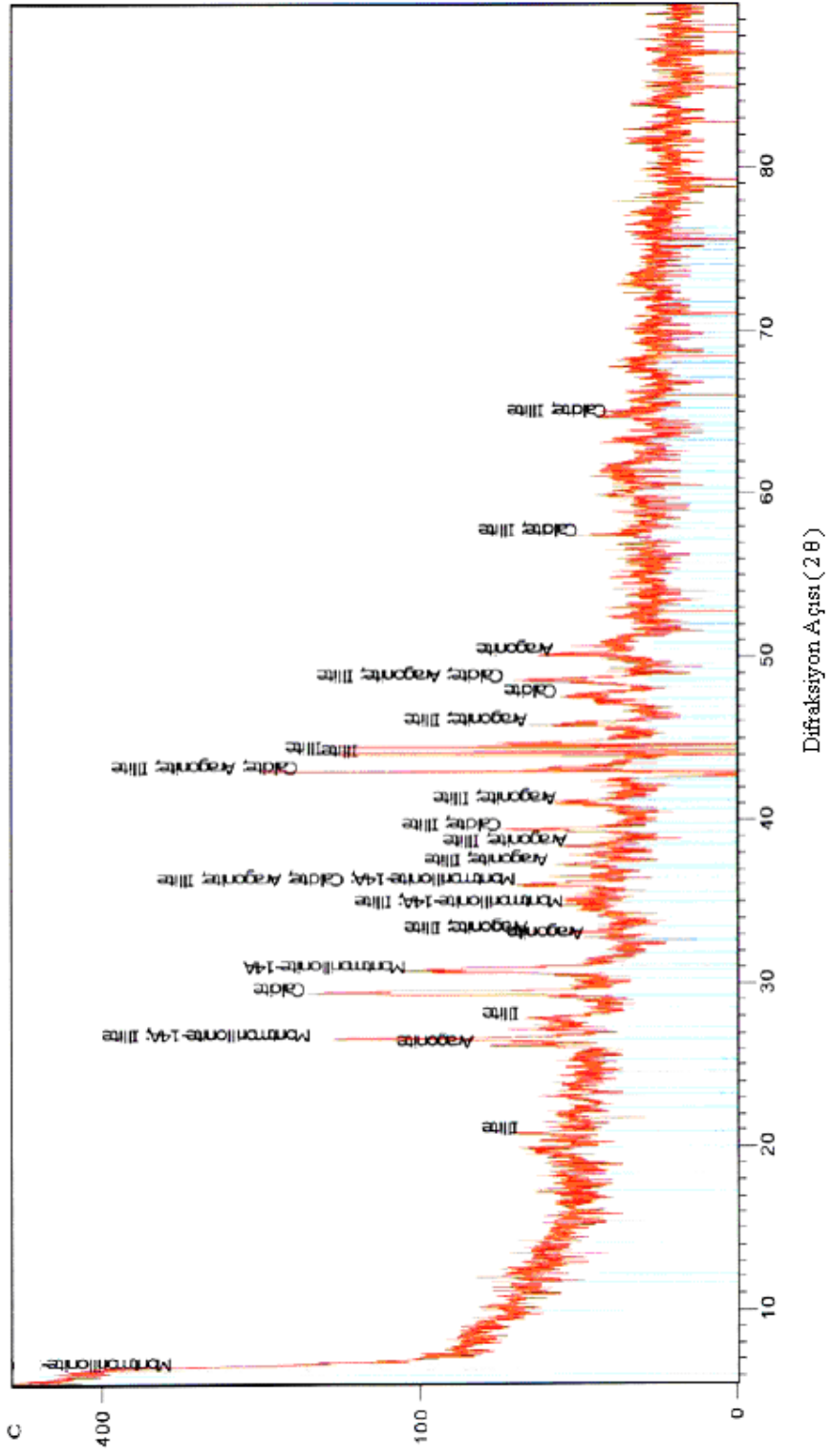


Ek1.7. Numune 7' nin tane boyutu dağılım eğrisi

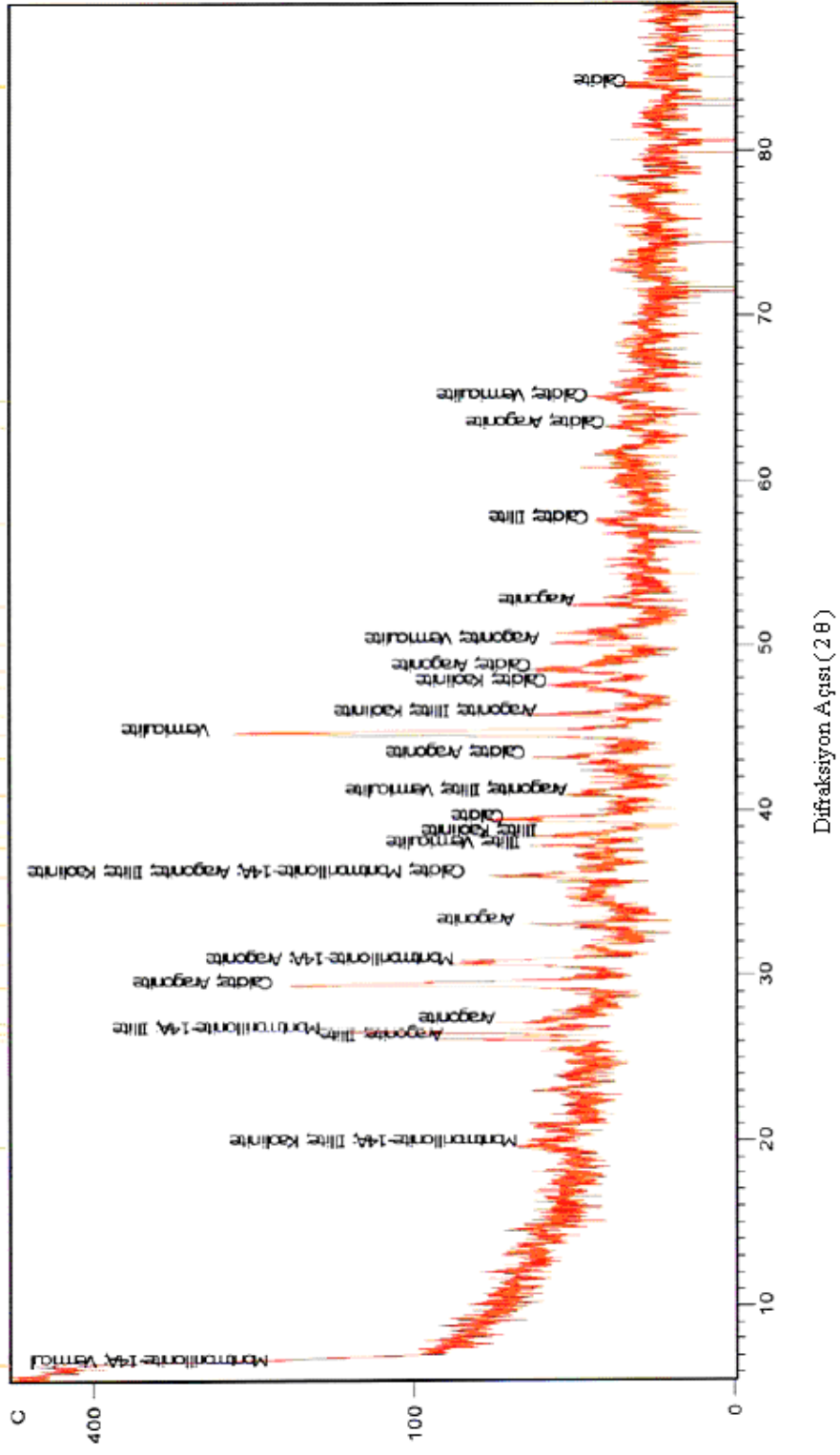


Ek1.8. Numune 8' in tane boyutu dağılım eğrisi

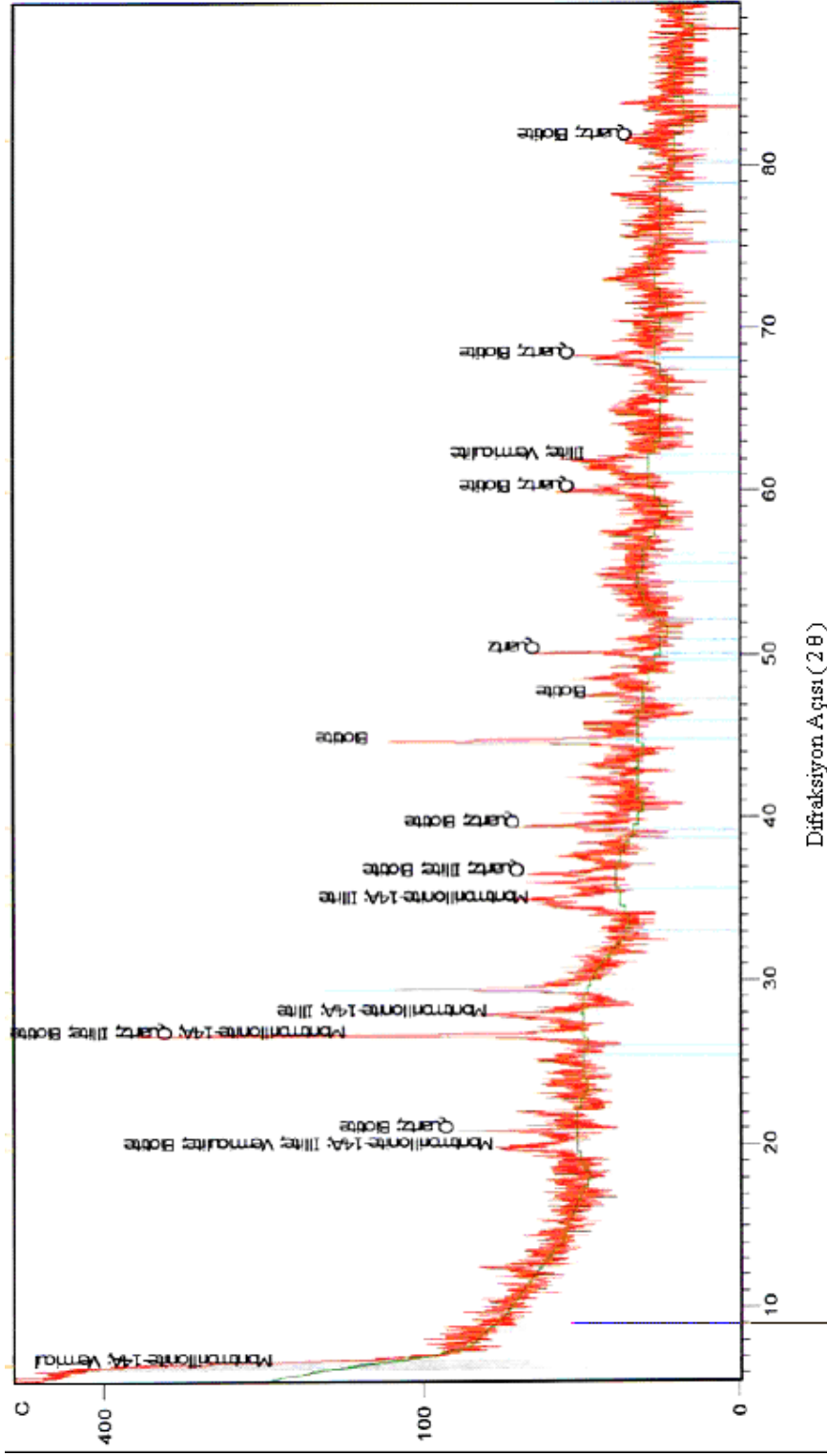
## **EK 2.** Kullanılan Zemin Numunelerine Ait XRD Grafikleri



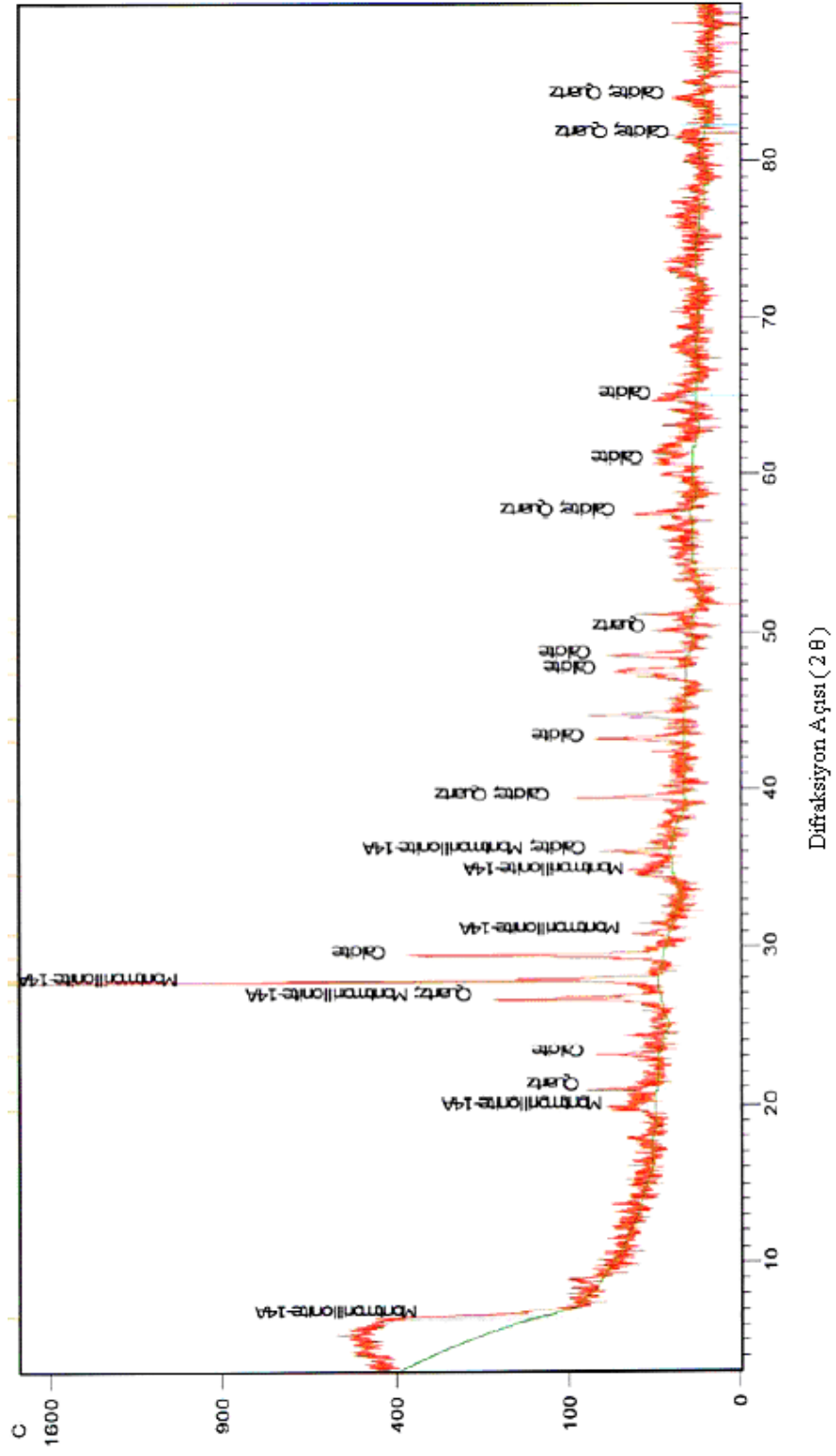
EK 2.1. Numune 1' in XRD Difraktogramı



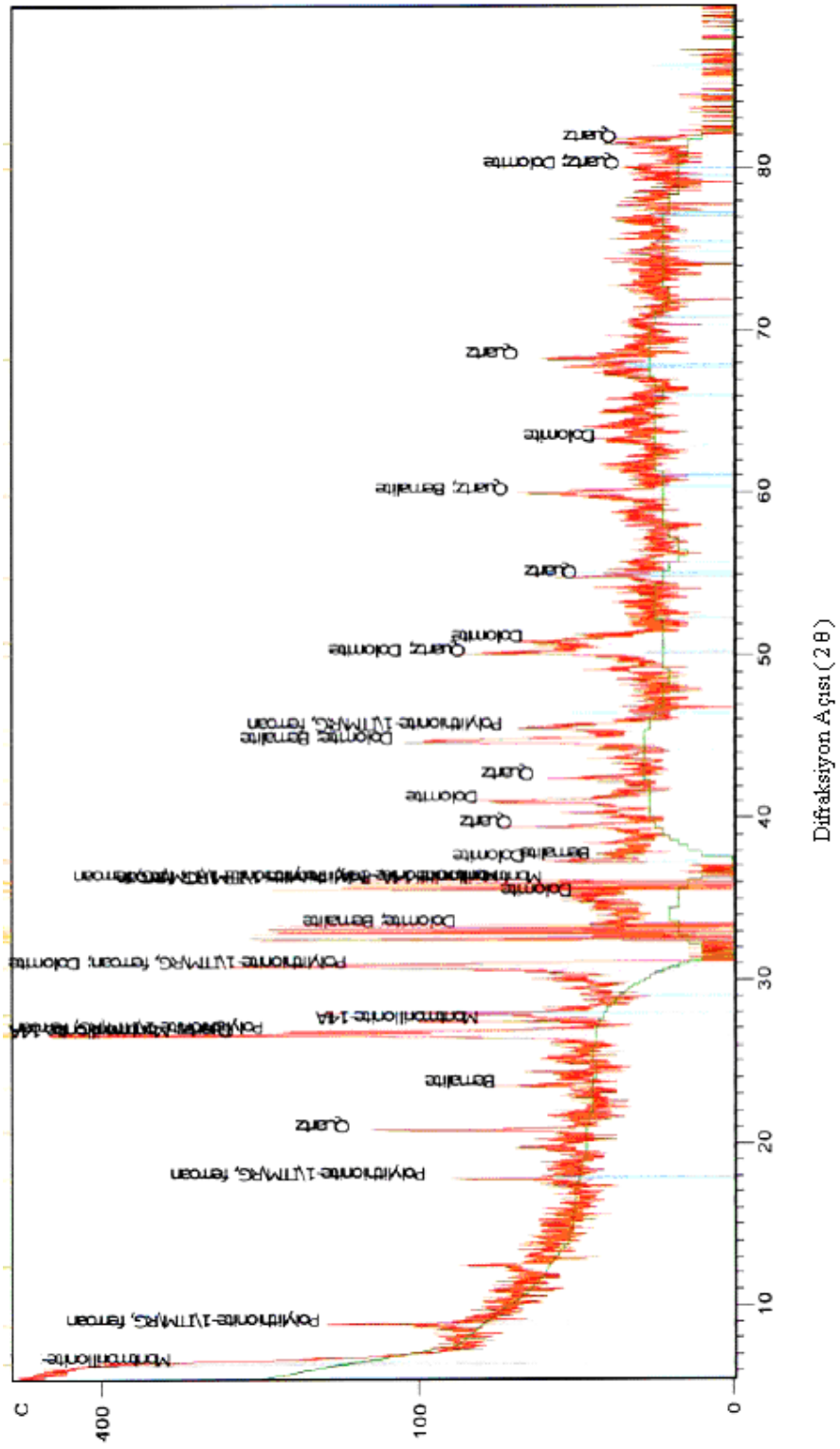
EK 2.2. Numune 2' nin XRD Difraktogramı



EK 2.3. Numune 3' ün XRD Difraktogramı

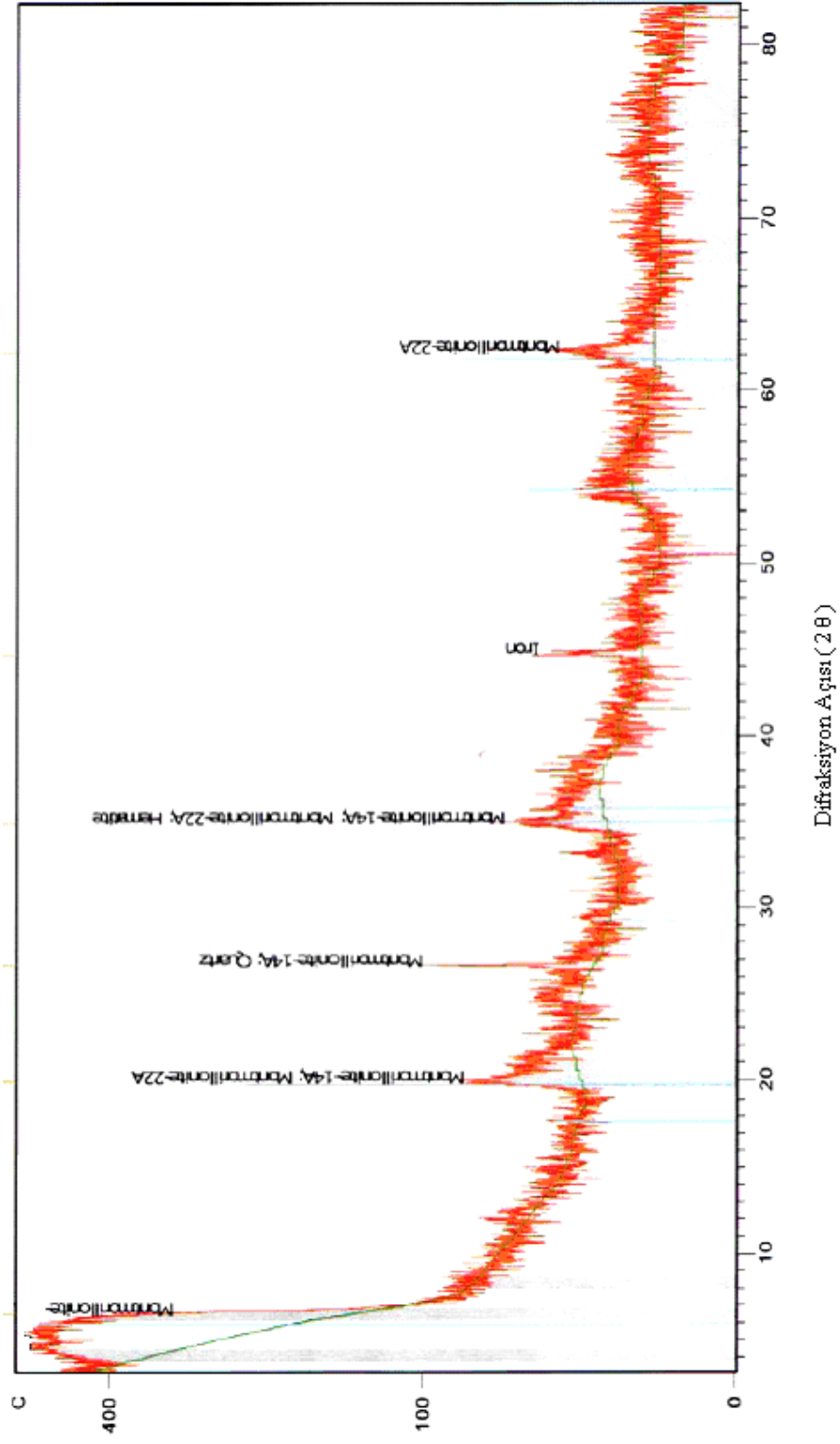


EK 2.4. Numune 4' ün XRD Difraktogramı



EK 2.5. Numune 5' in XRD Difraktogramı





EK 2.6. Bentonit Numunesin XRD Difraktogramı

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Soner UZUNDURUKAN  
Doğum Yeri : Ankara  
Doğum Yılı : 1978  
Medeni Hali : Evli  
Yabancı Dil : İngilizce



### Eğitim Durumu:

Lise : 1991-1994 Ankara Gazi Çiftliği Lisesi  
Lisans : 1994-1998 Ondokuz Mayıs Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
İnşaat Mühendisliği Bölümü  
Yüksek Lisans: 1998-2001 Süleyman Demirel Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

### Çalıştığı Kurum ve Yıl:

2000 – Süleyman Demirel Üniversitesi  
Mühendislik – Mimarlık Fakültesi  
İnşaat Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi

### Yayımları:

1- Uzundurukan, S., Keskin, S.N., Göksan, T.S., 2005. Artificial Neural Network Modelling for Estimation of Suction Capacity. Journal of Applied Sciences 5 (4), 712-715.

2- Keskin, S. N., Tekinsoy, M. A., Uzundurukan, S., 2004. Aşırı Konsolidasyon Oranının ve Efektif Gerilmelerin Kil Zeminlerdeki Sükunetteki Toprak Basıncı Katsayısına Etkileri. İMO Teknik Dergi, 15 (3), 3295-3310.

3-Keskin, S. N., Uzundurukan, S., 2003. Properties of Lateral Swelling at Clayey Soils. Proceedings of the International Conference on Problematic Soils, 28-30 July 2003, Nottingham, United Kingdom, Vol. 2, 341-347.