

134845

DEĞİŞİK ÇEVRESEL KOŞULLAR ALTINDA,
ŐŐEN ZEMİNLERİN ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Murat Çetin

Dumlupınar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak HazırlanmıŐtır.

DanıŐman : Yrd.Doç.Dr. Yücel GÜNEY

EC. YÜKSEK ÖĞRETİM KURULU
TEZ KURULU BAŐKANLIĐI

134845

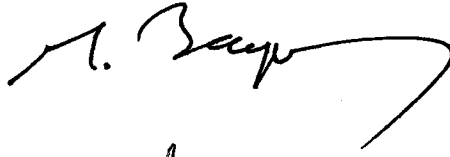
Haziran - 2003

KABUL VE ONAY SAYFASI

Murat Çetin'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Değişik Çevresel Koşullar Altında, Şişen Zeminlerin Özelliklerinin Belirlenmesi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir

..26.1.06.1..2003

Üye : Prof.Dr.Mehmet T. BAYER



Üye : Yrd.DoçDr. Yücel GÜNEY



Üye : Yrd.DoçDr. Hakan KOYUNCU

Fen Bilimleri Enstitüsün Yönetim Kurulu'nun 14.07.2003 gün ve 10 sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. M. Sabri ÖZYURT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DEĞİŞİK ÇEVRESEL KOŞULLAR ALTINDA, ŞİŞEN ZEMİNLERİN ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Murat ÇETİN

İnşaat Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2003

Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. Yücel GÜNEY

ÖZET

İnşaat mühendisliğinde; su muhtevsındaki değişime bağlı olarak önemli ölçüde hacim değiştirme potansiyeline sahip zeminler şişen zeminler olarak tanımlanmaktadır. Şişen zeminler dünyanın pek çok yerinde önemli zararlara neden olmaktadır. Şişen zemin problemi özellikle hafif yapılar ve yollar için deprem, sel gibi diğer doğal afetlerden daha tehlikelidir. Şişen zemin problemlerinin çözümü için genellikle kimyasal katkı maddeleri ile stabilizasyon, ön ıslatma, sıkışma kontrolü, sürsaj yüklemesi, su muhtevasının korunması gibi yöntemlerle zemin iyileştirilmesi yöntemlerine başvurulur. Bu yöntemlerden özellikle kireç stabilizasyonu etkin ve ekonomik kullanımı nedeniyle en sık başvuru yöntemidir. Bu zeminler, stabilize edilmeden önce veya sonra ıslanma-kuruma, sıcaklık, kür süresi, donma-çözünme, su muhtevası değişimleri, kirlilik gibi çok sayıda çevresel etkilere maruz kalmaktadırlar.

Bu çalışmada şişme potansiyeline sahip doğal ve farklı oranlarda bentonit ve kaolen içeren kil karışımları kullanılmıştır. Doğal ve kireç-çimento ile stabilize edilmiş numuneler üzerinde su muhtevası, uygulanan sıkıştırma enerjisi miktarı, katkı maddeleri, kür süresi, kür sıcaklığı, donma-çözünme ve ıslanma-kuruma çevrimleri gibi çevresel koşulların şişme özelliklerine etkileri incelenmiştir.

Deneyler sonucunda, şişme potansiyelinin su muhtevasının azalması ve sıkıştırma enerjisinin artması ile arttığı belirlenmiştir. Ayrıca katkı miktarının, kür süresinin ve sıcaklığının artması ile şişme potansiyelinin azaldığı görülmüştür. Islanma kuruma çevrimlerinin doğal zeminlerde şişme potansiyelini önemli ölçüde azaltırken, stabilize edilmiş zeminlerde ıslanma kuruma çevrimlerinin şişme potansiyelinde az bir miktarda artışa neden olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Islanma-Kuruma, Kür Şartları, Stabilizasyon, Şişen Zeminler

DETERMINING THE PROPERTIES OF EXPANSIVE SOILS, UNDER DIFFERENT ENVIRONMENTAL CONDITIONS

Murat ÇETİN

Civil Engineering, Master Thesis, 2003

Supervisor: Assist. Prof. Yücel GÜNEY

SUMMARY

In civil engineering, soils which have considerable potential of volume change by the changes in water content are named as expansive soils. Expansive soils cause significant damages in many parts of the world. The problem of expansive soil is more dangerous to structures particularly light buildings and pavements, than any other natural hazards including earthquakes and floods. Generally, stabilization with chemical admixtures, prewetting, compaction control, surcharge loading, moisture control systems are used to solve the expansive soil problems. Because of the effective and economical advantages, lime stabilization is the most commonly used method. These soils are subjected to many environmental conditions such as wetting-drying, temperature, curing period, freeze-thaw, variations of water content, pollution etc. before and after stabilization.

In this study, natural and different bentonite-kaolinite mixtures which have swelling potential were used. The effects of water content, applied compaction energy, admixtures, curing period, cure temperature, freeze-thaw cycles, wetting-drying cycles, on swelling characteristics were investigated on the natural and lime-cement stabilized specimens.

It was determined that the swelling potential is increased by the reduction of water content and increase in applied compaction energy. Additionally it was seen that the swelling potential decreased with the increase of admixture and curing temperature and period. On natural soils wetting and drying cycles reduced the swelling potential where as, on stabilized soils it was determined that it caused small increase in the swelling potential.

Keywords: Curing Conditions, Expansive Soils, Stabilization, Wetting-Drying

TEŐEKKÖR

Bu alıŐma esnasında bana her tŸrlŸ yardım ve desteğini esirgemeyen danıŐmanım Yrd.Doç.Dr.YŸcel GŸNEY'e, Dumlupınar Ÿniversitesi İnaaat MŸhendislięi BŸlŸmŸ Zemin Mekaniği Laboratuvarının kurulması ve geliŐtirilmesinde Ÿnemli katkılar sağlayan Prof.Dr.Mehmet Tevfik BAYER'e, ayrıca hayatımın her dŸneminde bana her konuda destek olan aileme teŐekkŸrlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç	2
1.2 Önceki Çalışmalar	3
2. KİL MİNERALLERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ.....	8
2.1 Kil ve Kil Minerallerinin Tanımı	8
2.2 Kil Minerallerinin Yapısı	8
2.2.1 İki tabakalı kil mineralleri	9
2.2.2 Üç tabakalı kil mineralleri	9
2.3 Kil Minerallerinin Mineralojik Yapıları	9
2.3.1 Kaolinit grubu	9
2.3.2 Montmorillonit grubu	11
2.3.3 İllit grubu	12
2.3.4 Klorit grubu	13
2.4 Killerin Fiziko-Kimyasal Özellikleri	13
2.4.1 Spesifik yüzey alanı	13
2.4.2 Elektriksel iletkenlik	13
2.4.3 pH değeri	14
2.4.4 Katyon değişim kapasitesi (KDK)	14
3. ŞİŞEN ZEMİNLERİN ÖZELLİKLERİ	16
3.1 Şişme Potansiyeline Sahip Arazinin Tanımlanması	16
3.1.1 Araştırmanın Planlanması	16
3.2 Zeminlerin Şişme ve Büzülme Potansiyelini Etkileyen Faktörler	18
3.2.1 Zemin karakteristikleri	18

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.2.1.1 Mikro ölçekli faktörler	19
3.2.1.2 Makro ölçekli faktörler	22
3.2.2 Çevresel koşullar	22
3.2.3 Gerilme durumu	23
3.2.4 Aktif zon	24
3.3 Şişen Zeminlerin Tanımlanması ve Sınıflandırılması	24
3.3.1 Tanımlama Deneyleri	26
3.3.1.1 Mühendislik sınıflandırma deneyleri	26
3.3.1.2 Mineralojik yöntemler	27
3.3.1.3 Katyon değişim kapasitesi (KDK)	28
3.3.1.4 Serbest şişme	28
3.3.1.5 Potansiyel hacim değişimi	29
3.3.1.6 Şişme endeksi deneyi	30
3.3.1.7 Kaliforniya taşıma oranı (CBR)	30
3.3.1.8 Lineer genişleme katsayısı (COLE)	31
3.3.2 Sınıflandırma şemaları	32
3.3.2.1 Zemin sınıflandırma yöntemlerine göre sınıflandırma	32
3.3.2.2 Mühendislik endeks özelliklerine göre sınıflandırma	33
3.3.3 Sınıflandırma şemalarının karşılaştırılması	35
3.3.4 Şişme potansiyelinin formüllerle belirlenmesi	35
3.4 Şişen Zeminlerin İyileştirilmesi	36
3.4.1 Kimyasal katkı maddeleri ile stabilizasyon	36
3.4.1.1 Kireç stabilizasyonu	36
3.4.1.2 Çimento stabilizasyonu	37
3.4.1.3 Tuz ile stabilizasyonu	37
3.4.1.4 Uçucu kül stabilizasyonu	37
3.4.1.5 Organik bileşikler ile stabilizasyon	38
3.4.2 Ön ıslatma	38
3.4.3 Sıkışma kontrolü ile zemin iyileştirmesi	38
3.4.3.1 Kaldırıp yeniden yerleştirme	38
3.4.3.2 Örseleyip yeniden sıkıştırma	39
3.4.4 Sürsaj yüklemesi ile zeminin iyileştirilmesi	39
3.4.5 Isı ile iyileştirme	39
3.4.6 Elektro kimyasal yöntemlerle zemin iyileştirmesi	39
3.4.7 Su muhtevasının korunması ile zemin iyileştirmesi	39
3.4.7.1 Yatay su tutma bariyerleri	40
3.4.7.2 Düşey su tutma bariyerleri	40

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4. KULLANILAN MALZEMELER VE DENEY YÖNTEMLERİ	41
4.1 Kullanılan Malzemelerin Tanımı	41
4.1.1 Na-Bentonit kili	42
4.1.2 Kaolin kili	42
4.1.3 Türkmen kili.....	42
4.1.4 Kireç	43
4.1.5 Çimento	44
4.2 Kullanılan Malzemelerin Bazı Geoteknik Özellikleri	44
4.3 Deneysel Yöntemler	45
4.3.1 Geoteknik özellikler	45
4.3.1.1 Tane çapı dağılımının belirlenmesi	45
4.3.1.2 Kıvam limitleri	46
4.3.1.3 Özgül ağırlık	48
4.3.1.4 Standart proktor kompaksiyon deneyi	49
4.3.1.5 Serbest şişme deneyi	51
4.3.1.6 Şişme Basıncı deneyi	51
4.3.2 Fiziko-kimyasal özellikler	51
4.3.2.1 pH	51
4.3.2.2 Elektriksel iletkenlik	52
5. DENEYSEL ÇALIŞMA	54
5.1 Su Muhtevası ve Uygulanan Enerji Miktarının Şişme Potansiyeline Etkisi	56
5.1.1 Deneysel yöntem	56
5.1.2 Deney sonuçları	58
5.1.3 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi	63
5.2 Katkı Maddeleri ve Kür Süresinin Şişme Potansiyeline Etkisi	66
5.2.1 Deneysel yöntem	66
5.2.2.1 Deney sonuçları (Zemin D)	66
5.2.2.2 Deney sonuçları (Zemin A)	69
5.2.3 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi	72
5.3 Kür Sıcaklığı ve Süresinin Şişme Potansiyeline Etkisi	74
5.3.1 Deneysel yöntem	74
5.3.2 Deney sonuçları	75
5.3.3 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi	77
5.4 Donma Çözünme Çevrimlerinin Şişme Potansiyeline Etkisi	78
5.4.1 Deneysel yöntem	78
5.4.2 Deney sonuçları	78

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.4.3 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi	80
5.5 Islanma Kuruma Çevrimlerinin Şişme Potansiyeline Etkisi	81
5.5.1 Deneysel yöntem	81
5.5.2 Deney sonuçları	82
5.5.3 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi	86
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	87
6.1 Sonuçlar	87
6.2 Öneriler	91
KAYNAKLAR DİZİNİ	92

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Kaolinit kilinin yapısı	10
2.2 Kaolinitin elektron mikroskop fotoğrafı	10
2.3 Montmorillonit kilinin yapısı	11
2.4 Montmorillonit (smektit) grubu kil minerallerinin elektron mikroskopu fotoğrafı ...	12
2.5 İllit kilinin yapısı	13
3.1 Arazinin tanımlanması için takip çizelgesi.....	17
3.2 Atterberg limitleri ile zemin kıvamı arasındaki ilişki.....	26
3.3 Potansiyel hacim değişikliğine bağlı değerlendirme.....	29
3.4 Kil oranı-Aktivite değerlerine bağlı sınıflandırma	34
4.1 Likit limit deneyinin yapılışı	47
4.2 Plastik kıvama getirilmiş zemin örneği	47
4.3 Özgül ağırlık deneyinde kullanılan aletler.....	48
4.4 Standart proktor deney aletleri	49
4.5 Sıkıştırılmış bir zeminde γ_k -w ilişkisi	50
5.1 pH-Şişme yüzdesi ilişkisi	55
5.2 EI-Şişme yüzdesi ilişkisi	55
5.1.1 Zemin D`ye ait optimum su muhtevası eğrileri	57
5.1.2 %40 Su muhtevasında farklı enerjilerin şişme yüzdesine etkisi	59
5.1.3 %55 Su muhtevasında farklı enerjilerin şişme yüzdesine etkisi	59
5.1.4 %40 Su muhtevasında farklı enerjilerin şişme basıncına etkisi	60
5.1.5 %55 Su muhtevasında farklı enerjilerin şişme basıncına etkisi	60
5.1.6 Kuru yoğunluk şişme yüzdesi ilişkisi	61
5.1.7 Kuru yoğunluk şişme basıncı ilişkisi	61
5.1.8 Serbest şişme-şişme basıncı ilişkisi	62
5.2.1 Zemin D için katkı maddesi ve kür süresinin şişme yüzdesine etkisi	67
5.2.2 Zemin D için katkı maddesi ve kür süresinin şişme basıncına etkisi	67
5.2.3 Kireç ile stabilize edilmiş Zemin D`ye ait şişme-zaman grafikleri	68
5.2.4 Çimento ile stabilize edilmiş Zemin D`ye ait şişme-zaman grafikleri	68
5.2.5 Stabilize edilmiş Zemin D`ye ait serbest şişme- şişme basıncı ilişkisi	69
5.2.6 Zemin A için katkı maddesi ve kür süresinin şişme yüzdesine etkisi	70

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.2.7 Zemin A için katkı maddesi ve kür süresinin şişme basıncına etkisi	70
5.2.8 Kireç ile stabilize edilmiş Zemin A'ya ait şişme-zaman grafikleri	71
5.2.9 Çimento ile stabilize edilmiş Zemin D'ye ait şişme-zaman grafikleri	71
5.2.1 Stabilize edilmiş Zemin D'ye ait serbest şişme- şişme basıncı ilişkisi	72
5.3.1 Zemin B için elde edilmiş optimum su muhtevaları	74
5.3.2 Zemin B+3K için Kür sıcaklığının şişme yüzdesine etkisi.....	75
5.3.3 Zemin B+3K için Kür sıcaklığının şişme basıncına etkisi	76
5.3.4 Zemin B+6K için Kür sıcaklığının şişme yüzdesine etkisi	76
5.3.5 Zemin B+6K için Kür sıcaklığının şişme basıncına etkisi	77
5.4.1 Zemin B+3K için donma-çözünme çevrimlerinin şişme yüzdesine etkisi	79
5.4.2 Zemin B+3K için donma-çözünme çevrimlerinin şişme basıncına etkisi	79
5.5.1 Numunelerin kuruma-zaman grafikleri	82
5.5.2 Zemin B için ıslanma-kuruma çevrimlerinin şişme yüzdesine etkisi	83
5.5.3 Zemin B için ıslanma-kuruma çevrimlerinin şişme basıncına etkisi	83
5.5.4 Zemin C için ıslanma-kuruma çevrimlerinin şişme yüzdesine etkisi	84
5.5.5 Zemin C için ıslanma-kuruma çevrimlerinin şişme basıncına etkisi	84
5.5.6 Zemin D için ıslanma-kuruma çevrimlerinin şişme yüzdesine etkisi	85
5.5.7 Zemin D için ıslanma-kuruma çevrimlerinin şişme basıncına etkisi	85
6.1 Al-Homoud et al. çalışmalarında sunulan literatür çalışmasının kendi sonuçları ve bu çalışmada elde edilen sonuçlarla karşılaştırması	89
6.2 Deneyler sonucunda elde edilen serbest şişme-şişme basıncı ilişkisi	90

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Şişme büzülme potansiyelini etkileyen zemin özellikleri.....	19
3.2 Şişme büzülme potansiyelini etkileyen çevresel faktörler.....	20
3.3 Bazı kil minerallerinin partikül ve mühendislik özellikleri	21
3.4 Şişen zeminleri belirlemek için yapılan laboratuvar deneyleri	25
3.5 Kil minerallerinin aktiviteleri	27
3.6 Bazı kil minerallerinin KDK değerleri.....	28
3.7 Şişme indeksi değerine göre zeminlerin şişme potansiyelleri	30
3.8 LE/Kil Yüzdesi oranının kil mineralojisi ile ilişkisi	32
3.9 Kolloid içeriği, plastisite indisi, büzülme limiti değerlerine göre şişen zeminlerin sınıflandırılması	33
3.10 Rötire limiti veya lineer rötreye bağlı şişen zemin sınıflandırılması	33
3.11 200 no'lu elekten geçen zemin yüzdesi, likit limit ve standart penetrasyon direncine bağlı şişen zemin sınıflandırılması	34
3.12 Plastisite indisine bağlı şişen zemin sınıflandırılması	34
3.13 Formülasyona bağlı şişen zemin sınıflandırılması	36
4.1 Kullanılan malzemeler	41
4.2 Deneylerde kullanılan Na-Bentonit'e ait geoteknik ve fiziko-kimyasal özellikler .	42
4.3 Deneylerde kullanılan Kaolin'e ait geoteknik ve fiziko-kimyasal özellikler.....	42
4.4 Sönmüş kirece ait bazı kimyasal özellikler	43
4.5 Sönmüş Kirece ait X-Ray Analizi sonuçları	43
4.6 Kullanılan malzemelerin geoteknik özellikleri	44
5.1 Numunelerin pH ve EI değerleri	54
5.1.1 Hazırlanan numunelerin özellikleri	58
5.1.2 Hazırlanan numunelerin bazı geoteknik özellikleri	62
5.1.3 Başlangıç ve son su muhtevası değişimi	64

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
A _c	Aktivite
CH	Yüksek Plastisiteli İnorganik Killer
CBR	Kaliforniya Taşıma Oranı
COLE	Lineer Genişleme Katsayısı
Ç	Çimento
DDL	Dağılmış Çift Tabaka
e	Boşluk Oranı
EI	Elektriksel İletkenlik
K	Kireç
KDK	Katyon Değişim Kapasitesi
LE	Lineer Genişleme
LL	Likit Limit
MH	Yüksek Plastisiteli Silt
ML	Düşük Plastisiteli Silt
M.P.	Modifiye Proktor
n	Porozite
ÖA	Özgül Ağırlık
PI	Plastisite İndisi
PL	Plastik Limit
PVC	Potansiyel Hacim Değişimi
RL	Rötre Limiti
S	Şişme Potansiyeli
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
S _r	Doygunluk Derecesi
S.P.	Standart Proktor
SYA	Spesifik Yüzey Alanı
USCS	Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
u _a	Boşluk Hava Basıncı

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
u_w	Boşluk Suyu Basıncı
w	Su Muhtevası
γ_k	Kuru Birim Hacim Ağırlığı
γ_n	Doğal Birim Hacim Ağırlığı
γ_s	Tane Birim Hacim Ağırlığı
μ	Emme Gerilmesi
σ	Toplam Gerilme
σ^1	Efektif Gerilme

1. GİRİŞ

Zeminin şişmesi veya büzülmesi özellikle kil zeminlerin değişik çevresel şartlar altında su ile temas etmesi veya su kaybetmesi sonucu meydana gelen hacim artışı veya azalması olarak tanımlanabilir. Şişme ve büzülmeye meydana gelen bu hacim değişikliği ile zemin yapısının stabilitesi bozulmakta ve buna bağlı olarak üst yapıda önemli deformasyonlar ve hasarlar oluşabilmektedir. Bu hasarlar özellikle zati ağırlığı düşük ve temel zeminlerinin su ile temas olasılıkları yüksek olan; karayolları, tren yolları, sulama kanalları gibi yapılarda tehlikeli olmaktadır.

Şişme mekanizması; kil mineralinin cinsi, şişen tabakanın kalınlığı, zeminin tabakalanma durumu, permeabilite, şişen tabakaya etkiyen yükler, şişen tabakanın su muhtevası, iklim, yer altı suyunun durumu gibi faktörlere önemli ölçüde bağlıdır. Mekanizmayı etkileyen çok sayıda faktör olması şişme miktarının ve oluşabilecek hasarların belirlenmesinin zorlaştırmaktadır. Problem her yıl dünya çapında milyarlarca dolarlık zarara neden olmakla birlikte, şişen zemin davranışının ve zemin yapı ilişkisinin tam olarak belirlenememiş olması doğru tasarım ve uygulamaların yapılmasını engellemektedir.

Şişen zemin probleminin tanımlanması oldukça yenidir. Oregon eyaletindeki Owyhee projesinde inşa edilen bir çelik sifon temelinde ters yönde çalışan yer değiştirmelerin olduğu belirlenmiştir [7]. Bu olaydan sonra "şişen zemin" probleminin mekanizması tanımlanmış ve tasarım kriterleri önerilmiştir. Ancak bu tarihten sonra zemin üzerine direkt oturan beton yapıların inşasındaki hızlı artış, şişen zeminlerin neden olduğu hasarlarda da önemli seviyede artışa neden olmuştur. Bu artışta, temel zemininde yapılması gereken geoteknik çalışma eksikliğinin ve yetersiz yapılan çalışmaların da etkili olduğu belirtilmelidir [18].

Amerika Birleşik Devletleri, Avustralya, Hindistan, Güney Amerika ve Afrika ülkelerinde, şişen zeminlerle ilgili problemler çok sık görülmüştür. Amerika Birleşik Devletleri'nde şişen zeminlerden dolayı yılda 2,3 milyar dolar civarında zarar meydana geldiği ve bu zararın sel, kasırga, fırtına ve deprem gibi zararlardan yaklaşık iki kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir [12]. Ürdün'de ise binaların %40'ından fazlasında şişen zeminler nedeniyle büyük hasarlar meydana gelmiştir [4].

Ülkemizde, şişen zeminlerle ilgili en önemli problemler inşa edilen hafif su yapılarında görülmüş ve genellikle Güneydoğu Anadolu Projesi kapsamında yer alan sulama yapıları inşaatında yaşanmıştır. Özellikle Harran ovası sulama alanlarında inşa edilen kanal yapılarında bu problemle sıkça karşılaşmış, konuyla ilgili önemli mühendislik uygulamaları yapılmış ve bilgi birikimi elde edilmiştir [33, 34 ve 35].

Ankara İçme suyu Projesi kapsamında oluşturulan basınçlı Kınık tüneliyle bağlantılı borulu şebekelerde, bu tip problemlerle karşılaşmıştır. Ayrıca Konya Ovası Sulama Projesi IV-VII. kısım inşaatında da, tipik şişen zemin probleminin yaşandığı bölümler görülmüştür [37].

Kil zeminlerde şişme potansiyeli, değişik önlemler alınarak düşük seviyelere indirilebilir. Bu önlemler arasında, yerindeki zeminde inşaat öncesi şişmeyi sağlayacak şekilde ön ıslatma yapılması, sıkıştırma kontrolü ile zemin sıkılığının azaltılması, şişen zeminin şişmeyen zeminle değiştirilmesi, sürşarj uygulanması ve kimyasal ilavelerin kullanılması en sık benimsenen uygulamaları oluşturmaktadır. Ayrıca su muhtevası değişmeyecek şekilde gerekli temel izolasyonunun yapılması da, şişme potansiyelinin önlenmesi doğrultusunda zeminde uygulanan tasarım önlemleri olarak dikkate alınır [27 ve 38].

1.1 Amaç

Yukarıda anlatıldığı gibi şişen zeminler dünyanın hemen her yerinde önemli zararlara neden olan, henüz tamamen çözümlenememiş bir zemin mekaniği problemidir. Problemin çözümü ve daha iyi anlaşılabilmesi için dünyanın her yerinde çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmada da değişik çevresel şartların şişen zeminlerin özelliklerine olan etkileri araştırılmıştır.

Şişmeden dolayı meydana gelebilecek hasarlar gözardı edilmek istenmiyorsa, yapıların tasarımında aktif kil minerali içeren zeminlerin varlığının araştırılması ve bulunması durumunda arazi şartlarında şişme potansiyeli ve şişme basıncının belirlenmesi oldukça önemlidir. Ancak bu durumda yapılacak yapıya uygun olarak zemin için daha sağlıklı ıslah yöntemleri ve temel sisteminin seçimi yapılabilir. Zemindeki şişmeden dolayı meydana gelen zararlar göz önüne alındığında yapılar altındaki bu tür zeminlerin ıslahı kaçınılmazdır. Bu amaçla kullanılan etkili yöntem ise kireç katkısı ile stabilizasyondur.

Bu amaçla doğal ve değişik oranlarda Na-bentonit ve kaolen içeren yüksek şişme potansiyeline sahip kil karışımları ve bunların stabilize edilmesi ile elde edilen farklı zeminler üzerinde serbest şişme, şişme basıncı, atterberg limitleri, pH, elektriksel iletkenlik, hidrometre deneyleri yapılarak su muhtevası, uygulanan sıkıştırma enerjisi, stabilizasyon, kür, kür sıcaklığı, donma çözünme ve ıslanma kuruma çevrimleri gibi çevresel şartların şişen zeminlerin özelliklerine etkileri araştırılmıştır.

1.2 Önceki Çalışmalar

Al-Homoud et al. (1995), şişme özelliği gösteren altı farklı kil numunesi üzerinde tekrarlı ıslanma kuruma deneyleri yapmışlardır. Bu çalışmada daha önce Chen (1965), Dif ve Bluemel (1991), Day (1994) ve Osipov (1987) tarafından yapılmış benzer çalışmalar da özetlenerek sonuçlar değerlendirilmiştir. Buna göre tekrarlanan ıslanma kuruma devirleri şişme potansiyelinde azalmaya neden olmuştur. En önemli azalma ilk çevrimde meydana gelirken dört ve beşinci çevrimlerden sonra şişme potansiyelinin dengelendiği belirlenmiştir. İlk ve son çevrimler arasında kil oranı ve plastisite indisinin azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca çalışmanın daha önce Chen (1965) ve Dif ve Bluemel (1991)'in sonuçlarıyla uyduğu ancak Osipov (1987) ve Day (1994)'un sonuçlarıyla tezat oluşturduğu belirtilmiştir. Bu tezat numunenin başlangıç su muhtevasına kadar kurutulmasıyla ıslanma kuruma çevrimleri sonucunda şişme potansiyelinin azaldığı, ancak rötre limitine kadar kurutulduğunda ıslanma kuruma çevrimleri sonucunda şişme potansiyelinin arttığı düşüncesine bağlanmıştır.

Rao et al. (2001), stabilize edilmiş şişen zeminler üzerinde tekrarlı ıslanma kuruma çevrimlerinin etkilerini incelemişlerdir. Islak kum içerisinde ıslanma etkilerinin incelendiği bu çalışmada; dört çevrim sonucunda kireç stabilizasyonun faydalı etkilerinde azalma olduğu gözlemlendiği bildirilmiştir. Dört çevrim sonunda çimentolaşmış agrega oluşumlarının parçalanarak kil oranında artış meydana geldiği belirtilmiştir. Artan kil oranı zeminin likit limit, plastik limit, rötre limiti ve şişme potansiyelini etkilediği bildirilmiştir.

Rao et al. (2000), dört ıslanma kuruma çevrimi geçmişine sahip bir zeminin şişme davranışını incelemişlerdir. Bu çalışmada dört ıslanma kuruma geçmişine sahip büzülmüş durumda olan numuneler tam kurumuş (desiccated) kabul edilmiştir. Deneysel sonuçlar; numunelerin hacimsel şişme potansiyelinin ilk su muhtevasından bağımsızken, başlangıçtaki boşluk oranına önemli ölçüde bağlı olduğunu göstermiştir. Çalışma sonucunda incelenen sıkıştırılmış numuneler için bir optimum boşluk oranının varlığı belirtilmiştir. Bu boşluk oranında sıkıştırılan numuneler sıkıştırıldıktan hemen sonra ve ıslanma kuruma çevrimleri sonrasında benzer hacimsel şişme potansiyelleri gösterdikleri bildirilmiştir.

Katti and Shanmugasundaram (2001), şişmenin şişen killerin mikro yapısındaki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada şişen killerde şişme esnasında mikro yapılarında meydana gelen değişimlerin belirlenmesi amaçlamışlardır. Geliştirilen yeni alet yardımıyla serbest şişme ve şişme basınçları kontrol edilerek deney yapılması sağlanmıştır. Yüzde 0, 50, 75 oranında şişmesine izin verilen doymuş bentonit kili üzerinde X ışını ve SEM analizleri yapmışlardır. Çalışma da şişme miktarındaki artışla birlikte şişme basıncının azaldığını ve tane

boyutunda küçülme olduğu gözlemlenmiştir. Şişme kil aglomeralarının daha küçük parçacıklara ayrılmasına neden olmuştur. Şişmenin mikro yapıdaki bu etkileri killerin gerilme-deformasyon ve hidrolik özellikleri üzerinde önemli etkilere sahip olabileceği bildirilmiştir.

Day (1994), modifiye proktor enerjisi ile sıkıştırılmış siltli killeri farklı sürelerde kür ederek ıslanma kuruma çevrimlerinin şişme büzülme davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Islanma çevrimleri odometre hücresinde standart serbest şişme deneyi yapılarak gerçekleştirilirken, kuru çevrimler güneşin altında numunenin rötre limitinin altında bir değere kadar kurutulması ile sağlanmıştır. Çalışmada, kür süresinin artışı ile bir boyutlu düşey şişmenin önemli oranda azaldığını, ıslak ve kuru çevrimlerin artışı ile şişme büzülme miktarının arttığını, başlangıç su muhtevası düşük olan numunedeki şişme miktarının başlangıç su muhtevası fazla olan numunelere göre daha fazla olduğunu gösterilmiştir.

Al-Mhaidib and Al-Shamrani (1993), kireç ile stabilize edilmiş şişen zeminlerin şişme karakteristiklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada kireç stabilizasyonu için optimum kireç miktarı belirlenmiştir. Buna göre kireç ilavesi %2'den sonra etkili olmuştur. Plastisite indisi ve pH değerlerine göre optimum kireç miktarı %4 iken, serbest basınç mukavemetine göre bu değer %8 olarak bulunmuştur. Kür süresi stabilize edilmiş zeminlerde şişme potansiyelini azaltıcı etki gösterdiğini bildirmişlerdir.

Sivapullaiah et al. (1996), zemin bentonit karışımlarının şişme davranışlarını incelemişlerdir. Bu çalışmada ağırlıkça %10 - %100 bentonite, farklı oranlarda iki farklı silt, iki farklı kaba kum ve kaolinit eklenerek şişme karakteristikleri incelenmiştir. Çalışmada şişme özelliği göstermeyen zemin yüzdesi ve tanelerin boyutunun şişme davranışını önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir. Genel olarak şişmenin, boşluklar arası şişme, ilk şişme ve ikincil şişme olmak üzere üç aşamada meydana geldiği bildirilmiştir. Boşluklar arası şişmenin kil parçacıklarının kaba tanelerin oluşturduğu boşlukları doldurması ile meydana geldiği ve hacim değişimine etki etmediği, ilk şişmenin toplam hacim değişiminin yaklaşık %80'ini oluşturduğu ve boşluklar arası şişme tamamlandıktan sonra meydana geldiği, ikincil şişmenin yavaş ve uzun sürede meydana geldiği, kaba tanelerin miktarının artması ile şişme için gerekli olan sürenin arttığı, toplam şişme miktarının şişme özelliği gösteren kil yüzdesinden çok şişme özelliği göstermeyen yüzdenin tane çapına bağlı olduğu, şişme özelliği göstermeyen malzemenin tane boyutunun artması şişme miktarını önemli ölçüde azalttığı gösterilmiştir.

Komine and Ogata (1995), sıkıştırılmış bentonitin şişme karakteristiklerini teorik olarak araştırmışlardır. ϵ_{sv} adı verilen yeni bir parametreye bağlı olarak şişme deformasyonu ve iki montmorillonit danesi arasındaki mesafenin tayini için yeni bir formül geliştirmişlerdir.

Sıkıştırılmış bentonitin şişme karakteristiklerini önemli ölçüde etkileyen boşluk suyunun iyon konsantrasyonunu, ve bentonitin yüzey alanını değerlendiren yeni denklemler verilmiştir. Bilinen iten ve çeken kuvvetler teorik denklemleri ile yeni geliştirilen denklemler birleştirilerek sıkıştırılmış bentonitlerin şişme karakteristiklerini belirlemek için bir yöntem geliştirilmiştir.

Attom at al. (2001), farklı numune hazırlama tekniklerinin killerin şişme özellikleri ve kayma mukavemetine olan etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmada statik, dinamik ve yoğrularak hazırlanan numuneler üzerinde seri deneyler yapılmıştır. Buna göre; şişme basıncı, şişme potansiyeli ve serbest basınç dayanımı numune hazırlama tekniklerinden etkilendiği belirlenmiştir. Örselenmemiş numuneler sıkıştırılmış numunelere oranla daha yüksek değerler vermişlerdir. Numune hazırlama yöntemlerinden alınan sonuçlar ise, şişme ve serbest basınç değerlerinin dinamik, statik ve yoğurma sıralaması ile azaldığını göstermiştir. Başlangıç su muhtevası şişme basıncı ve serbest şişmeyi etkilemektedir.

Day (1992), sıkıştırılmış killerde doygunlukla şişme arasındaki bağıntıları araştırmıştır. Çalışmada 16.5 ve 12.7 kN/m^3 kuru yoğunlukta sıkıştırılan numuneler 1Pa 'lık sürsaj altında serbest şişmeye bırakılmıştır. Deney sonuçları verilen bir formülde yerine konularak doygunluk dereceleri belirlenmiştir. Deney sonuçları şişme katsayısının sıkıştırma enerjisinden etkilendiğini göstermiştir. Bunun nedeninin yüksek enerji seviyelerinde sert kil topluluklarının yüksek enerji etkisiyle kırılması olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca deney sonundaki doygunluk derecesi ile şişme yüzdesinin doğru orantılı olduğu bulunmuştur. Ancak doygunluk derecesinin potansiyel şişme miktarını belirlemek için güvenilir bir yöntem olmadığı bildirilmiştir. Kullanılan malzemelerde boşluklarda sıkışmış hava nedeniyle şişme tamamlandığında bile doygunluk derecesinin %90'ın altında kaldığı gösterilmiştir.

Sikh (1992), şişen zeminler üzerinde bir araştırma yapmıştır. Çalışmada California bölgesinde bulunan likit limiti 43-74, plastik limiti 25-32 ve plastisite indisi 14-45 arasında bulunan killer kullanılmıştır. Numuneler üzerinde hem serbest şişme hem de şişme basıncı deneyleri yapılarak pratik amaçlarda kullanılacak serbest şişme ve şişme basıncı arasında bir korelasyon verilmiştir.

Türköz (2001), şişen zeminlerin sönmüş kireç ile stabilizasyonunu ve Eskişehir Meşelik killerine uygulanmasını araştırmıştır. Çalışmada Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Meşelik Kampüs alanı içerisinde yer alan ve yüksek plastisiteli siltli kilden oluşan geniş hacimli malzemeden noktasal numuneler alınmıştır. Bu numunelerin şişme potansiyelleri farklı enerji seviyelerinde hazırlanmış numuneler üzerinde yapılan deneylerle belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar; kompaksiyon enerji seviyesinin şişme potansiyeli üzerinde çok önemli etki yaptığını

göstermiştir. Kireç ile stabilize edilmiş zeminler stabilize edilmeyen zeminlere göre daha kısa sürede şişmelerini tamamladıkları, kireç katkısı ile zeminin su muhtevastaki değişimin azaldığı belirlenmiştir.

İpek (1998), şişen zeminlerin kireç, çimento ve uçucu kül kullanılarak stabilizasyonunu incelemiştir. Çalışmada şişen bir zemin %0-8 arasında çimento ve kireç ile stabilize edilmiştir. Ayrıca aynı zemin %0-25 arasında uçucu kül kullanılarak stabilize edilmiş, 7 ve 28 günlük kürlerin etkileri de incelenmiştir. Deneyler sonucunda; katkı maddesindeki artışın, silt miktarını artırırken kil miktarını düşürdüğü, likit limit ve plastisite indisinin azaldığı, %8 çimento, %8 kireç ve %25 uçucu kül katkısının zemin sınıfını değiştirdiği, ilave malzeme miktarının artması ile zeminin aktivitesinin azaldığı, kür süresinin şişme için gereken zamanı şişme potansiyelinde neden olduğu azalmaya oranla daha fazla azalttığı, %3-5 mertebesinde katkı maddesinin şişme potansiyelinin azaltılmasında daha önemli etkiye sahip olduğu bulunmuştur.

Kandemir (1996), zemin emme basıncı ölçümleri ile şişme tahminleri yapmanın olasılığını araştırmıştır. Çalışmada yüksek şişme potansiyeline sahip bir zemin üzerinde psychrometre tekniği ile emme basıncı deneyleri yapılmıştır. Ayrıca aynı zemin üzerinde serbest şişme ve şişme basıncı deneyleri yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda; logaritmik emme basıncı ile su muhtevastı arasında ve emme basıncı ile kuru yoğunluk arasında doğrusal bir ilişki olduğu, emme basıncı ile tahmin edilen şişme miktarının, tam doyumluğa karşılık gelen nihai şişmeyi daha yüksek tahmin ettiği ancak orta şişme değerleri için emme basıncı yönteminin güvenilir tahminler sunduğu, logaritmik şişme basıncı ile zemin emme basıncı arasında lineer bir ilişki olduğu, şişme basıncının sadece başlangıçtaki kuru yoğunluklara bağlı olduğu, şişme deformasyonlarının ise esas olarak başlangıç su muhtevastı ile kontrol edildiği belirlenmiştir.

Yalçın (1997), çevresel kirlilik şartlarının bentonit kilinin şişme/büzülme özelliklerine etkisini araştırmıştır. Deneyler sonucunda çevresel kirlilik şartlarında yapılan ıslak/kuru çevrimler sonucunda çevrim sayısı arttıkça şişme/büzülme özelliklerinde azalmalar görülmüş, şişme potansiyelinin iyileştirilmesi amacıyla ilave edilen kireç miktarı ile serbest şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerlerinde önemli azalmalar olduğu belirlenmiştir.

İkizler vd. (2002), bentonit katkılı Şiran kilinde başlangıç emme gerilmesinin serbest şişmeye olan etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada bentonit katkılı Şiran (Gümüşhane) kilinin su tutma eğrisi belirlenmiş, elde edilen su tutma eğrisi kullanılarak değişik başlangıç emme gerilmesine sahip zemin numuneleri hazırlanmış ve numunelerin serbest şişmeleri izlenmiştir.

Çalışmada serbest şişme yüzdesinin başlangıç emme gerilmesine bağlı olduğu belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalardan başlangıç su muhtevasının artması ile kilin emme gerilmesinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun yanında başlangıç emme gerilmesinin artması ile serbest şişme yüzdesinin arttığı tespit edilmiştir. Sonuçlar başlangıç emme gerilmesinin serbest şişmeyi etkilediğini ve aralarında doğrusal bir ilişki olduğunu göstermiştir.

Keskin vd. (1997), killi zeminlerde emme kapasitesi-şişme basıncı ilişkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada killerin emme kapasitesi ile şişme basıncı arasındaki ilişki incelenmiştir. Deneysel sonuçlara göre; başlangıç su muhtevası arttıkça şişme basıncı ve emme kapasitesinin azaldığı gözlemlenmiştir. Deneylelerden elde edilen sonuçlar dikkate alınarak, emme kapasitesi ve şişme basıncı arasındaki ilişki bulunmuştur.



2. KİL MİNARELLERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ

2.1 Kil ve Kil Mineralinin Tanımı

Kil; doğal olarak oluşmuş, başlıca ince taneli minerallerden meydana gelen, yeterli miktarda su katılınca genellikle plastikleşen ve kuruma veya pışmeyle sertleşebilen malzemedir [32]. Doğada yaygın olarak bulunan killer, öncelikle tarım sektörünün temel taşlarından biri olmakla birlikte, pek çok endüstri dalında hammadde olarak kullanılmaktadır. İnşaat mühendisliğinde killerle temel mühendisliği, yapı malzemesi, baraj inşaatları, her türlü yapıda meydana gelebilecek kazı ve hafriyat çalışmaları gibi çok yaygın bir alanda karşılaşmaktadır.

Killerin doğal oluşum zorunluluğu nedeniyle sentetik malzemeler kil kapsamı dışında tutulur. Ayrıca çok miktarda organik madde içeren turba, bataklık çamuru ve bazı topraklar da kil kapsamı dışında tutulur. Organik maddeler kil içerisinde bulunabilir.

2.2 Kil Minerallerinin Yapısı

Kil mineralleri alüminyum, magnezyum ve demirin kompleks silikatlarıdır. Kil minerallerini iki basit kristal yapı oluşturur.

1. Silika-oksijen tetrahedron: Bu yapıda bir silika atomu dört oksijen atomu tarafında çevrelenmiştir. Tetrahedron birimler gibi Silika tabakaları oluştururlar. Her tetrahedronda tabanda bulunan üç oksijen atomu komşu tetrahedron ile paylaşılır. Artı dört değerlikli her silika atomu, toplam eksi sekiz değerlikli olan dört oksijen atomu ile bağlanır.
2. Alüminyum (veya magnezyum) oktahedral: Bu yapıda bir alüminyum veya magnezyum atomu altı hidroksil ünite ile çevrelenmiştir. Alüminyum oktahedral üniteleri birleşerek Gibsit tabakasını oluşturur. Eğer oktahedral üniteler içerisindeki metalik atomlar magnezyum ise Brusit tabakaları oluşur.

Silika tabakaları oktahedral tabakalar ile birleşirse oksijen atomları hidroksil atomları ile yer değiştirerek nötrleşmeye çalışır. Kil mineralleri iki veya üç tekrarlı tabakadan meydana gelmektedirler.

2.2.1 İki tabakalı kil mineralleri

Bazı kil mineralleri tekrar eden iki tabakalı yapıya sahiptirler. Bir silika tabakası bir gibsit tabakası ile veya bir silika tabakası bir bursit tabakası ile birleşerek iki tabakalı yapıyı oluşturur. Bu tabakalar yaklaşık 72°A kalınlığındadır. Bu tabakalar birbirlerine hidrojen ve ikincil çekim kuvvetleri ile bağlıdırlar. Kaolinit bu gruba ait en önemli kil mineralidir. Ayrıca serpentin ve halloysit mineralleri bu grupta yer alırlar.

2.2.2 Üç tabakalı kil mineralleri

İllit ve montmorillonit bu grubun iki temel üyesidir. Bir üç tabakalı yapı; ortada bir tetrahedral tabaka ile alt ve üstte silika tabakasından oluşur. Tekrarlanan tabakalar kil mineralini oluşturur. İllit tabakaları potasyum iyonları ile bağlanmıştır. Potasyum iyonlarını dengelemek için gereken negatif yük tetrahedral tabakada alüminyum silika yer değiştirmesinden elde edilir. Kristal yapının bozulmadığı bu tarz yer değiştirmeye izomorfus yer değiştirme denir. Montmorillonitin illite benzer bir yapısı vardır. Ancak potasyum iyonları bulunmaz, bunun yerine tabakalar arasında önemli miktarda su vardır.

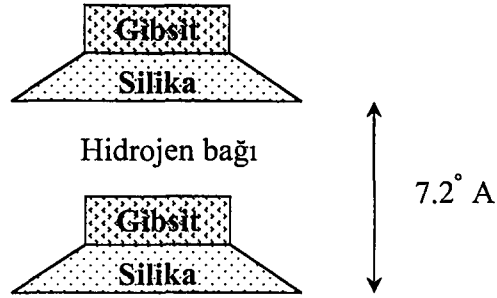
2.3 Kil Minerallerinin Mineralojik Yapıları

Kil mineralleri çok küçük boyutlarda olmalarına rağmen kristal özellik gösterirler. Kristal özelliklerine göre kil minerallerini dört grupta toplamak mümkündür.

1. Kaolinit kil minerali
2. Montmorillonit kil minerali
3. İllit kil minerali
4. Klorit kil minerali

2.3.1 Kaolinit grubu

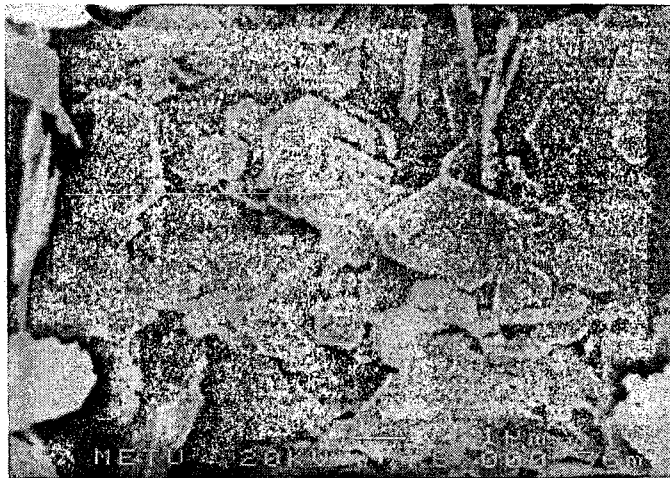
Kaolinit grubu içine pek çok kil minerali girer. Zeminlerin çoğunda bulunur. Bu minerallerin kristalleri levha şeklindedir ve düz kristal üniteleri oluştururlar. Kristal üniteleri bir gibsit ve bir silika tabakasının üst üste gelmesiyle meydana gelmiştir. Her bir tabaka 7.2°A kalınlığındadır. Her bir tabakanın yanal boyutları 1000-20000°A ve kalınlığı 100-1000°A arasındadır. Bu nedenle bunlara 1:1 kristal tipinde olan killer denir. Şekil 2.1'de kaolinit kilinin yapısı şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.1 Kaolinit kilinin yapısı

Kristali oluşturan üniteler birbirine oksijen hidroksit bağı ile sıkıca bağlanmışlardır. Bu yüzden kil ıslandığı zaman kristal üniteleri arasındaki mesafe genişlemez. Kristal üniteleri arasında su moleküllerinin ve katyonlarının girmesi çok güçtür. Bu sebeple kaolinitin efektif yüzeyi sadece dış yüzeylerdir. Bunun sonucu olarak kaolinitin katyon değişim kapasitesi diğer kil mineralleri gruplarından daha düşüktür (3-15 meq/100gr)

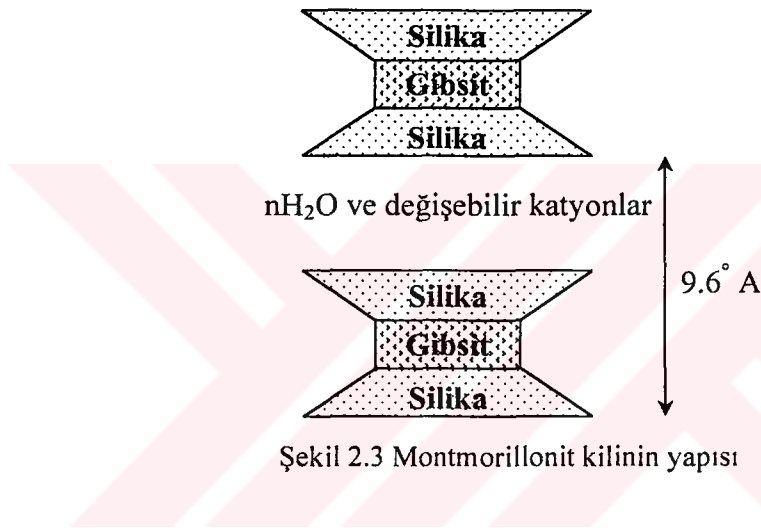
Kaolinit kristalleri montmorillonit kristallerine nazaran daha büyüktür. Diğer silikat kil minerallerinin aksine, kaolinitin plastiklik, kohezyon, büzülme ve şişme özellikleri çok zayıftır. Kaolinit ıslandığı zaman orta derecede bir plastisiteye sahip olurken, diğer kil minerallerinden daha büyük içsel sürtünmeye sahiptir. Özgül yüzeyleri $10 \text{ m}^2/\text{gr}$ civarında, özgül ağırlıkları $2.60\text{-}2.68\text{gr}/\text{cm}^3$ arasındadır. Kaolinit kilinin formülü $2\text{H}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ dir. Kaolinit kiline ait elektron mikroskop fotoğrafları Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Kaolinitin elektron mikroskop fotoğrafı [15]

2.3.2 Montmorillonit grubu

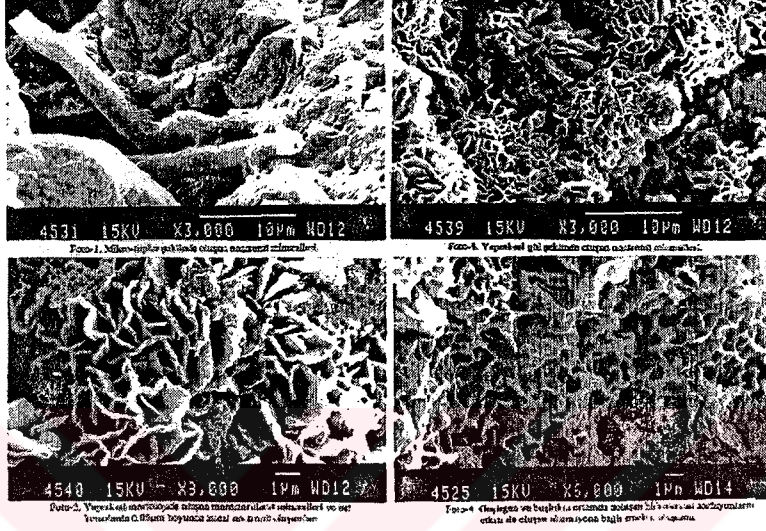
Bu grupta montmorillonitlen başka saponit, hektorit, nontronit gibi mineraller de vardır. Montmorillonit kristali alt ve üstten iki silika tabakası ile kuşatılmış bir gipsit tabakasından ibaret kristal ünitelerinin üst üste gelmesiyle oluşmuştur. Silis ve gipsit tabakaları oksijen atomuyla birbirine bağlanmıştır. Montmorillonit kristalleri 2:1 tipindedir. Yani iki silika tabakası ve bir gipsit tabakasından oluşan ünitelerden meydana gelmiştir. Montmorillonit kilinin yapısı Şekil 2.3'de şematik olarak gösterilmektedir.



Kristal üniteleri birbirine su ve katyonlar ile bağlanmıştır ve kristal üniteleri arasındaki mesafe kolayca genişleyebilir. Montmorillonit kristallerinin çapları 0.01- 2 mikron arasında değişir. Kristal üniteleri arasındaki mesafe kolayca genişleyebildiğinden katyonlar ve su molekülleri üniteler arasına girebilir. Böylece montmorillonit miktarı yüksek olan killer ihtiva ettikleri değişebilir katyonların tabiatına bağlı olarak önemli miktarda şişme veya büzülme gösterebilirler. Montmorillonit kil kristalinin dış yüzeylerine ek olarak geniş iç yüzeyleri mevcuttur. Bu iç yüzeyler de negatif elektrikle yüklüdür. Bu yüzden montmorillonit kili yüksek bir katyon değişim kapasitesine sahiptir. Bu kapasite kaolinitin 10-12 katı, yaklaşık 80-150meq/100gr.'dır. Montmorillonit (Smektit) grubu kil minerallerinin elektron mikroskop fotoğrafı Şekil 2.4'de gösterilmektedir.

Suyun kristal üniteleri arasına girmesiyle montmorillonit kristalleri büyük oranda genişler ve şişerler. Montmorillonit yaprakları suyla sarılmış olup ıslandıkları zaman yüksek plastisiteye ve düşük içsel sürtünmeye sahiptir. Kurudukları zaman çok miktarda büzülme ve çatlama meydana gelir. Bu gruptaki killerin özgül yüzeyleri 800 m²/gr civarında, özgül

ağırlıkları $2.2-2.3 \text{ gr/cm}^3$ arasındadır. Bu gruptaki killerin genel formülü $(\text{OH})_4\text{Si}_8\text{O}_2\text{NH}_2\text{O}$ şeklindedir.

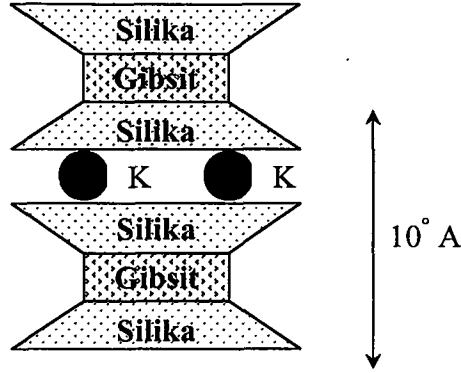


Şekil 2.4 Montmorillonit (smektit) grubu kil minerallerinin elektron mikroskop fotoğrafı [15]

2.3.3 İllit grubu

Genel yapısı bakımından montmorillonitlere benzemekle birlikte tane boyutları daha büyüktür. Kristal yapısı 2:1 şeklindedir. Silis tabakasındaki silisin %15'i amorfus yer değiştirmelerle alüminyumla yer değiştirir. K^+ iyonları açıkta kalan yükleri doldurur. Bu iyonların üniteler arasında yer aldığı ve üniteleri bağladığı kabul edilir. Bu sebeple kristal üniteleri arasındaki mesafeler fazla genişleme göstermezler.

İllit kilinin şişme özelliği montmorillonitten az, içsel sürtünme açısı fazladır. İllit minerallerinin özgül yüzeyleri $80\text{m}^2/\text{gr}$ civarında, özgül ağırlıkları $2.64-3.0 \text{ gr/cm}^3$ arasındadır. Bu gruptaki kil minerallerinin formülü $(\text{OH})_2\text{Al}_2\text{Si}_{4-x}\text{Al}_x\text{O}_{10}$ $0.5 < x < 0.75$ şeklinde gösterilir. Şekil 2.5'de illit kilinin yapısı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5 İllit kilinin yapısı

2.3.4 Klorit grubu

Demirli taşlar içinde yeşil renkte ve zengin phyllit'li mineralleri belirtmek için bu terim kullanılmaktadır. Kloritler kristalin şistler, hidrotermal taşlar, ve çok sayıda silikatların alterasyonundan meydana gelmektedir. Aktüel sedmanlar, toprak ve sadimenter kayalar içerisinde bulunurlar. Bazı sedimanların başlıca kompozisyonlarını kloritler oluşturur. Klorit daneleri dört katlı (2:1:1) yapısal tabakaya sahiptir. Kloritlerin kristal yapılarını mika ve brusit tabakaları meydana getirir [41].

2.4 Killerin Fiziko-Kimyasal Özellikleri

2.4.1. Spesifik yüzey alanı

Kil danelerinin spesifik yüzey alanı dane davranışına etki eden en önemli özelliklerden biridir. Bunun nedenleri;

- 1- Flokülasyon, dispersiyon ve iyon değişimi spesifik yüzey olayına bağlıdır.
- 2- Spesifik yüzey alanı, kil mineralinin dane çapına ve şekline bağlıdır.

Çift tabaka kalınlığı kil danesinin yüzey alanına direkt olarak bağlıdır. Çift tabaka kalınlığı yüzey alanı arttıkça artmaktadır.

2.4.2 Elektriksel iletkenlik

Kil-su sisteminin elektriksel iletkenliği, ortamın elektrik taşıma kapasitesinin bir ölçüsüdür. Kil-su sisteminin elektriksel iletkenliği, karışımdaki iyonların tipi ve sayısı ile ilgilidir. Dane konsantrasyonu artarsa, kil yüzeyindeki iyonlar solüsyona karışır. Elektriksel alan altındaki katyon iyonlarının iletkenliği ve koloidal danelerin hareketi solüsyonun iletkenliğini arttırmaktadır.

Bir danede elektriksel yükün değeri doğrudan o danenin yüzey alanı ile ilgilidir. Bu nedenle o danenin davranışına etki eden elektriksel kuvvetlerin kitle kuvvetlerine göre değeri de danelerin birim kütesine düşen yüzey alanı ile ilgilidir. Dane birim kütesine gelen yüzey alanı danelerin davranışına etki eden elektriksel yükün mertebesini gösterir.

2.4.3 pH değeri

Karışımın yüksek pH değeri kil danelerini dispers yapmakta ve kil daneleri yüzeyindeki negatif yükü arttırmaktadır. Dolayısıyla daneler arasındaki itmeyi arttırmaktadır. pH değeri, ortamda H^+ veya OH^- iyonlarının bulunma derecesini ifade etmektedir. pH değişimi zemin/su karışımını önemli ölçüde etkilemektedir. Düşük pH değeri, toprakta flokülasyonu ve gevşek zemini ifade etmektedir, yüksek pH değeri ise dispersiyonu ve sıkı zemini belirtir.

pH değeri kil danelerinin adsorpsiyon karakterlerini etkiler. Asit durumunda adsorpsiyon artar. Kil danelerinin köşeleri pozitif yükü yüklenir, pH değerinin düşük olması kil dane yüzeyinin elektriksel potansiyelini azaltmaktadır.

pH değeri şişen zeminlerin kireç ile stabilizasyonunda, optimum kireç miktarının belirlenmesi amacıyla da kullanılmaktadır. Bu yöntemde pH değeri 12,40 sınır değer olarak belirlenmiştir. Zemine artan miktarda kireç ilave edilerek pH değeri ölçülür. 12,40 pH değerini sağlayan miktar, optimum olarak belirlenir.

2.4.4 Katyon değişim kapasitesi (KDK)

Katyon değişim kapasitesi, izomorfus yer değiştirme kapasitesinin bir ölçüsüdür. İzomorfus yer değiştirme olayı kristal yapıda herhangi bir değişiklik olmadan iyonların yerlerine eşit veya farklı değerli başka iyonlara bırakmasıdır. Zeminde alüminyumun çok olduğu bir yerde bir silikon atomunun yerini bir alüminyum atomunun alması örneğinde olduğu gibi böyle bir durumda silikon +4, alüminyum +3 olduğu için bu değişimle her değişim için bir dengelenmemiş elektrik yükü ortaya çıkar. Böylece iyonlar eş boyutlu olmadıkları için kristal yapıda şekil bozulması olur.

Bunun bir sonucu, kristal yapının büyümesi engellenmektedir. Kaolinit kilinde bu tip değişimler az olup kaolinit kil daneciğinin elektriksel yükü göz önüne alınırsa yaklaşık her 400 silikon iyonundan birisinin bir alüminyum iyonu tarafından tutulduğu söylenebilir.

İzomorfus yer değiştirme kil danelerine negatif yük sağlamaktadır. Bu dengesizliği önlemek için ortamdaki katyonlar kil danelerinin kenarlarına ve bloklar arasına girmektedir. Bu katyonlar birçok durumda yerlerini bir başka katyona da bırakabilmektedir. Yük dengesizliğini giderebilmek için gerekli katyon miktarına katyon değişim kapasitesi denir. Katyon değişim

kapasitesi spesifik yüzey alanının artması ile artmaktadır. Katyon değişim hızı kil mineraline, katyonlarına ve anyonlarına bağlıdır [11].

Killerde katyon değişiminin nedenleri:

1) Silika-alümina birimlerinin kenarlarındaki kırık bağlar, katyonlarla dengelenmiş olan doyurulmamış yükler oluşturur. Dane boyutu küçüldükçe kırık bağ sayısı ve buna bağlı olarak da katyon değişim kapasitesi artar. Kaolinit kilinde kırık bağlar katyon değişiminin en önemli nedenidir. Montmorillonit kilinde ise katyon değişiminin %20'si kırık bağlardan, %80'i örgü içi yer değiştirmelerden ileri gelir.

2) Örgü içi yer değiştirme ile örgü içinde dengelenmemiş yükler oluşur ve yüklerin çoğu, adsorbe edilmiş katyonlarla dengelenmiştir.

3) Açıktaki hidroksillerin hidrojeni değişebilir katyonlarla yer değiştirebilir. Bu etki de Kaolinit kilinde önemlidir.

3. ŞİŞEN ZEMİNLERİN ÖZELLİKLERİ

3.1 Şişme Potansiyeline Sahip Arazinin Tanımlanması

Şişme potansiyeline sahip bir arazi üzerine yapılacak herhangi bir yapı veya yolu etkileyecek iki önemli faktör vardır.

- Zeminin şişme – büzülme potansiyeli
- Zemindeki su miktarını değiştirebilecek çevresel koşullar

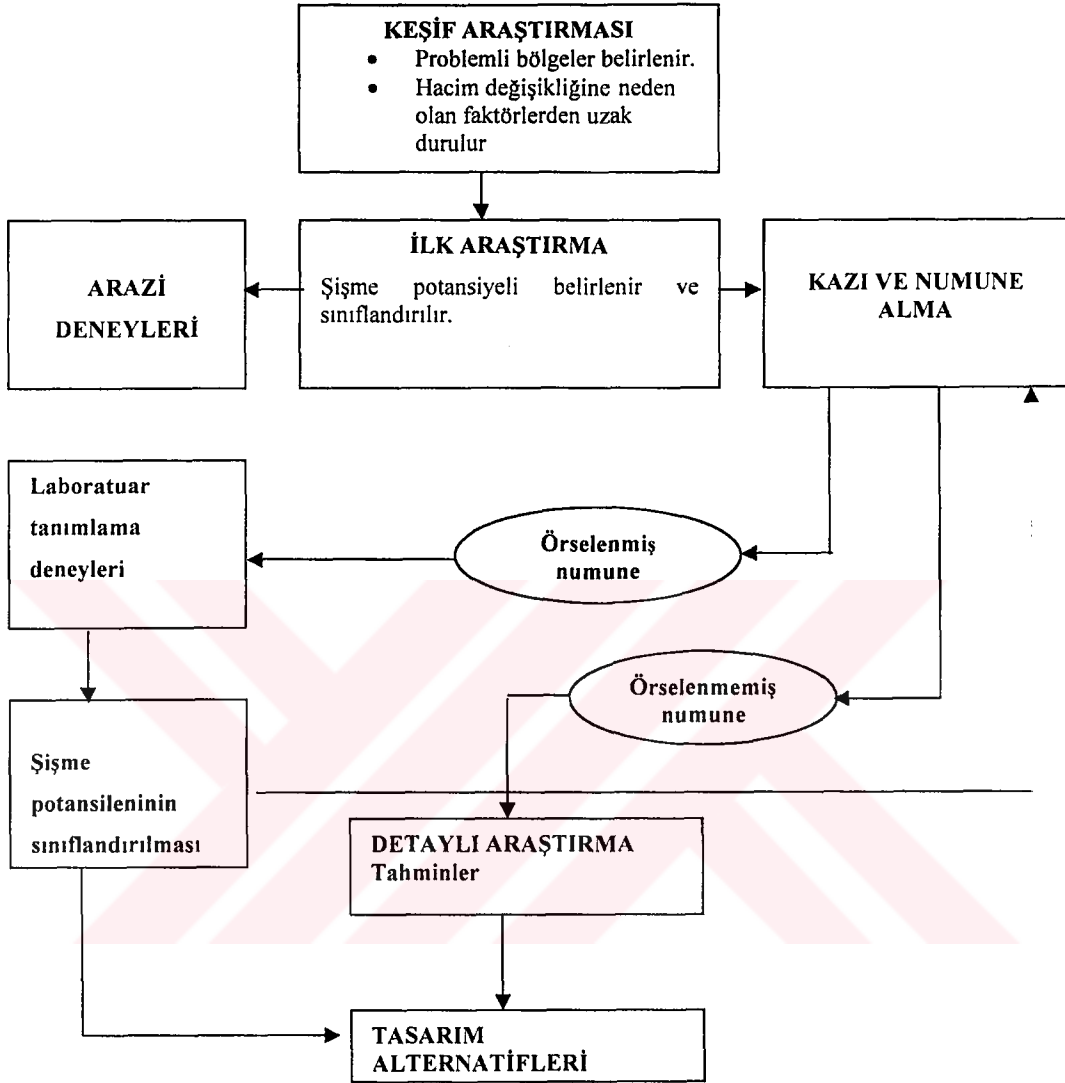
Herhangi bir arazinin geoteknik araştırmasında zemin profilinin ve profili oluşturan zeminlerin fiziksel özellikleri belirlenmelidir. Eğer şişme potansiyeline sahip bir zeminle karşılaşmış ise su muhtevasını değiştirebilecek çevresel koşullar ve bunların şişme potansiyeline olası etkileri değerlendirilmelidir. Çevresel koşullar şişme davranışını en az zeminin özellikleri kadar etkilemektedir.

Normal zemin araştırmaları genellikle şişen zeminler hakkında yeterli bilgiyi vermemektedir. Eğer şişen zemin ile karşılaşılırsa, evler ve tek katlı yapılar gibi basit yapılarda bile, daha kapsamlı arazi çalışmaları ve özel deney programları uygulanmalıdır. Büyük bir proje için arazi incelemesi; paranın optimum kullanımı ve yeterli verinin toplanması aşamalarından oluşmaktadır.

3.1.1 Araştırmanın Planlanması

Bir araştırma üç aşamadan oluşmalıdır. Bunlar; keşif, ilk araştırma ve nihai araştırmadır. Aşağıda uyulması gereken adımları gösteren bir çizelge verilmiştir (Şekil 3.1).

1. Keşif ilk adımdır. Bu aşama harita kullanımını, arazi veya havadan yapılan gözlemlerin ve yerel deneyimlerin değerlendirilmesini kapsar.
2. İlk araştırma arazide bulunan zeminin şişme – büzülme potansiyelinin bulunup bulunmadığının belirlenmesini amaçlar. Bu araştırma birkaç numune alınarak bunların ilk laboratuvar deneylerini ve analizlerini içerir. Zemin profili olabildiğince az aralıklarla belirlenir ve zemin tanımlanarak sınıflandırılır. Şişme – büzülme potansiyeli değişik yöntemlerle belirlenebilir. İlk araştırma sonuçlarına göre daha detaylı bir son araştırma yoluna gidilebilir.



Şekil 3.1 Arazinin tanımlanması için takip çizelgesi [26]

3. Detaylı araştırma zemin profilinin detaylı olarak belirlenmesini, zemin özelliklerinin detaylı olarak belirlenmesini ve arazideki şişme büzülme potansiyelin detaylı olarak değerlendirilmesini kapsar. Bunun için özellikle örselenmemiş numuneler üzerinde çalışılır. Ancak örselenmemiş numune alımı oldukça zor ve pahalıdır. Bununla beraber iyi yetişmiş işçiler ve iyi bir arazi kontrolü ile standart yöntemler kaliteli numune alınmasını sağlayabilmektedirler.

3.2 Zeminlerin Şişme ve Büzülme Potansiyelini Etkileyen Faktörler

Şişme özelliğine sahip killerde şişme mekanizması oldukça komplekstir ve çok sayıda faktörden etkilenmektedir. Şişme, zeminin su sisteminin değişerek içsel gerilmelerin bozulması sonucunda oluşmaktadır. Kil parçacıkları yüzeylerinde negatif , köşelerinde pozitif elektrik yükü taşıyan tabakalı bir yapıya sahiptirler. Negatif yükler zemin suyundaki iyonlarla dengelenirler, böylece taneler birbirleri ile elektriksel bağlarla bağlanırlar. Partiküller arası elektriksel kuvvet alanı, negatif yüzey yüklerinin ve zemin suyu elektro kimyasının bir fonksiyonudur. Kil kristalleri ve su molekülleri arasındaki Van der Walls yüzey kuvvetleri ve emme kuvvetleri, bu kuvvet alanını etkilemektedir. İç elektro kimyasal kuvvet sistemi, dıştan uygulanan gerilmeler ve zemin suyundaki kapiler gerilmeler ile denge içerisinde olmalıdır [7].

Eğer zemin suyunun kimyası, su muhtevası veya kimyasal kompozisyon ile değişirse kuvvet alanı da değişir. İç kuvvetlerde oluşan toplam değişim, dış kuvvetler tarafından dengelenmezse, iç kuvvetler dengeleninceye kadar partikül boşlukları değişecektir. Bu değişim, şişme ve büzülme olarak karşımıza çıkacaktır.

Zeminin plastisitesi ve yoğunluğu gibi fiziksel özellikleri, şişme mekanizmasının etkilediği veya etkilendiği çok sayıdaki faktördendir. Zeminin büzülme şişme özelliklerini etkileyen faktörler üç grupta incelenir [39].

- İç kuvvet alanının doğal yapısını değiştiren zemin karakteristikleri
- İç kuvvet sisteminde değişikliğe yol açan çevresel faktörler
- Gerilme durumu

Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de şişme ve büzülme davranışını etkileyen zemin ve çevre faktörleri özetlenmiştir.

3.2.1 Zemin karakteristikleri

Zemin karakteristikleri mikro ve makro ölçekli faktörler olarak düşünülebilir. Mikro ölçekli faktörler, zeminin mineralojik ve kimyasal özelliklerini içerir. Makro ölçekli faktörler ise zeminin mühendislik özelliklerini içerir. Mikro ölçekli faktörler makro ölçekli faktörlere önemli ölçüde etki etmektedir.

3.2.1.1 Mikro ölçekli faktörler

Kil türleri her mineraldeki farklı elektriksel alan nedeni ile farklı şişme potansiyelleri gösterirler. Bir zemin kütlelerinin göstereceği şişme miktarı zemin içerisindeki kil mineralinin miktarına ve türüne, dağılımına, özgül yüzey alanına ve bu parçacıkları saran yer altı suyunun kimyasına bağlıdır.

Birçok kil mineralinde atomlar kristal kafes oluşturacak düzende birleşmişlerdir. Kristal kafes kristal yapı içerisindeki atom ve iyonların üç boyutlu olarak tekrarlı bir yapı meydana getirmesi ile oluşmaktadır. Kil minerallerinin önemli bir özelliği kristal yapılarının küçük olmasıdır. Kristal yapının belirlenmesi için elektron mikroskobu ve X ışını yöntemleri kullanılmaktadır. Kimyasal analizlerle de değişik kil mineralleri tanımlanabilmektedir. Ancak, her grup benzer mühendislik özellikler gösterdiği için yapısal gruplamalar yapmak daha uygundur.

Çizelge 3.1 Şişme büzülme potansiyelini etkileyen zemin özellikleri [26]

Faktör	Açıklama
Kil mineralojisi	Hacim değişikliklerine yol açan tipik kil mineralleri montmorillonitler, vermikülitler, ve bazı karıştırılmış tabaka mineralleridir. İllit ve kaolen tane çapları çok küçük(1/10 mikron) olmadığı sürece önemli hacim değişikliklerine neden olmazlar.
Zemin suyu kimyası	Şişme iyon konsantrasyonunun ve iyon değerinin artması ile önlenir. Örneğin Mg^{+2} iyonunun zemin suyunda olması durumunda Na^{+} iyonu bulunması durumuna göre daha az şişme olacaktır.
Zeminin emme basıncı	Zeminin emme kapasitesi efektif gerilmeden bağımsızdır, doymun olmayan zeminlerde negatif boşluk basıncı ile gösterilir. Zeminin emme kapasitesi doymunluk, yerçekimi, boşluk boyutu ve şekli, yüzey gerilmeleri, ve zemin parçacıkları ve zemin suyunun elektriksel ve kimyasal karakteristiklerine bağlıdır.
Plastisite	Genelde, geniş su muhtevası aralığında plastik davranış gösteren ve yüksek likit limit değerini ifade eden zeminler daha büyük şişme – büzülme potansiyeline sahiptirler. Plastisite şişme potansiyeli için belirleyici bir özelliktir.
Zemin yapısı	Floküle zeminler dağıtılmış zeminlere nazaran daha fazla şişme eğilimi gösterirler. Çimentolaşmış partiküller şişmeyi azaltırlar. Örselenme veya yüksek su muhtevasında kompaksiyon edilme zemin yapısını değiştirir. Yavaş kompaksiyonun daha düşük su muhtevasındaki statik kompaksiyona nazaran daha düşük şişme potansiyeli sergilediği gösterilmiştir.
Kuru yoğunluk	Yüksek yoğunluklar daha sıkı bir yapıyı gösterir, bu da tanecikler arasında daha fazla itme kuvvetini ve daha yüksek şişme potansiyelini gösterir.

Çizelge 3.2 Şişme büzülme potansiyelini etkileyen çevresel faktörler [26]

Faktör	Açıklama
1. İlk su içeriği durumu	Şişen bir zemin kuru iken daha fazla su içeren aynı zemine nazaran suya karşı daha hassas davranış gösterir, veya daha fazla emme kapasitesine sahiptir. Buna zıt olarak; daha nemli bir zemin kuruma ile daha kuru bir nem durumundaki zemine nazaran daha fazla büzülür, Zeminin başlangıçtaki emmesi beklenen son emme kapasitesi ile birlikte değerlendirilmelidir.
2. Su içeriği değişimi	Zemin profilinin üstünde yer alan aktif zon (bölge) ilk şişmeyi belirleyecektir. Bu tabakalarda su içeriği değişimi ve şişme maksimum değerlerde görülür.
2.1. İklim	Yağış ve buharlaşma miktarı ve değişimi nem miktarına ve mevsimsel nem değişimini önemli ölçüde etkiler. En fazla mevsimsel kabarma yarı kuru mevsimlerde diğer adıyla kısa ıslak periyotlarda görülür.
2.2. Yer altı suyu	Sığ yer altı su seviyeleri su içeriğinin artmasına neden olurken değişen seviyeli yer altı suları su muhtevasına etki ederler.
2.3 Drenaj ve suni su kaynakları	Yüzeydeki drenaj koşulları özellikle üst tabakalardaki (aktif zon) su miktarını etkileyerek büzülme – şişme potansiyeline önemli etkide bulunurlar.
2.4. Bitki örtüsü	Ağaçlar, çalılar, ve otlar zemindeki suyu çekerler, buda bitki örtüsünün durumuna göre zemindeki su miktarının değişimine neden olur.
2.5 Permeabilite	Yüksek permeabiliteli zeminler, özellikle çatlak veya boşluk içeren zeminler, suyun daha çabuk hareketini ve dolayısıyla daha çabuk şişmeye neden olurlar.
2.6 Sıcaklık	Sıcaklık artışı suyun yol ve binaların altına hareketine neden olur.
3. Gerilme koşulları	
3.1. Gerilme tarihesi	Aşırı konsolide bir zemin aynı boşluk oranına sahip normal konsolide bir zemine nazaran daha yüksek şişme potansiyeline sahiptir. Şişme basıncı sıkıştırılmış killerin yaşlanması ile artabilir, ancak hafif yüklemeler altındaki şişme miktarının zamandan etkilenmediği gösterilmiştir. Tekrarlı ıslanma ve kuruma laboratuvar şartlarında şişmeyi arttırma eğilimi göstermekle birlikte belirli bir sayıdaki ıslatma kuruma işleminden sonra şişme özellikleri değişmemektedir.
3.2 Arazi koşulları	Zemindeki ilk gerilme durumu; zeminin yüklenmesi durumunda oluşabilecek değişimlerin ve su muhtevası değişimlerinin değerlendirilebilmesi için önemlidir. İlk efektif gerilme değeri numune alınarak laboratuvarda test edilerek belirlenebileceği gibi arazi gözlem ve ölçmeleri ile de belirlenebilir.
3.3 Yükleme	Sürsaj yükünün büyüklüğünün belirlenmesi belirli bir su içeriği ve yoğunluk değeri için oluşacak hacim değişikliğinin belirlenmesini sağlar. Uygulanacak dış yükler itici iç kuvvetleri dengeleyerek şişmeyi engeller.
3.4 Zemin profili	Şişen tabakanın kalınlığı ve yeri potansiyel hareket üzerinde önemli etkiye sahiptir. En fazla hareket potansiyeli şişen zeminin yüzeyden aktif zonun sonuna kadar olması durumunda olur. Şişen zeminin şişme özelliği bulunmayan bir zeminle kaplanması veya kaya tabakasının üzerinde ince bir şişen zemin kütesinin bulunması durumunda daha az hareket oluşacaktır.

Mühendislik amaçlar için üç önemli yapısal kil minerali grubu aşağıda tanımlanmıştır.

- Kaolinit grubu: Genelde şişme özelliği göstermez.
- Mika grubu: Şişme özelliği gösterebilen ancak önemli problemler çıkartmayan illit ve vermikülit kil minerallerini içerir.
- Smektit grubu: Yüksek şişme potansiyeline sahip en problemlerli mineraller olan montmorillonitleri içerir.

Her üç grupta tabakalı kristal yapıya sahiptir. Mineralojik ayırım, farklı tabakaların birleşme şekline ve hangi bağımsız yapıların birleştiğine bağlı olarak yapılmaktadır. X ışını yöntemi bağlı tabakaların kalınlığını ve aralığını ölçer. Önemli kil minerallerinin partikül ve mühendislik özellikleri Çizelge 3.3'te gösterilmektedir.

Çizelge 3.3 Bazı kil minerallerinin partikül ve mühendislik özellikleri

Mineral Grubu	Basal Aralık (A°)	Partikül Özellikleri	Tabakalar Arası bağ	Özgül Yüzey (m ² /g)	Atterberg Limitleri			Aktivite (PI/% Kil)
					LL(%)	PL(%)	SL(%)	
Kaolinit	114.4	Kalın, sert 6 kenarlı tabakalar 0.1-4x0.05-2 µ	Güçlü hidrojen bağları	10-20	30-100	25-40	25-29	0.38
İllit	10	İnce, tabakalı 0.003-0.1x1-10µm	Güçlü potasyum bağları	65-100	60-120	35-60	15-17	0.9
Montmorillonit	9.6	İnce, saydam, tabakalar >10 A°x1.0-10µm	Çok zayıf Van der Waals bağları	700-840	100-900	50-100	8.5-15	7.2

Potansiyel şişme miktarı için zemin suyunun kimyası çok önemlidir. Sodyum, kalsiyum, potasyum, magnezyum gibi tuz katyonları zemin suyunda çözülerek kil mineralinde yüzey elektriksel kuvvetlerini dengelemek için kil yüzeyinde tutulurlar. Bu iyonların hidrasyonu ve kil kristalleri arasındaki çekim kuvvetleri kil parçacıkları arasında önemli miktarda su toplanmasına neden olur.

Kuru zeminlerde tuz katyonları kuvvetli elektrostatik ile kil kristal yüzeylerine kapalı durumdadırlar. Su ile birlikte, katyon hidrasyon enerjileri partiküller arası çekim kuvvetlerini yenmeye çalışır. Bu yüzden kuru yoğunluğu düşük olan zeminlerde sıkışık partiküller absorbe katyon hidratları tarafından ayrılmaya zorlanır ve suyun katkısı ile genişirler. Suyun varlığı

devam ettiğinde absorbe katyonlar kil yüzeyinde daha fazla tutulamazlar. Elektrostatik çekim kuvvetleri, iyonların daha seyrek bir çözelti doğrultusunda ayrışması sonucunda dengelenir. Negatif yüklü kil partikül yüzeyleri ve çözeltideki pozitif iyonların yoğunluğu “dağınık çift tabaka (DDL)” olarak tanımlanır. DDL'nin kalınlığı azaldıkça şişme miktarı artar. Diğer bir ifade ile, çözeltideki katyon iyonlarının değerliliği azaldıkça şişme miktarı artacaktır. Örneğin Na^+ iyonları Mg^{+2} ve Ca^{+2} iyonlarına göre daha fazla şişme potansiyeline sahiptir.

3.2.1.2 Makro ölçekli faktörler: plastisite ve yoğunluk

Zeminin makro ölçekli özellikleri zeminin mikro ölçekli yapısını yansıtır. Makro ölçekli özellikler, mikro ölçekli özelliklere nazaran daha kolay belirlenebildiğinden şişme özelliklerinin belirlenmesi için daha uygundur. Plastisite ve yoğunluk şişen zeminler hakkında önemli bilgilere ulaşmamızı sağlar.

Atterberg limitleri ile belirlenen zemin kıvamı şişen zeminler için en yaygın kullanılan belirleme yöntemidir. Şişen zeminlerin birçoğu geniş bir su içeriği aralığında plastik kıvamını korur. Bu özellik zeminin büyük miktarda su tutması ve bu konumda elektriksel kuvvetler nedeni ile kohezif bir yapının oluşmasından kaynaklanır. Zeminin plastisitesi, şişme potansiyelini kontrol eden mikro ölçekli faktörlerden etkilendiği için şişme potansiyelinin kullanışlı bir göstergesi olarak kabul edilir.

Partiküller arasındaki elektriksel kuvvet alanı, parçacıklar arasındaki boşluklarla ilişkilidir. Bu yüzden, kuru yoğunluk ve partiküllerin fiziksel birleşimi şişme potansiyelini etkileyecektir. Kompaksiyon veya doğal yükler altında artan zemin yoğunluğu daha büyük miktarlarda şişmeye ve daha yüksek şişme basınçlarına neden olur.

3.2.2 Çevresel koşullar

Zeminin suyu emme yada atma potansiyeli, zeminin başlangıç durumundaki su içeriğine bağlıdır. Başlangıçtaki su içeriği zeminin su içeriği limitlerine bağlı olarak büzülme şişme potansiyelini etkileyecektir.

Su içeriği tek başına zeminin büzülme şişme potansiyelini belirlemek için yeterli değildir. Bunun yerine limit su içeriği değerleri, plastik limit ve rötire limiti değerleri belirlenmelidir. Rötire limitinin altındaki su içeriği değerlerinde hacim değişikliği görülmez. Plastik limit değerinin üzerinde yine büyük hacim değişiklikleri görülmez. Zemin profiline suyun etkimesi Çizelge 3.2'de de gösterildiği gibi çevresel veya suni faktörlerden etkilenir. Genellikle zeminin üstteki birkaç metresi en fazla su muhtevası değişimine maruz kalır. Bu derinlikte aynı zamanda efektif toprak yükü düşük ve zemin üzerinde hareketi engelleyen

herhangi bir etki yoktur. Zemin profilinin üst tabakası büzülme ve şişmenin en önemli bölümünü gerçekleştirir. Bu yüzden bu bölgeye “aktif zon” adı verilmektedir.

Aktif zondaki su içeriği tekrarlı mevsimsel değişimlerden etkilenir. Yüzeydeki nem koşulları bir binanın tabanı, yol gibi basit bir bariyer ile önemli ölçüde değişir. Bu bariyer suyun buharlaşmasını engelleyerek altta kalan zeminin nem profilini değiştirir.

Su içeriği değişimine neden olan diğer sebepler, drenaj koşulları, yada sulama gibi insan yapımı su kaynaklarıdır. Bu faktörleri kontrol etmek zor olsa da şişen bir zeminle karşılaşıldığında kontrol edilmesi zorunludur. Örneğin, uygun drenaj ve çevre düzenlemesi ile bina etrafındaki zeminde oluşabilecek su muhtevası değişimi minimuma indirilebilir.

3.2.3 Gerilme durumu

Hacimsel değişme zemin içindeki gerilme durumunun değişimi ile doğrudan ilişkilidir. Bir kazı sırasında kaldırılan yükü azalan gerilme sonucunda yüzeyde kabarma oluşacaktır. Doymun olmayan zeminlerde kabarma suyun etkisine ve zamana bağlıdır. Doymun zeminlerde zemin davranışını belirleyen gerilme durumu efektif gerilme ile ifade edilir.

$$\sigma' = (\sigma - u_w) \quad (3.1)$$

Burada; σ' = efektif gerilme

σ = toplam gerilme

u_w = boşluk suyu basıncı

Bu durumda gerilme durumu katı ve su kaynaklı olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Doymun olmayan zeminlerde üçüncü bir bileşen, hava da hesaba katılmalıdır. Doymun olmayan zeminlerde efektif basınç ifadesinde boşluklardaki hava ve boşluk suyu ile boşluk havası arasındaki ilişkide hesaba katılmalıdır. Bu durumda u_a boşluk havası basıncı ve μ boşluk suyundaki kapiler çekme kuvvetleri dikkate alınmalıdır. μ terimi sık sık emme gerilmesi (suction) olarak ifade edilir.

Geoteknik mühendisler doymun zeminlerde gerilme durumunu yalnız bir gerilme parametresi, $(\sigma - u_w)$ ile tanımlarlar. Doymun olmayan şişen zeminlerde iki gerilme parametresi düşünmek gerekir çünkü davranış zeminin emme gerilmesinden etkilenmektedir.

Gerilme değişimine neden olan su içeriği değişimi aynı etkiyi yapan diğer faktörlerle (mevcut bina vs.) birlikte düşünülmelidir. Örneğin bir binanın düşey yükü şişmeyi engellerken aynı bina sebebiyle zemindeki su içeriği artar, bu da şişmeye sebep olur. Bundan dolayı, arazi

araştırmaları sadece geostatik gerilme değişimlerini tahmin etmekle kalmayıp, zeminin su eğilimini de etkileyen çevresel faktörleri de içermelidir.

3.2.4 Aktif zon

Şişen zemin problemleri, tipik olarak su içeriğinin zeminin üst kısımlarında artması sonucu ortaya çıkar. Çok nadir olarak derin kaynaklı şişmeye rastlanmıştır. Üstte kalan bu birkaç metrede su içeriği iklimsel çevre faktörlerinden etkilenir. Bu bölge “mevsimsel dalgalanma bölgesi veya aktif zon” olarak tanımlanır. Aktif zondaki su içeriği dağılımı iklimsel faktörler ve buharlaşma gibi hidrostatik denge koşullarından farklıdır. Hidrostatik koşullar yer altı su seviyesinin üstünde lineer olarak değişen negatif bir boşluk suyu basıncı (emme) oluşturacaktır. Zeminin su içeriği yüzeyde oluşan buharlaşmadan dolayı alt tabakalardan daha düşük olacaktır.

Eğer yüzeye fazla su eklenir veya buharlaşma engellenir ise su içeriği artacak ve şişme oluşacaktır. Ayrıca ısı da suyun hareketini etkilemektedir. Bu zeminin ısı rejimine bağlıdır. Binaların tabanı altında merkezdeki ısı değişimi kenarlara nazaran daha az olacaktır.

Arazi araştırmaları aktif zon hakkında yeterli bilgiye ulaşmamızı sağlamalıdır. Kuru ve yarı kuru iklime sahip bölgelerde su içeriği bir derinliğe kadar artacak daha sonra sabit kalacaktır. Tüm mevsimlerde su içeriğinin sabitleştiği derinlik aktif zonun sınırını verir. Eğer zemin derinlikle üniform değilse, veya birkaç tabaka mevcut ise zeminde meydana gelen değişiklik, su içeriği yerine (w/PL) veya $((LL-w)/PI)$ kullanılır.

3.3 Şişen Zeminlerin Tanımlanması ve Sınıflandırılması

Şişen zeminlerin projenin keşif ve ön araştırma aşamasında tanımlanması, ileride yapılması gereken numunelerin alınması, deneylerin yapılması ve en son yapılacak tasarım işlemlerinin doğru yapılmasını sağlayacaktır. Bu amaçla yapılacak olan çalışmalar iki önemli aşamaya yönelik olmalıdır. İlk aşama zeminin şişen bir zemin olarak tanımlanması, ikinci aşama ise uygun numunelerin alınarak tasarımda kullanılacak değerlerin belirlenmesidir.

Mühendislik uygulamalarında, şişen zeminleri tanımlamak için tane çapı dağılımı ve Atterberg limitleri gibi klasik deney yöntemlerinden faydalanılır. Bununla beraber, ziraat ve jeolojik amaçlı olarak farklı deney yöntemleri kullanılmaktadır. Bu deneyler, zeminin kimyasal ve mineralojik yapısı hakkında ek bilgiler verdiği için ihmal edilmemelidir. Çizelge 3.4'te bu deneyler özetlenmiştir.

Çizelge 3.4 Şişen zeminleri belirlemek için yapılan laboratuvar deneyleri [26]

Deney	Referans	İncelenen Özellikler	Belirlenen Parametreler
Atterberg limitleri	ASTM Standartları 1991	Plastisite, Kıvam	
Likit limit(LL)	ASTM D – 4308	Plastisitenin üst limiti (w)	$PI=LL - PL$ =plastisite endeksi
Plastik limit(PL)	ASTM D – 4318	Plastisitenin alt limiti (w)	$LL=(w-LL)/(LL-PL)$ =likitlik indisi
Rötre limiti(SL)	ASTM D – 427	Zemin rötresinin alt limiti (w)	R = büzülme oranı L_s = Lineer rötre
Kil yüzdesi	ASTM D – 422	İnce tanelerin dağılımı	2 μm 'den küçük tanelerin yüzdesi
Minerolojik Deneyler	Whittig (1964)	Kil partiküllerinin minerolojisi	
X ışını difraksiyonu	ASTM STP 479	Kristal boyutlarının karakteristikleri	Atom aralıkları
Diferansiyel termal analiz	Barshad (1965)	Isınma karakteristikleri	Termogramlar üzerindeki alan ve genliklerin pik reaksiyonlarının gösterilmesi
Elektron mikroskobu	McCrone ve Delly (1973)	Kil partiküllerinin boyut ve şekli	Partiküllerin görsel olarak değerlendirilmesi
Katyon değişim kapasitesi	Chapman (1965)	Kil partiküllerinin yük ve partiküllerin yüzey aktiviteleri	KDK(meq / 100g)
Serbest Şişme Deneyi	Holtz ve Gibbs (1959)	Havada kurutulmuş konsolide olmamış numunenin ıslanmaya karşı şişmesi	Serbest Şişme $= (V_{yaş} - V_{kuru}) / V_{kuru} \times 100\%$
Potansiyel hacim değişimi	Lambe (1960)	Arazi gerilmelerinin uygulandığı sıkıştırılmış numunenin tek eksenli şişme özellikleri	SI (şişme endeksi) (lb/ft ²) PVC (potansiyel hacim değişimi)
Şişme endeksi deneyi	Uniform Yapı Kodu	% 50 doygunluk derecesindeki numunenin 144 psf sursaj yükü altında tek eksenli şişmesi	Şişme endeksi (EI)
Kaliforniya Taşıma Gücü Deneyi	Yolder ve Witczak (1975) Kassiff vd. (1969)	Sıkıştırılmış numunenin sursaj basıncı altında kısmen ıslatılması durumundaki tek boyutlu şişmesi	CBR (%) Şişme yüzdesi
Lineer genişleme katsayısı (COLE) deneyi	Brasher vd. (1966)	Doğal zemin parçasının 5 psi'den etüv kurusu konumdaki emme basıncı değerinin lineer değişimi	COLE ve LE (%)

3.3.1 Tanımlama deneyleri

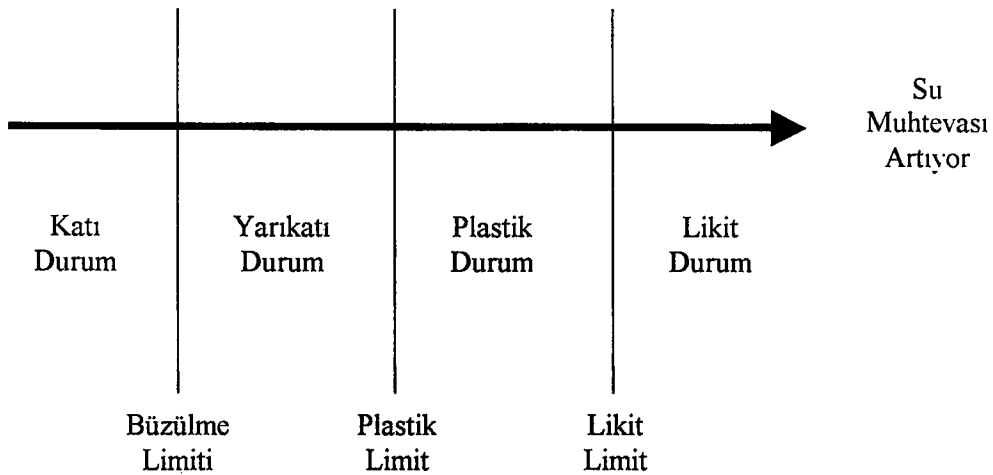
3.3.1.1 Mühendislik sınıflandırma deneyleri

Tane çapı dağılımı, kil içeriği, ve plastisite gibi zeminin indeks özellikleri şişen zeminlerin tanımlanması ve sınıflandırılmasında pratikte en fazla kullanılan yöntemlerdir.

Atterberg limitleri ince taneli zeminlerin kıvam limitlerindeki su muhtevasını belirler. İnce taneli bir zemin dört farklı kıvama sahip olabilir. Şekil 3.2 de bu kıvam ölçüleri ve bunları belirlemede kullanılan su içeriği değerleri görülmektedir. Bu kıvam değerleri zeminin likit, plastik ve büzülme limitleri ile belirlenir.

Atterberg limitleri ve zeminin doğal su muhtevası belirlenerek iki kullanışlı değere ulaşılabilir. Bunlar plastisite indisi (PI) ve likitlik indisi (LI) dir. Özellikle plastisite indisi (PI) değeri şişen zeminlerin sınıflandırılmasında sıkça kullanılır ve ön araştırmalar sırasında mutlaka belirlenmelidir.

Zeminin plastisite karakteri ve hacim değiştirme davranışı; zemin içerisindeki koloidal boyuttaki tanelerle direkt olarak ilişkilidir. Mühendislik amaçlarda koloidal terimi: davranışları yer çekimi kuvvetlerinden çok yüzey kuvvetleri tarafından belirlenen 0.001mm çapından küçük taneler için kullanılır. Kil tanelerin çoğu, düzensiz tane şekilleri nedeni ile kapladıkları büyük yüzey alanları sebebiyle koloidal tane olarak kabul edilir.



Şekil 3.2 Atterberg limitleri ve zemin kıvamı arasındaki ilişki

Atterberg limitleri ve kil içeriği Aktivite adı verilen tek bir parametrede toplanmıştır. Aktivite aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

Aktivite (A_c)= plastisite indeksi / ağırlıkça 2 μ m den küçük tane yüzdesi
Skempton killeri, aktivitelere bağlı olarak üç grupta incelemiştir.

$A_c < 0.75$ aktif değil

$0.75 < A_c < 1.25$ normal aktiviteli

$A_c > 1.25$ yüksek aktiviteli

En fazla şişme potansiyelini aktif killer gösterirler. Bazı kil mineralleri için tipik aktivite değerleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5 Kil minarellerinin aktiviteyi

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

3.3.1.2 Mineralojik yöntemler

Kil mineralojisi şişen zemin davranışını kontrol eden en temel faktörlerden biridir. Kil mineralleri çeşitli yöntemlerle belirlenebilir. En çok kullanılan yöntemler Çizelge 3.4'te gösterilmiştir.

Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı X ışını defraksiyon yöntemidir. X ışını analizinde; X ışını dalga boyunun kil mineralinin atom düzlem aralığı ile uyumu bu yöntemin kil minerallerini belirlemede en uygun yöntem olmasının temel nedenidir.

Diğer sık kullanılan mineralojik yöntemler; diferansiyel termal analiz (DTA) ve elektron mikroskobu yöntemleridir. DTA analizi bir kil numunesinin eş zamanlı olarak ısıtılması ve hareketsiz bir nesneden faydalanılarak yapılmaktadır. Sonuçta uygulanan ısıya karşı değişen sıcaklığı gösteren tomografiler elde edilerek, bu tomografiler saf minerallerin tomografileri ile karşılaştırılır. Her mineral tomografiler üzerinde farklı endotermik ve egzotermik reaksiyonlar göstermektedir.

Elektron mikroskopları kil minerallerini direkt gözleme olanağını vermiştir. Elektron mikroskobu kullanılarak kil mineralinin şekli ve boyutu hakkında yalnızca nitel tanımlamalar yapılabilmektedir.

Kullanılan diğer bazı mineralojik yöntemler ise; kimyasal analiz, infrared spektroskopi, radyo frekansları, elektriksel dağılım gibi yöntemlerdir.

3.3.1.3 Katyon değişim kapasitesi (KDK)

Kil taneleri üzerindeki negatif yüklerin dengelenebilmesi için gereken değişebilir katyonların miktarı, katyon değişim kapasitesi (KDK) olarak bilinir ve meq/100g ile ifade edilir. (meq=100 gram kuru kil için eşdeğer miktar) Deney için; öncelikle zemindeki tuzlar uzaklaştırılarak, zemin bilinen türdeki katyonlarla doyurulur. Değişim meydana gelen bölgeyi doymuş hale getirmek için gereken bilinen türdeki katyonların miktarı analitik olarak belirlenir. Kimyasal analizle orijinal katyon kompleksi belirlenebilir.

KDK kil mineralojisi ile ilgilidir. Yüksek KDK değerleri yüksek yüzey aktivitesini gösterir. Genelde şişme potansiyeli KDK değerleri ile artar. Üç temel kil minerali için tipik KDK değerleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6 Bazı kil minerallerinin KDK değerleri

Kil Minerali	KDK(meq/100g)
Kaolinit	3 –15
İllit	10 –40
Montmorillonit	80 –150

KDK değerinin ölçülmesi genellikle zemin mekaniği laboratuvarlarında bulunmayan detaylı ve hassas deney teknikleri gerektirir. Bununla beraber, bu deney bir çok ziraat laboratuvarında rutin olarak yapılmaktadır ve pahalı bir deney değildir.

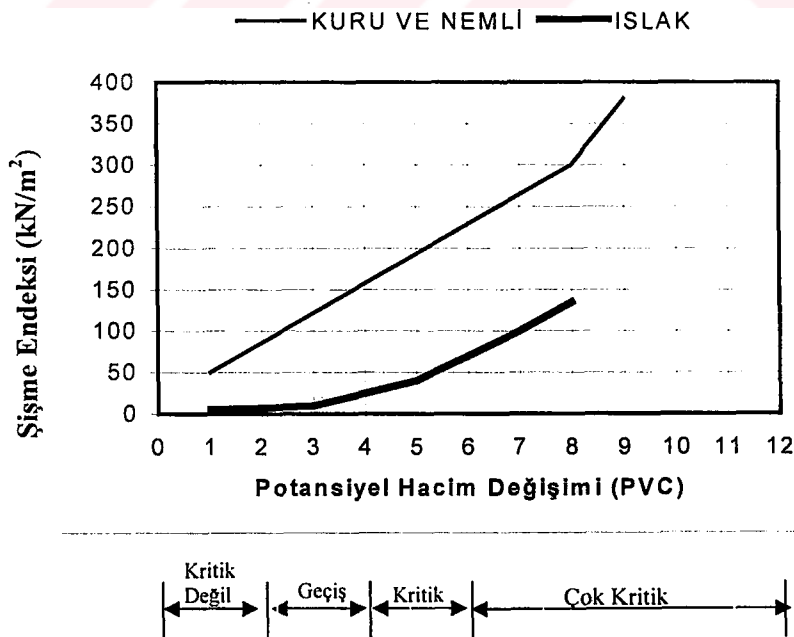
3.3.1.4 Serbest şişme

Serbest şişme deneyi 40 No'lu elekten geçen bilinen bir hacimdeki kuru zeminin, dereceli bir silindire konularak; zeminin tam doymuş haldeki hareketini tamamladıktan sonra şişmiş haldeki hacminin belirlenmesinden ibarettir. Zeminin serbest şişmesi; hacimdeki ilk değişimin ilk hacme olan oranı ile ifade edilir. Yüksek kaliteli ticari bentonitin (sodyum montmorillonit) serbest şişmesi, %1200-2000'dir. Holtz ve Gibs(1956), %100 gibi düşük şişme

yüzdesine sahip bir zeminin arazide, hafif yükleme altında ıslatıldığında önemli miktarda şişme meydana geldiğini göstermişlerdir. %50'nin altında serbest şişme gösteren zeminlerin önemli şişme değişimi göstermediği kabul edilmektedir. Ancak, Dawson (1953) %50 civarında serbest şişme gösteren bazı Texas killilerinin, şişme nedeni ile önemli zararlara yol açtığını göstermiştir. Bunun nedeninin, zeminin şişme karakteristikleri ile aşırı iklim koşullarının birleşmesi olduğu düşünülmektedir [26].

3.3.1.5 Potansiyel hacim değişimi

PVC metre sıkıştırılmış bir zeminin şişme basıncını belirlemek amacıyla standart hale getirilmiş bir alettir. PVC metre arazide veya laboratuarda kullanılabilir. Bu deneyde örselenmiş numune doğal su muhtevasında Proktor sıkışma enerjisi ile ($55000\text{ft}\cdot\text{lb}/\text{ft}^3$ ($2600\text{kJ}/\text{m}^3$)) sıkıştırılarak konsolidometre hücresine yerleştirilir. Numune konsolidasyon aletinde bir yük halkasına karşı ıslatılarak şişmesine izin verilir. Şişme endeksi yük halkasına bağlı olarak kaydedilir. Değerlendirme için Şekil 3.3'de verilmiş olan abak kullanılır. Bu deneyin avantajları basitliği ve standart sonuçlar vermesidir. Ancak, örselenmiş numunelerin kullanılması nedeni ile arazideki zemin hakkında tasarımda kullanılacak kesin parametreler elde edilemez, bu sebeple tanımlama amacıyla kullanılması daha faydalıdır.



Şekil 3.3 Potansiyel hacim değişikliğine bağlı değerlendirme

3.3.1.6 Şişme indeksi deneyi

Şişme indeksi deneyi; 1960'ların sonunda Amerikanın Güney Kaliforniya bölgesinde, bölgede çalışan firmaların kullanılan deneylerin standartlaştırılması konusundaki istekleri doğrultusundaki geliştirilmiştir. Yöntem istatistiksel olarak Kaliforniyadaki beş farklı laboratuarda denenmiş ve UBS Standardı No: 29 – 2 olarak standartlaştırılmıştır. Deney PVC deneyine çok benzemektedir, aralarındaki tek fark bu deneyde şişmenin sabit bir sürsaj yükü altında serbest bırakılmasıdır.

Deney için; zeminin 4 numaralı elekten elenerek ASTM D-1557-66T standardına göre optimum su muhtevasına getirilir. Daha sonra zemin 6 – 30 saat kür edilerek standart 4-in. (10.2cm) kalıpta sıkıştırılır. Daha sonra numunenin su muhtevası %50 lik bir doygunluk derecesine göre ayarlanır. Numune üzerine 144psf (6.9kPa)'lık sursaj uygulanılarak ısıtılır. 24 saat boyunca hacim değişimi izlenir. Şişme indeksi aşağıdaki şekilde hesaplanarak en yakın tam sayıya yuvarlanır.

$$EI=100 \Delta h \times F \quad (EI=\text{Şişme indeksi}) \quad (3.2)$$

Burada;

Δh = şişme yüzdesi

F=4 numaralı elekten geçen yüzde

Şişme indeksine bağlı olarak şişme potansiyeli aşağıdaki şekilde belirlenir.

Çizelge 3.7 Şişme indeksi değerlerine göre zeminlerin şişme potansiyelleri

EI	Şişme potansiyeli
0 – 20	Çok Düşük
21 – 50	Düşük
51 –90	Orta
91 –130	Yüksek
>130	Çok yüksek

3.3.1.7 Kaliforniya taşıma oranı (CBR)

CBR deneyi özellikle karayolu tasarımında kullanılan bir penetrasyon direnci deneyidir. Deney yöntemi; ince taneli bir zemin için penetrasyon direncini ölçmeden önce düşey şişmenin ölçülmesine dayanır. Zeminler 6-in. (15.2) çapındaki CBR deney kalıplarında değişik su

muhtevalarında farklı yoğunluklarda sıkıştırılarak, 4 gün boyunca bir sürsaj yükü altında suda bekletilir. Sürsaj yükü zeminin arazideki durumuna göre belirlenir. Numune suda bekletilmeden önce ve sonra dial guagelerden okumalar alınır. Penetrasyon yapılmadan önce numune 15 dakika drene olmaya bırakılır.

3.3.1.8 Lineer genişleme katsayısı (COLE)

COLE deneyi Amerikan Zemin Koruma Servisi ve Ulusal Zemin İnceleme Servisi tarafından şişen zeminleri tanımlamak için rutin olarak kullanılan bir rötire deneyidir. COLE deneyi örselenmemiş, serbest bir numuneyi 5psi (33kPa)'dan etüvde kurutulmuş (150,000psi=1000mPa) emme değerine kadar lineer birim şekil değiştirmesini belirler.

Yöntem örselenmemiş numunenin esnek plastik bir reçine ile kaplanmasını içerir. Reçine sıvı haldeki suyu geçirmeyen ama su buharını geçiren bir özelliğe sahiptir. Doğal zemin parçaları bir basınç kabında 5psi (33kPa) emme değerine getirilir. Zemin parçacıklarının hacimlerini belirlemek için Arşimet kanunları kullanılarak havada ve suda tartılır. Daha sonra numuneler etüvde kurutulularak aynı işlemler yapılarak hacim hesaplanır.

COLE numune boyutlarının yaş ve kuru haldeki değişiminin ölçüsüdür ve 5psi emme basıncı ve etüvde kurutulmuş hallerinin yoğunluklarından elde edilir. COLE aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$COLE = \Delta L / \Delta L_D = (\gamma_{dD} / \gamma_{dM})^{0.33} - 1 \quad (3.3)$$

Burada; $\Delta L / \Delta L_D$ = kuru boyutlara bağlı lineer şekil değiştirme

γ_{dD} = etüvde kurutulmuş numunenin kuru yoğunluğu

γ_{dM} = 33 kPa'lık emme basıncı altındaki numunenin kuru yoğunluğu

COLE değeri bazen yüzde olarak ifade edilir. Yüzde olarak yada boyutsuz olarak da ifade edilse büyüklüğü COLE değerini belirler.

Amerikan Zemin Araştırma Laboratuvarı (1981), Lineer Genişleme (LE) ifadesini kil mineralojisini belirlemek için kullanmaktadır. LE'nin kil içeriğine oranı mineraloji ile aşağıdaki şekilde ilişkilendirilmiştir (Çizelge 3.8).

Çizelge 3.8 LE / Kil yüzdesi oranının kil minerolojisi ile ilişkisi

LE /Kil yüzdesi	Mineroloji
>0.15	Smektit (montmorillonit)
0.05 – 0.15	İllit
<0.05	Kaolinit

3.3.2 Sınıflandırma şemaları

Şişen zeminlerin tanımlama deneyleri ile belirlenmesinden sonra elde edilen parametreler bazı sınıflandırma şemaları ile birleştirilmişlerdir. Maalesef henüz standart bir sınıflama yöntemi geliştirilmemiştir. Bu yüzden farklı bölgelerde farklı sınıflandırma sistemleri kullanılmaktadır.

Şişen zeminlerin sınıflandırılmasını güçleştiren en önemli neden; şişme potansiyelinin standart bir tanımının olmamasıdır. Şişme deneylerinin yapıldığı numunenin özellikleri (örselenmiş, örselenmemiş), sürsaj yükü ve deneye etki eden diğer faktörler değişiklikler göstermektedir. Örneğin; Holtz (1959), şişme potansiyelini; havada kurutulmuş örselenmemiş numunenin; 1psi (6.9kPa) basınç altında, doygun hale getirilmesi sonucu meydana gelen hacim değişikliği olarak tarif etmiştir. Seed vd. (1926) ise; şişme potansiyelini; örselenmiş, optimum su muhtevası ve maksimum yoğunluktaki (AASHTO standardı) numunenin 1psi (6.9kPa) basınç altında yaptığı hacim değişimi olarak tarif etmiştir. Snethen (1979) şişme potansiyelini; “Şişme potansiyeli doğal su muhtevası ve yoğunluğundaki örselenmemiş numunenin arazideki gerilme şartları altında, ödometre deneyinde denge konumuna geldiği düşey hacim değişimidir” şeklinde tanımlamıştır. Düşey hacim değişimi bu durumda orijinal yüksekliğe oranı olarak ifade edilmelidir [26].

Arazide gerçekleşecek şişme miktarı çevresel faktörlere bağlıdır. Bu faktörler zeminin doğal konumunda bırakılmasını veya sıkıştırılmasını da içerir. Bu durumda şu gerçeğin unutulmaması çok önemlidir. Aynı şişme potansiyeline sahip iki farklı zemin arazide farklı miktarlarda şişebilir.

3.3.2.1 Zemin sınıflandırma yöntemlerine göre sınıflandırma

Zeminler genellikle indeks özelliklerine göre, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi(USCS) ve Amerikan Karayolları Sınıflandırma Sistemine (AASHTO) göre

sınıflandırılır. USCS sistemine göre CL ve CH, ve AASHTO sistemine göre A6 veya A7 olarak sınıflandırılan zeminlerin şişme potansiyeline sahip oldukları düşünülür.

3.3.2.2 Mühendislik indeks özelliklerine göre sınıflandırma

Şişme potansiyelinin belirlenmesi için Atterberg limitlerinin kullanılması en yaygın yöntemdir. Bununla beraber pek çok yöntem kil içeriğinin sınıflandırmaya dahil etmektedir. Holtz ve Gibbs (1956) örselenmemiş zemin numuneleri için Çizelge 3.9'da verilen kriterleri sunmuşlardır. Altmeyer (1959), pek çok laboratuarda hidrometre deneyinin yapılamadığını düşünerek kil içeriğini elimine ederek, rötre limitinin veya lineer rötrenin kullanılmasını önermiştir (Çizelge 3.10). Chen (1965); potansiyel şişmenin belirlenmesi için; 200 No'lu elekten geçen zemin yüzdesi, likit limit ve standart penetrasyon sayısı değerleri arasında bir korelasyon geliştirmiştir (Çizelge 3.11). Chen (1988) ayrıca plastisite endeksine bağlı olarak şişen zemin sınıflandırılması için basit bir yöntem sunmuştur (Çizelge 3.12). Seed vd. (1962); sıkıştırılmış killerin şişme karakteristikleri üzerinde bir çalışma yapmış ve aktivite ve kil yüzdesi değerlerine bağlı bir abak oluşturmuştur (Şekil 3.4) [26,39 ve 41].

Çizelge 3.9 Kolloid içeriği, plastisite indisi, büzülme limiti değerlerine göre şişen zeminlerin sınıflandırılması

İndeks deneylerinde elde edilen değerler ^a			Muhtemel Şişme (% Toplam hacim değişimi)	Şişme Derecesi
Koloid içeriği (% < 0.001mm)	Plastisite İndisi	Büzülme Limiti		
>28	>35	<11	>30	Çok yüksek
20 – 31	25 – 41	25- 41	20 – 30	Yüksek
13 –23	15 – 28	15 – 28	10 – 20	Orta
<15	< 18	>15	<10	Düşük

^a 1 psi düşey yükleme altında

Çizelge 3.10 Rötire limiti veya lineer rötire'ye bağlı şişen zemin sınıflandırması

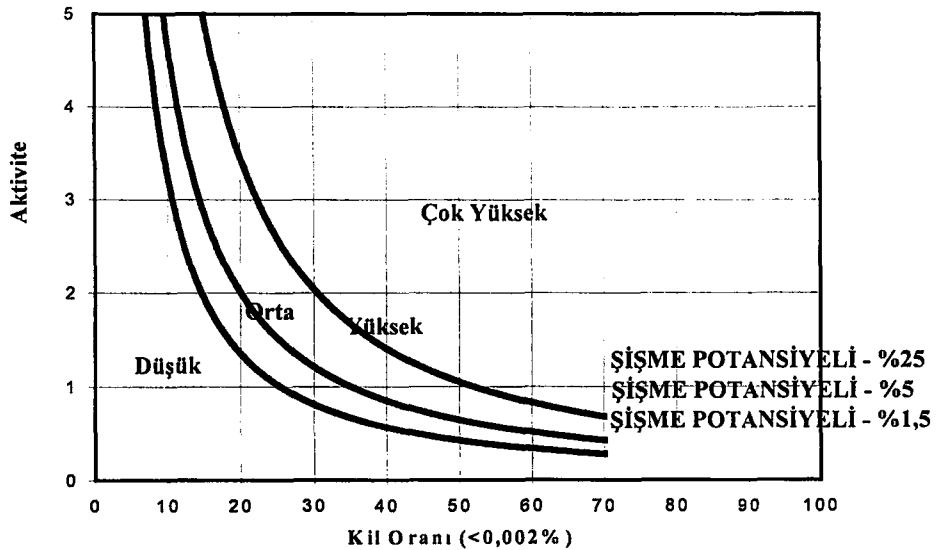
Lineer Rötire	Rötire Limiti (%)	Muhtemel Şişme (%)	Şişme Derecesi
<5	>12	<0.5	Kritik değil
5 – 8	10 – 12	0.5 – 1.5	Marjinal
>8	< 10	>1.5	Kritik

Çizelge 3.11 200 No'lu Elekten geçen zemin yüzdesi, likit limit ve standart penetrasyon direncine bağlı şişen zemin sınıflandırması

Laboratuar ve arazi dataları			Muhtemel Şişme (% Toplam hacim değişimi)	Şişme Derecesi
No. 200'den Geçen yüzde	Likit Limit (%)	Standart Penetrasyon Sayısı (Vuruş/ft)		
>95	>60	>30	>10	Çok yüksek
60 – 95	40 – 60	20 – 30	3 – 10	Yüksek
30 – 60	30 – 40	10 – 20	1 – 5	Orta
< 30	<30	<10	< 1	Düşük

Çizelge 3.12 Plastisite indisine bağlı şişen zemin sınıflandırması

Şişme Potansiyeli	Plastisite İndisi
Düşük	0 – 15
Orta	10 – 35
Yüksek	20 – 55
Çok Yüksek	> 55



Şekil 3.4 Kil Oranı – Aktivite değerlerine bağlı sınıflandırma

Yapılan çalışmalar benzer plastisite özellikleri gösteren zeminlerin birbirinden çok farklı şişme potansiyellerine sahip olabileceğini göstermiştir. Bunun nedeni numunenin özellikleri, içinde buldukları ortam ve farklı su içeriğinde deneye tabi tutulmaları vb. olarak açıklanabilir. Bununla beraber yapılan çalışmaların çoğu likit limit ve plastisite indisinin şişme özelliğini belirlemede kullanılacak en iyi parametreler olduğunu göstermiştir. Şişen zeminlerin sınıflandırılmasında yukarıda anlatılan yöntemlerden başka Katyon değiştirme kapasitesi ve Cole değerlerine bağlı olarak geliştirilen yöntemler de vardır.

3.3.3 Sınıflandırma şemalarının karşılaştırılması

Yukarıda anlatılan yöntemler yalnızca tahmin amaçlıdır ve arazide oluşacak şişme farklılıklar gösterebilir. Potansiyel değerler veya şişme yüzdesi şişme basıncı gibi nicel değerler kullanan kişinin zemin yapısı hakkındaki bilgileri ve kullanılan derecelendirme kriterinin geliştirilmesi için kullanılan deney yöntemi hakkındaki bilgilerinin yeterli olması durumunda değer kazanırlar. Yalnızca yüksek, orta düşük şişme potansiyeli gibi nicel derecelendirme sistemleri; derecelendirmenin yapıldığı bölgelerin dışında bir tasarımda yanlış kullanılabilir. Eğer belirli bir bölge için, deneysel olarak elde edilmiş nicel bir sınıflandırma şeması mevcut ise, bu tasarım kararları alınırken başarı ile kullanılabilir. Aksi takdirde, sınıflandırma yalnız potansiyel olarak tehlikeli bölgelerin belirlenmesinde kullanılır ve hesap yapılabilmesi için ayrı deneylere ihtiyaç vardır.

Maalesef pratikte sınıflandırma deneyleri tasarımda temel alınmaktadır. Bu bazı durumlarda çok tutucu yapılara neden olurken, bazen de çok güvensiz yapıların yapılmasına neden olmaktadır. Dizayn kriterlerinin belirlenmesi için kesin değerlerin belirleneceği deneylerin ve analizlerin yapılması gereklidir.

3.3.4 Şişme potansiyelinin formüllerle belirlenmesi

Şişen zeminler üzerinde yapılan deneysel ve istatistiksel çalışmalar sonucu elde edilen formüllerden bazıları aşağıda verilmiştir.

$$S = (3,6 \times 10^{-5}) A^{2,44} C^{3,44} \quad (3.4)$$

Burada; S= Şişme Potansiyeli (Yüzdesi)

C= Ağırlıkça Kil Yüzdesi

A= Aktivite (PI/C)

Yukarıdaki formül daha sonra plastisite endeksine bağlı olarak aşağıdaki şekilde geliştirilmiştir [6].

$$S = (2,16 \times 10^{-3})(PI)^{2,44} \quad (3.5)$$

Yukarıdaki formüllere bağlı olarak aşağıdaki sınıflandırma önerilmiştir.

Çizelge 3.13 Formülasyona bağlı şişen zemin sınıflandırması

Şişme Derecesi	S
Düşük	0-1,5
Orta	1,5-5
Yüksek	5-25
Çok Yüksek	>25

3.4 Şişen Zeminlerin İyileştirilmesi

Zemin iyileştirme yöntemleri aşağıdaki başlıklar altında toplanabilir.

- Kimyasal katkı maddeleri
- Ön ıslatma
- Sıkıştırma kontrolü ile zeminin yerleştirilmesi
- Sürsaj yüklemesi
- Isı ile iyileştirme
- Elektrokimyasal yöntemlerle zemin iyileştirilmesi
- Su muhtevasının korunması

3.4.1 Kimyasal katkı maddeleri ile stabilizasyon

3.4.1.1 Kireç stabilizasyonu

Kireç stabilizasyonu şişen zeminlerin iyileştirilmesinde çok sık kullanılan bir yöntemdir. Genellikle ağırlıkça %3-8 oranında sönmüş kireç zeminin üst 10-50cm.'lik kısmını stabilize etmek için kullanılır. Oluşan temel reaksiyonlar; katyon değişirme kapasitesi, folukulasyon-agglomerasyon, kireç karbonatlaşması ve puzolonik reaksiyonlardır. Kireç stabilizasyonu zeminin plastisitesini azaltarak çalışılabilirliği artırır. Aşağıdaki zemin özellikleri zeminin kireç ile reaktivitesini etkilemektedir.

- pH değeri 7 civarında olan zeminlerin kireç reaktivitesi yüksektir
- Organik karbon varlığı zemin-kireç reaksiyonunu yavaşlatır.
- Zayıf drenaj özelliklerine sahip zeminler iyi drenaj özelliklerine sahip zeminlere nazaran daha yüksek reaktiviteye sahiptir.
- Kalkerli zeminler iyi reaktivite özelliğine sahiptirler.

- Sülfatlar ve bazı demir bileşikleri kireç reaksiyonunu engellerler.
- Gypsum (alçı taşı) içeren zeminlerde kireç gereksinimi daha fazladır.

Puzolonik reaksiyonlar; kil yüzdesi, kilin mineralojisi, zeminin pH'ı, organik madde içeriği ve drenaj koşulları gibi zemin özelliklerine bağlıdır. Zemin stabilizasyonunu sağlayan diğer reaksiyonlar; kireç, su, ve alüminyum veya silikalı maddelerin oluşturduğu güçlü çimentolaşmış yapılarıdır. Kireç stabilizasyonu kum ve silt ağırlıklı zeminlerde etkin sonuçlar vermeyebilir. Zemine kireç ile birlikte uçucu kül veya benzeri puzolonik özellikler gösteren malzemelerin ilavesi zemin özelliklerini olumlu etkileyecektir.

3.4.1.2 Çimento stabilizasyonu

Zeminin çimento ile stabilize edilmesi kireç stabilizasyonuna benzer reaksiyonlar oluşturur. Çimento stabilizasyonu; likit limit, plastisite indisi ve hacim değiştirme potansiyelini azaltırken rötre limitini artırır. Ancak çimento stabilizasyonu yüksek plastisiteli killerin stabilizasyonunda kireç stabilizasyonu kadar etkili değildir. Zeminlerin kirece karşı reaktif olmadığı durumlarda çimento stabilizasyonu avantajlı olmaktadır. Çimento ile stabilizasyon, kireç stabilizasyonuna nazaran daha kısa sürede etkili olmaktadır. Bu sebeple karıştırma işlemi kireç stabilizasyonuna göre daha kısa sürede tamamlanmalıdır.

3.4.1.3 Tuz ile stabilizasyon

Özellikle kalsiyum klorit ve sodyum klorit şişen zemin stabilizasyonunda başarılı olarak kullanılmaktadır. Tuzların zemin üzerindeki etkisi zemin özelliğine bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Genelleme yapmak gerekirse; özellikle yüksek likit limit değerlerine sahip olan zeminlerde etkili olmaktadır. Zeminlerin su muhtevalarını korunmasını, büzülme limitinin ve kayma dayanımının artmasını sağlarlar. Suyun donma derecesini düşürdükleri için donmadan kaynaklanan şişme probleminin çözümünde başarılı olarak kullanılmışlardır. Ancak zaman içerisinde zeminden ayrılmaları problem teşkil etmektedir. Bu nedenle stabilizasyonun belirli sürelerde tekrarlanması gerekmektedir. Bu da yöntemin ekonomik olmamasına neden olmaktadır.

3.4.1.4 Uçucu kül stabilizasyonu

Uçucu küller genel olarak puzolonik reaksiyonları arttırmak amacıyla kireç ile birlikte kullanılmaktadır. Uçucu küller çok farklı mekanik ve kimyasal özellikler taşıyabilmektedirler. Bu yüzden doğru tasarım yapılabilmesi için çok sayıda deney yapılmalıdır.

3.4.1.5 Organik bileşikler ile stabilizasyon

Zemin stabilizasyonu için çok sayıda organik madde denenmiştir. Ancak bu maddeler kireç kadar etkili ve ucuz değildir. Bazı organik maddeler stabilizasyon için uygun değerler vermiştir. Ancak bunların arazide kullanımları ile ilgili şüpheler vardır.

3.4.2 Ön ıslatma

Bu yöntem; su muhtevası yüksek olan zeminlerin daha düşük şişme göstereceği ilkesine dayanır. Eğer zemin yeterince yüksek su muhtevasına sahip ise önemli bir hacim değişimi olmayacağı kabul edilebilir. Plastik limit değerinin üzerine kadar ıslatılan zeminlerde şişme potansiyeli önemli ölçüde azalmaktadır. Ancak bu yöntemin kullanımını sınırlandıran önemli dezavantajlar mevcuttur. Şişen zeminler genellikle çok düşük permeabilite değerlerine sahiptirler bu yüzden zemini yeterince ıslatmak çok uzun zaman alabilir. Ayrıca zeminin su muhtevası arttırıldığında zemin dayanımının ve şev stabilitesinin önemli ölçüde azalabileceği unutulmamalıdır. Ayrıca su muhtevası arttırılan kısımdaki su zamanla alt tabakadaki zemini etkileyecektir. Bunun da yapı üzerinde beklenmeyen hasarlara neden olabileceği unutulmamalıdır.

3.4.3 Sıkıştırma kontrolü ile zemin iyileştirmesi

Bu yöntem kaldırıp yeniden yerleştirme ve örseleyip yeniden sıkıştırma olarak iki başlık altında incelenebilir.

3.4.3.1 Kaldırıp yeniden yerleştirme

Şişme özelliği gösteren bir zeminin kaldırılarak yerine şişmeyen zemin konulması sağlam bir temel zemini oluşturmak için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem şişen tabakanın kalınlığının yüksek olmaması durumunda bu tabakanın tamamının kaldırılması, eğer şişen tabakanın çok kalın olması durumunda ise yeterli kalınlığın tespit edilip bu noktaya kadar olan kısmın değiştirilmesi esasına dayanır. Kaldırılması gereken kısmın kalınlığı alttaki zeminin şişme potansiyeline bağlı olarak belirlenir. Dolgu malzemesi olarak kullanılacak zeminin, alt tabakaya su iletmemesini sağlamak amacıyla dolgu malzemesi olarak granüler zeminlerin kullanılması tavsiye edilmez. Dolgu tabakası yüksek yoğunluklarda sıkıştırılarak yüksek taşıma gücü elde edilebilir. Bu yöntem özel aletler gerektirmediği ve kısa sürede tamamlanabildiği için ekonomik olabilir. Ancak dolgu malzemesinin yapıya yakın bölgede mevcut olması gereklidir. Aksi takdirde malzemenin taşınması ekstra maliyet getirebilir. Bazı durumlarda kaldırılması gereken tabaka pratik olarak uygulanamayacak kadar yüksek olabilir.

3.4.3.2 Örseleyip yeniden sıkıştırma

Şişen zeminlerde şişme potansiyeli kuru yoğunluğu azaltarak düşürülebilir. Optimum su muhtevasının üzerinde minimum kuru yoğunluk sağlayacak şekilde hazırlanan zeminler daha düşük şişme potansiyeline sahiptirler. Laboratuarda bulunan su muhtevası ve kuru yoğunluk değerleri arazide uygulanarak, gerekli kontrollerin yapılması gereklidir. Ancak su muhtevasının yüksek olması zeminin çamurlaşmasına ve çalışma zorluklarına neden olur. Arazide bulunan zeminin dolgu malzemesi olarak kullanılması uygulamaların ekonomik olmasını sağlar. Eğer doğru sıkıştırma uygulanırsa, zemin yeterince geçirimsiz olur, bu da alt tabakalara suyun geçmesini engeller. Ancak yoğunluğun düşük olması taşıma gücü problemlerine neden olabilir. Şişme potansiyeli çok yüksek olan zeminler düşük yoğunluklarda bile önemli şişmeler gösterebilir. Özellikle kireç stabilizasyonu ile birlikte kullanılması durumunda çok etkili sonuçlar elde edilebilir.

3.4.4 Sürsaj yüklemesi ile zeminin iyileştirilmesi

Şişen killerde şişme basıncı değerine yakın değerlerde bir sürsaj yüklemesi yapılarak şişme engellenebilir. Bu yöntem ancak düşük – orta derecede şişme potansiyeline sahip zeminlerde pratik olarak kullanılabilir. Şişme değerleri ile şişme basıncı arasındaki ilişkinin nonlineer olması şişme basıncının artması durumunda yöntemin uygulanmasını güçleştirmektedir.

3.4.5 Isı ile iyileştirme

Zeminler 200°C'ye kadar ısıtıldıklarında şişme özelliklerini önemli ölçüde kaybetmektedirler. Günümüzde yöntemin pratik olarak uygulanması henüz geliştirilememiştir.

3.4.6 Elektrokimyasal yöntemlerle zemin iyileştirmesi

Elektroozmoz ve kildeki baz değişimi elektrokimyasal zemin iyileştirmesini oluşturur. Elektroozmoz sonucunda zeminin suyu uzaklaştırılır ve zemin sertleşir. Elektrokimyasal sertleştirmede amaç kil içerisinde istenilen katyonların yoğunluğunun artırılarak zeminin fizikokimyasal özelliklerinin iyileştirilmesidir.

3.4.7 Su muhtevasının korunması ile zemin iyileştirmesi

Zemindeki şişme problemleri su muhtevastaki değişimlerden kaynaklanmaktadır. Eğer zemin içerisindeki su muhtevastının değişimi uygun bir yöntemle engellenebilirse şişme problemleri büyük ölçüde çözümlenir. Su tutucu bariyerlerin zeminlerde su muhtevastının değişimini engellemek için kullanılabilir. Burada amaç yapıya yakın bölgelere geçirimsiz bir

tabaka oluşturarak yapının altında kalan zeminde oluşabilecek su muhtevası değişimlerini minimuma indirmektedir. Yapımdan önce olduğu gibi koruma amaçlı olarak da uygulanılabilir. Düşey ve yatay su tutma bariyerleri olarak iki farklı şekilde imal edilebilirler.

3.4.7.1 Yatay su tutma bariyerleri

Yatay su tutma bariyerleri binaların etrafında veya yolların omuzlarında yapılarak yapı altında kalan zemine su girmesi engellenilir. Yatay su tutma bariyerleri; membran, rijit bariyer ve esnek bariyerler olarak sınıflandırılabilir.

Membranlar: Genellikle 4-20 mm. kalınlığında polivilin klorit (PVC), polipropilin vb. malzemeler kullanılarak yapılır. Membran tabakası serilmeden evvel zemin yüzeyindeki tüm pürüzler ve sert taş gibi maddeler ayıklanmalıdır. Membranın güneş ısı gibi çevresel faktörlerden etkilenmemesi için toprak ile örtülmelidir. Sızmaların engellenmesi için membranın ek yerleri özenle birleştirilmeli ve gerekli önlemler alınmalıdır.

Rijit Bariyerler: Betonarme avlu ve kaldırımlar binalar etrafında su tutma bariyerlerini oluştururlar. Bu yapılarda birleşim yerlerinin su sızdırmaması için gerekli önlemler alınmalıdır. Bu yapılara suyun dışarı akması için gerekli eğim verilmelidir. Ayrıca oluşabilecek çatlaklar engellenmeli ve gerektiğinde tamir edilmelidir.

Asfalt (Esnek bariyerler): Özellikle yol inşaatlarında temel zeminine su sızmasını engellemek amacıyla sık sık kullanılmaktadır. Yollarda hem temel zemini üzerinde hem de hendekler tamamen asfalt ile kaplanılarak uygulanır. Asfalt membranlar diğer malzemelerle birlikte kullanılabilir. Örneğin şişme özelliği göstermeyen dolgu altlarında geçirimsizliği sağlamak amacıyla kullanılabilir.

3.4.7.2 Düşey su tutma bariyerleri

Düşey su tutma bariyerleri yatay su tutma bariyerleri gibi çalışırlar. Yatay su akımlarının engellenmesinde daha etkilidirler. Özellikle şişme için gereken zamanı önemli ölçüde artırırlar. Düşey bariyerler aktif zonun en az yarısı kadar bir derinliğe inmelidir. Bu imalatı zorlaştırmakta ve ekonomikliği olumsuz etkilemektedir. Düşey bariyerlerin iç yüzeyleri membranla kaplanmalı ve geçirimsiz malzeme ile doldurulmalıdır.

4. KULLANILAN MALZEMELER VE DENEY YÖNTEMLERİ

4.1 Kullanılan Malzemelerin Tanımı

Bu çalışmada Na-Bentonit ve kaolin killeri iki farklı oranda karıştırılarak kullanılmıştır. Ayrıca doğal killeri temsilen Kütahya yöresinde bulunan çini sanayiinde de kullanılan Türkmen Kili kullanılmıştır. Bu killer çalışmanın çeşitli aşamalarında farklı miktarlarda kireç ve çimento ile stabilize edilerek değişik kür şartları altında geoteknik ve özellikle şişme özelliklerinin değişimi incelenmiştir. Kullanılan malzemeler çalışmanın daha kolay anlaşılmasını sağlamak amacıyla isimlendirilmiştir. Aşağıda bu isimlendirme çizelge halinde verilmiştir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1 Kullanılan malzemeler

İsim	Bentonit	Kaolin	Türkmen Kili	Kireç	Çimento
Zemin A	%100	-	-	-	-
Zemin B	%70	%30	-	-	-
Zemin C	%30	%70	-	-	-
Zemin D	-	-	%100	-	-
Zemin A+4K	%100	-	-	%4	-
Zemin A+8K	%100	-	-	%8	-
Zemin A+4Ç	%100	-	-	-	%4
Zemin A+8Ç	%100	-	-	-	%8
Zemin B+3K	%70	%30	-	%3	-
Zemin B+6K	%70	%30	-	%6	-
Zemin C+3K	%30	%70	-	%3	-
Zemin C+6K	%30	%70	-	%6	-
Zemin D+4K	-	-	%100	%4	-
Zemin D+8K	-	-	%100	%8	-
Zemin D+4Ç	-	-	%100	-	%4
Zemin D+8Ç	-	-	%100	-	%8
Zemin D+3K	-	-	%100	%3	-
Zemin D+6K	-	-	%100	%6	-

K: Kireç Ç: Çimento

4.1.1 Na-Bentonit kili

Kullanılan Na-Bentonit kili Ankara Karakaya Bentonit Kil Fabrikasından sağlanmış olup torbalardan alınıp orijinal olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan Na-Bentonite ait geoteknik ve bazı fiziko kimyasal özellikler Çizelge 4.2’de verilmektedir.

Çizelge 4.2 Deneyleerde kullanılan Na-Bentonit’e ait geoteknik ve fizikokimyasal deney sonuçları

ÖA	SYA (m ² /gr)	pH	EI (Milisimens/cm)	KDK (meq/100 gr)	Silt (%)	Kil (%)
2.60	400	9.40	1.13	90	12	88

ÖA: Özgül Ağırlık, SYA: Spesifik Yüzey Alanı EI: Elektriksel İletkenlik, KDK: Katyon Değişim Kapasitesi

4.1.2 Kaolin kili

Deneyisel çalışmada kullanılan Kaolin kili Bilecik Söğüt Seramik Fabrikasından temin edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan Kaolin’e ait geoteknik ve bazı fiziko kimyasal özellikler Çizelge 4.3’de verilmektedir.

Çizelge 4.3 Deneyleerde kullanılan Kaolin’e ait geoteknik ve fizikokimyasal deney sonuçları

ÖA	SYA (m ² /gr)	PH	EI (Milisimens/cm)	KDK (meq/100 gr)	Kum (%)	Silt (%)	Kil (%)
2.56	15	4.86	0.15	25.93	12	20	68

ÖA: Özgül Ağırlık, SYA: Spesifik Yüzey Alanı EI: Elektriksel İletkenlik, KDK: Katyon Değişim kapasitesi

4.1.3 Türkmen kili

Deneyisel çalışmada kullanılan kil Kütahya çini sanayiinde kullanılmaktadır. Plastisitesi yüksek olan kil Kütahya ili kırsal kesiminde yaygın olarak bulunmaktadır. Çalışmaya başlanmadan önce Kütahya çini sanayiinde kullanılan sekiz farklı kil tipi üzerinde sınıflandırma ve tanımlama deneyleri yapılmıştır. Deneyler Türkmen kilinin en yüksek şişme potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca Kütahya il sınırları içerisinde yaygın olarak kullanılması çalışmada Türkmen kilinin tercih edilmesine neden olmuştur.

4.1.4 Kireç

Deneyisel çalışmada piyasada kolaylıkla temin edilebilen sönmüş toz kireç kullanılmıştır. Kireç kimyasal olarak en genel anlamda kalsiyum oksit (CaO) olarak ifade edilir. Kireç zemin stabilizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Çizelge 4.4'te sönmüş kirece ait bazı kimyasal özellikler, Çizelge 4.5'te sönmüş kirece ait X-Ray Analizi sonuçları verilmiştir [41].

Çizelge 4.4 Sönmüş kirece ait bazı kimyasal özellikler

PH	12.60
Elektriksel İletkenlik (milisimens/cm)	6.29
Kasyon Değişim Kapasitesi (meq/100gr)	16.43
Organik Madde Miktarı (%)	24.38
Özgül Ağırlık	2.45
Tane çapı	
Kum (%)	7
Silt (%)	77
Kil (%)	16

Çizelge 4.5 Sönmüş kirece ait X-Ray analizi sonuçları

Bileşimler	Miktar (%)
SiO ₂	2.72
Al ₂ O ₃	0.37
Fe ₂ O ₃	0.25
CaO	63.88
MgO	4.00
K ₂ O	0.06
SO ₃	0.02
NaCl	0.23
CO ₂	10.52
KK	27.48
Toplam	98.78

4.1.5 Çimento

Çimento; başlıca silisyum, kalsiyum, alüminyum ve demir oksitleri ihtiva eden hammaddelerin teknolojik metotlarla sinterleşme derecesine kadar pişirilmesi ile elde edilen klinkerin, tek veya daha fazla cins katkı maddesi ile öğütülmesi sonucu elde edilen hidrolik bir bağlayıcıdır. Özellikle zeminde meydana getirdiği büzülme problemleri nedeniyle kireç kadar sık kullanılmamaktadır. Çalışmada Eskişehir çimento fabrikasında üretilen PÇ 325 tipi portland çimentosu kullanılmıştır.

4.2 Kullanılan Malzemelerin Bazı Geoteknik Özellikleri

Deneyisel çalışmada kullanılan malzemeler Çizelge 4.1’de sunulmuştur. Bu malzemeler üzerinde öncelikle temel geoteknik deneyler yapılmıştır. Çizelge 4.6’da kullanılan malzemelerin temel geoteknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.6 Kullanılan malzemelerin geoteknik özellikleri

Malzeme	Elek Analizi (%)			Atterberg Limitleri (%)					W _{opt} (%)	
	Kum	Silt	Kil	LL	PL	RL	PI	G _s	S. P.	M. P.
Zemin A	-	12	88	535	40	18	495	2,60	40	-
Zemin B	4	15	81	385	35	23	350	2,58	37	-
Zemin C	9	18	73	168	28	27	140	2,57	30	-
Zemin D	7	18	75	115	45	25	70	2,55	55	40
Zemin A+4K	-	14	86	450	43	20	407	2,59	-	-
Zemin A+8K	-	17	83	390	45	26	345	2,58	-	-
Zemin A+4Ç	-	15	85	510	42	19	468	2,61	-	-
Zemin A+8Ç	-	20	80	485	43	21	442	2,63	-	-
Zemin B+3K	-	17	83	360	45	26	315	2,57	40	-
Zemin B+6K	-	20	80	255	57	29	208	2,56	43	-
Zemin C+3K	-	20	80	160	37	30	123	2,55	32	-
Zemin C+6K	-	24	76	140	45	35	105	2,55	34	-
Zemin D+4K	7	20	73	NP	NP	61	-	2,54	-	-
Zemin D+8K	7	23	70	NP	NP	94	-	2,53	-	-
Zemin D+4Ç	7	22	71	NP	NP	52	-	2,56	-	-
Zemin D+8Ç	6	26	68	NP	NP	75	-	2,58	-	-
Zemin D+3K	7	19	74	NP	NP	41	-	2,55	-	-
Zemin D+6K	6	21	73	NP	NP	58	-	2,54	-	-

S. P. : Standart Proktor M. P. : Modifiye Proktor

4.3 Deneysel Yöntemler

4.3.1 Geoteknik özellikler

4.3.1.1 Tane çapı dağılımının belirlenmesi

Tane çapı dağılımının belirlenmesi elek analizi ve hidrometrik analiz olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilir. Zemin mekaniğinde kum ve çakıl miktar ve tane dağılımları elek analizi ile belirlenirken, tane çapı çok küçük olan kil ve silt dağılımları hidrometrik analiz ile belirlenir. Bu deneyler için ASTM D422 standardı referans alınmıştır.

Elek Analizi: Etüvde kurutulmuş zeminden yeterli miktarda temsili numune alınarak alınan miktar deney füyüne işlenir. Numune kil ve silt sınırı olan 0.075 mm. açıklıklı (200 no'lu) elek üzerinde elek altından çıkan su tamamen berraklaşana kadar yıkanır. Elek üzerinde kalan numune etüvde 24 saat kurumaya bırakılır. Kalan numune tartılarak yıkama sırasındaki kayıp (kil ve silt miktarı) belirlenir. Bu numune büyükten küçüğe doğru sıralanmış eleklerden elenerek elek üzerinde kalan ve başlangıçta kullanılan zemin miktarına göre elekten geçen yüzdelere belirlenerek granulometri eğrisine işlenir.

Hidrometre Analizi: Elek analizi tamamlandıktan sonra zemin numunesinden yeterli miktarda alınarak 200 no'lu elekten elenir. Bu malzeme etüvde kurutulduktan sonra 50gr. kuru numune alınarak içerisine zemin tanelerinin birbirine yapışmasını engellemek amacı ile 125 ml. ayrıştırıcı madde (%4'lük sodyum heksametafosfat çözeltisi) eklenerek karıştırılır ve numune 24 saat bekletilir. 24 saat sonunda numune bir miktar saf su eklenerek uygun bir mikser yardımıyla karıştırılır. Hazırlanan karışım bir 1000 ml.'lik bir mezüre konularak 1000 ml. çizgisine kadar saf su ile doldurulur. Mezürdeki karışımın homojen olması için mezürün üst kısmı avuç içi ile kapatılarak mezür 20-30 kez alt üst edilerek karıştırılır. Daha sonra mezür sabit bir yere konularak hidrometre karışım içerisine bırakılır. Daha sonra uygun zaman aralıklarında hidrometreden okumalar alınır. Suyun yoğunluğunun sıcaklıkla değişim göstermesi deney sonuçlarını etkilemektedir. Bu nedenle deney ya sabit sıcaklık sağlayan bir su banyosunun içerisinde yada aynı sıcaklıkta su buluna bir başka mezürden sürekli sıcaklık ölçümleri alınarak yapılır. Hidrometre sonuçları sıcaklık ve tane birim hacim ağırlına bağlı düzeltme faktörleri uygulanarak düzeltilir. Formülasyon sonucunda tane çapı dağılımı belirlenir. Bulunan sonuçlar elek analizinden elde edilen sonuçlarla birleştirilerek granulometri eğrisine işlenir.

4.3.1.2 Kıvam limitleri

Kıvam, kohezyonlu zeminler zeminin sertlik-yumuşaklık durumunun ölçüsüdür. Plastiklik veya plastisite ise ince taneli zeminlerde kırılmadan şekil verilebilmeyi ifade eder. İnce taneli zeminler su muhtevasına bağlı olarak katı, yarı katı, plastik ve likit kıvamda olabilir. Likit kıvamda zemin kendi ağırlığı altında yavaşça akabilir. Plastik durumda zemine istenilen şekil kolayca verilebilir. Yarı katı durumda zemine istenilen şekil zorlukla verilir, zeminde çatlamlar oluşur. Katı durumda ise zemine şekil verilemez. Atterberg (1911), tarafından bu kıvamları ayıran sınır su muhtevaları tamamlanmıştır. Likit limit, plastik limit ve rötre limiti olmak üzere üç kıvam limiti vardır.

1. Likit limit (W_L): Zeminin kendi ağırlığı altında aktığı minimum su muhtevasıdır. Diğer bir deyişle plastik ve likit durumları birbirinden ayıran su muhtevasıdır.

2. Plastik limit (W_P): Plastik ve yarı katı durumları birbirinden ayıran sınır su muhtevasıdır. Zeminin. El altında, cam bir yüzey üzerinde, çubuk haline getirilirken, çubukların çapları yaklaşık 3mm olduğunda çatlamların meydana geldiği su muhtevasıdır.

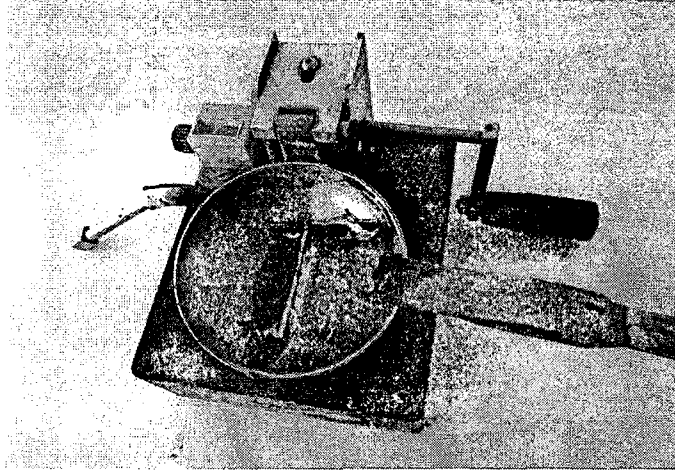
Likit limit ile plastik limit arasında kalan su muhtevalarında zemin plastik davranış gösterdiği için, bu iki limitin farkı plastisite indisi (I_p) olarak adlandırılmaktadır.

$$I_p = (W_L - W_P) \quad (4.1)$$

3. Rötre limiti (W_S): daha fazla su kaybının zeminin hacminde artık bir azalma meydana getirmediği en büyük su muhtevasıdır. Diğer bir tanımla, zeminin suya tam doygun olabildiği en düşük su muhtevasıdır [40].

Likit limit deneyi

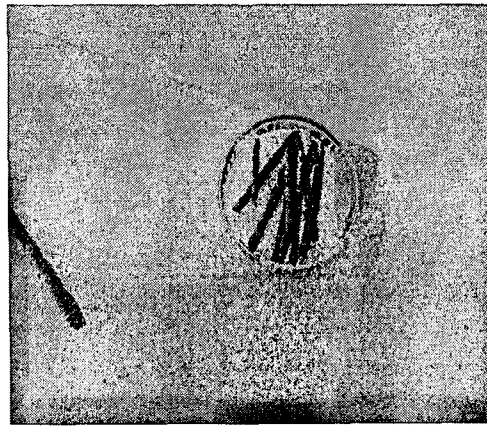
40 nolu elekten geçen 150-200gr. zemin damıtık su ile su ile homojenleştirilerek Casagrande aletine yerleştirilir. Aletin özel bıçağı ile zemin tabanında 2mm. genişliğinde oyuk açılır. Casagrande aletinin düzeneğinde numune yerleştirilen pirinç kap 1 cm yükseğe çıkıp plastik bir yüzeye düşmektedir. Aletin kolu yaklaşık 2 devir/sn hızla çevrilmelidir. Bu çevirme esnasında kap kalkar ve düşer. Bu işlem ortadaki oyuk birleşinceye kadar devam eder. Bu andaki vuruş sayısı ve numunenin su muhtevası belirlenir. Dört ayrı su muhtevası için vuruş sayısı ve su muhtevası belirlendikten sonra 25 vuruş sayısına karşılık gelen su muhtevası numunemizin likitlik kıvamındaki su muhtevasıdır (ASTM D4318). Likit limit deneyinde malzemenin Casagrande deney aletine yerleştirilmesi Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1 Likit limit deneyinin yapılışı

Plastik limit deneyi

24 saat etüvde kurutulmuş numune homojen olacak şekilde su ile karıştırılarak plastik bir kıvama getirilir. Daha sonra bu numune cam levha üzerine konarak avuç içiyle yaklaşık 3 mm çaplı silindirler oluşturulur. Kopma ve çatlakların oluşmaya başladığı andaki su muhtevası plastik limit değerini verir (ASTM D4318). Plastik kıvama getirilmiş zemin örneği Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



Şekil 4.2 Plastik kıvama getirilmiş zemin örneği

Rötre limiti deneyi

Islak zemin, daha önce civa ile belirlenmiş (V_1) yaklaşık 15-20cm³ hacminde kaba boşluk kalmayacak şekilde yerleştirilir ve üstü düzlenir. Kap içindeki yaş zeminin ağırlığı (W_1)

belirlenir. Kap içerisindeki ıslak zemin çatlak oluşumunu engellemek için 24 saat açıkta, daha sonrada 24 saat etüvde kurutularak kuru ağırlığı belirlenir (W_2). Kuru zemin, daha büyük çaptaki civa dolu bir kaba batırılarak kuru hacmi belirlenir (V_2). Buna göre rötre limiti aşağıdaki şekilde tanımlanır (ASTM D427).

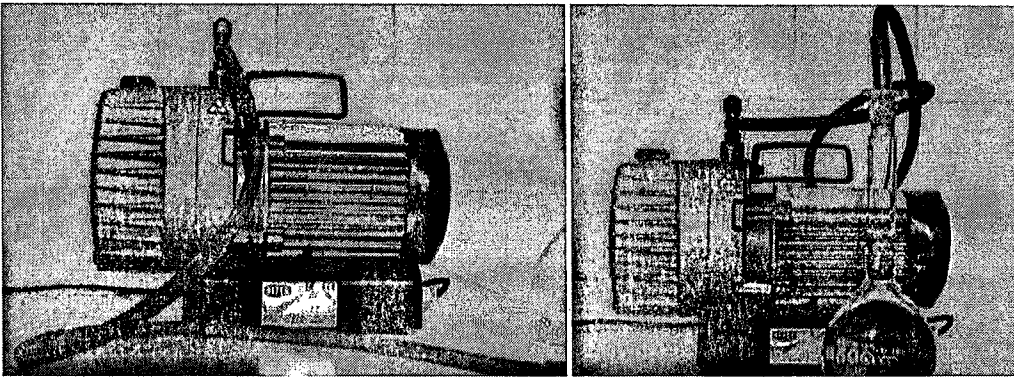
$$W_s = \left[w_1 - \frac{(V_1 - V_2) \gamma_{su}}{W_2} \right] \times 100 \quad (4.2)$$

4.3.1.3 Özgül ağırlık

Malzemenin birim hacimdeki ağırlığının aynı hacimdeki suyun ağırlığına oranı olarak tanımlanır. Zeminlerin dane özgül ağırlığı, birim hacim ağırlığı gibi malzemenin hacim ve ağırlık ilişkisinin tespit edilmesi için gereklidir.

Deneyin yapılışı

Zemin danelerinin özgül ağırlığı (G_s) bir piknometre veya hacimsel çözülür bir kap yardımıyla tayin edilir. Ölçülü bir kap için uygun kapasite 50 cm^3 dür. Piknometre şişesi kapağı ile beraber etüvde kurutulduktan sonra hassas olarak tartılır. (W_1) etüvde kurutulmuş 25 gr kadar zemin numunesi soğutulduktan sonra piknometre şişesine doldurulur ve beraberce tartılır (W_2). Piknometre şişesi üç aşamada doldurulacak şekilde havası alınmış damıtık su ilave edilerek her aşamada su ve zemin içerisindeki hava vakum uygulanarak dışarıya atılır ve tekrar tartım yapılır (W_3). Özgül ağırlık (Spesifik Gravite) deneyinde kullanılan aletler Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Bu deneyler için ASTM D854 standardı referans alınmıştır.



Şekil 4.3 Özgül ağırlık (spesifik gravite) deneyinde kullanılan aletler

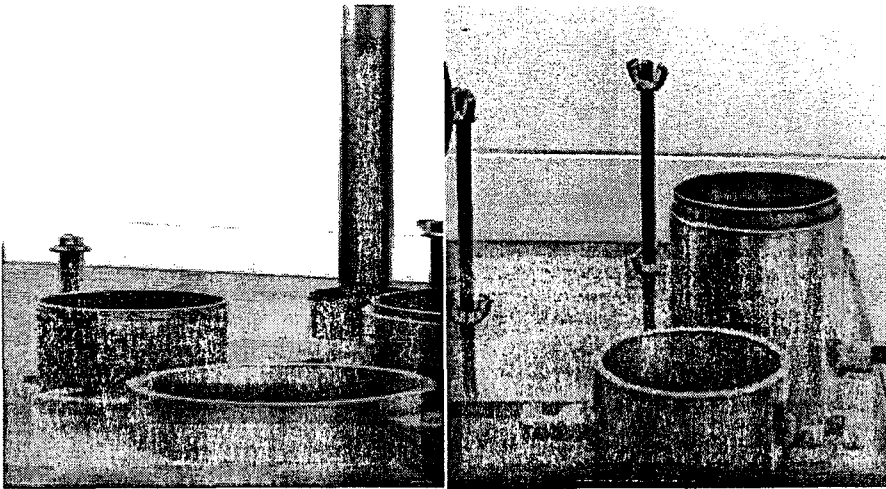
Yukarıda anlatılan işlem sırası izlenirse özgül ağırlık aşağıdaki formülden hesaplanır:

$$G_s = \frac{W_2 - W_1}{50 - W_3 + W_2} \quad (4.3)$$

4.3.1.4 Standart proktor kompaksiyon deneyi

Optimum su muhtevasının tespiti için standart proktor deneyi kullanılır. Standart proktor deneyinde iç çapı 10,2 cm, yüksekliği 11,7 cm olan metal bir silindir kullanılır. Bu kaba, bir yaka geçici olarak eklenir. Deneyde kullanılacak olan zemin numunesi üç tabaka halinde serilir ve her bir tabaka 30,5 cm den serbestçe düşen 2,5 kg. ağırlığındaki bir tokmakla 25 vuruş ile sıkıştırılır. Kullanılan tokmak ve vuruş sayılarının standart olması sebebiyle zemine sıkıştırma yolu ile verilen enerji de standarttır. Standart proktor deneyinde uygulanan kompaksiyon enerjisi 590 kJ/m^3 tür. Standart Proktor deneyinde kullanılan aletler Şekil 4.4'de gösterilmektedir. Bu deneyler için ASTM D698 standardı referans alınmıştır.

Kullanılan kabın (mold) içindeki sıkıştırılmış zeminin yaş ağırlığı belirlenir. Standart proktor kalıbının hacmi 929.37 cm^3 tür. Böylece zeminin birim hacim ağırlığı γ_n belirlenmiş olur. Sıkıştırılmış zeminin su muhtevasının belirlenmesi için, alttan ve üstten olmak üzere iki yerden numune alınır ve bu iki değerlerin ortalaması hesaplara esas olur. Bulunan su muhtevası değeri (ω) kullanılarak, kuru birim hacim ağırlığı (γ_k) bulunur. Deney değişik su muhtevaları için tekrarlanır.



Şekil 4.4 Standart proktor deneyi aletleri

$$\gamma_n = \frac{w}{v} \quad (4.4)$$

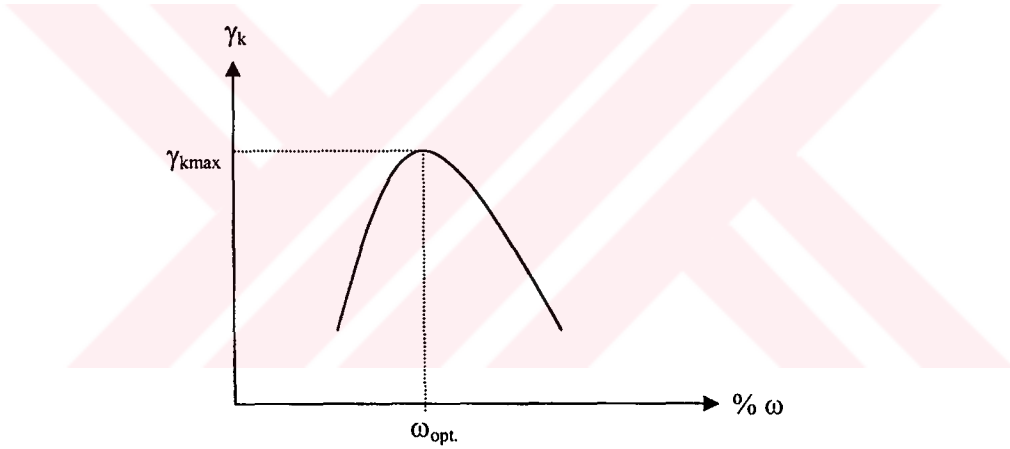
$$\gamma_k = \frac{\gamma_n}{1+w} \quad (4.5)$$

$$\gamma_k = (1-n)\gamma_s \quad (4.6)$$

$$e = \frac{n}{1-e} \quad (4.7)$$

$$\gamma_k = \frac{\gamma_s}{1+e} \quad (4.8)$$

Değişik su muhtevaları için bulunan γ_k ve $\% \omega$ değerleri bir grafiğe aktarılır. Grafikte kuru birim hacim ağırlığı ordinat, su muhtevası ise absis eksenine yerleştirilir. Bulunan deney sonuçları bu grafikte işaretlenir ve çan eğrisi şeklinde bir eğri elde edilir. Bu eğrinin tepe noktasının ordinatı γ_k , apsisi ise $\% \omega$ değerini verir. Sıkıştırılmış bir zeminde γ_k - ω ilişkisi Şekil 4.5'de gösterilmektedir.



Şekil 4.5 Sıkıştırılmış bir zeminde γ_k - ω ilişkisi

$\gamma_k - w$ eksen takımında sabit bir doygunluk derecesi için (S_r =sabit) teorik olarak çizilen çizgiye doygunluk çizgisi denir.

$$\gamma_k = \frac{\gamma_s}{1 + \frac{\gamma_s w}{S_r}} \quad (4.9)$$

bağıntısında zeminin tane birim hacim ağırlığı bilindiğinde, sabit S_r değerlerine karşılık gelen $\gamma_k - w$ değerleri bulunarak çeşitli doygunluk çizgileri elde edilebilir.

4.3.1.5 Serbest şişme deneyi

Serbest şişme; bir zemin numunesinin yatay yönlerde hacim değiştirmesi engellendiği durumda, sabit bir sürsaj yüklemesi altında su altında bırakılması durumunda tek boyutta meydana getirebileceği hacim değişimi olarak tanımlanabilir.

Ringe alınmış numuneler, konsolidasyon halkası içinde sabitlemiş, alt ve üstüne filtre kağıdı ve poroz taşlar konularak konsolidasyon hücresine yerleştirilmiştir. Ödometreye alınan hücre, üzerine dial bağlanarak, ödometre koluna 276 gram sabit ağırlık bağlanmıştır. Daha sonra dial sıfıra getirilerek hücre su ile doldurulmuş ve zaman bağlı şişme miktarı kaydedilmiştir. Deney sonucunda şişme potansiyeli olarak da ifade edilebilen serbest şişme yüzdesi elde edilir. Bu deneyler için ASTM D3877 standardı referans alınmıştır.

$$S_p = \frac{\Delta H}{H} \times 100 \quad (4.10)$$

ΔH : Numunede stabil haldeki düşey şişme miktarı (mm)

H : Numunenin başlangıç yüksekliği (mm)

S_p : Serbest şişme yüzdesi (%)

4.3.1.6 Şişme basıncı deneyi

Şişme basıncı; bir zemin numunesinin yatay yönlerde hacim değiştirmesi engellendiği durumda, su altında bırakıldığında tek boyutta meydana getirebileceği hacim değişimini engellemek için uygulanması gereken düşey basınç olarak tanımlanabilir.

Serbest şişme deney yöntemindeki şekilde ödometreye alınan hücre, üzerinde yük olmaksızın, suyla doldurulmuş ancak numune şiştikçe ödometre koluna yük konularak saatin sıfırda kalması sağlanmıştır. Saat stabil hale geldikten sonra kol üzerindeki yük (alet sabiti olan) 0.25 ile çarpılarak şişme basıncı belirlenmiştir.

4.3.2 Fiziko-Kimyasal Özellikler

4.3.2.1 pH

pH, ortamda H^+ veya OH^- iyonlarının bulunma derecesini konsantrasyonu ifade etmektedir. pH değişimi zemin/su karışımını önemli ölçüde etkilemektedir. Düşük pH değeri, toprakta flokulasyonu ve sıkı zemini ifade etmektedir. Yüksek pH değeri ise dispersiyonu ve gevşek zemini belirtir. Karışımın yüksek pH değeri kil danelerini dispers yapmakta ve kil

daneleri yüzeyindeki negatif yükü arttırmaktadır. Dolayısıyla daneler arasındaki itmeyi arttırmaktadır [11].

pH değeri kil danelerinin adsorpsiyon karakterini etkiler. Asit durumunda adsorpsiyon artar. Kil danelerinin köşeleri pozitif yükü yüklenir. pH değerinin düşük olması kil dane yüzeyinin elektriksel potansiyelini azaltmaktadır. Yani negatif yüzeyleri nötralize etmektedir.

pH değeri, zemindeki kation değişim kapasitesini doğrudan etkilemektedir. Kil danelerinin kenarlarından ve organik maddelerden ayrılan H^+ iyonu ve benzeri yükler atıkların pH değerini etkilemektedir. pH değeri artarsa, ortamın kation değişim kapasitesi de artmaktadır. Düşük pH seviyelerinde kovalent bağ ile bağlanmış H^+ ayrılmaz, fakat yüksek pH değerlerinde H^+ diğer kationlar ile yer değiştirebilir.

pH değerinin tespit edilebilmesi laboratuarda "Soil pH" metodu ile pH deneyi yapılır. pH deneyi yapılacak numuneler oda sıcaklığında (18-21°C) üzeri açık olarak kurutulurlar. Numuneler tamamen hava kurusu normuna (%3-5 su muhtevasına) ulaştıktan sonra 40 nolu elekten elenir. Elenen malzemeden 20 gr alınır ve 50ml saf su eklenerek karıştırılır. Karıştırılan karışımının bir gün sonra pH değerleri ölçülür. Ölçümlerde zemin çözeltisinin üzerindeki berrak kısmın içerisine cam elektrotlu pH metre daldırılır ve numunenin pH değeri göstergeden okunur.

4.3.2.2 Elektriksel iletkenlik

Elektriksel iletkenlik, ortamdaki elektrik taşıma kapasitesinin bir ölçüsüdür. Elektriksel iletkenlik, karışımın içerisindeki iyon tipi ve sayısı ile ilgili olarak artar. Dane konsantrasyonu artarsa, kil yüzeyindeki iyonlar solüsyona karışır. Elektriksel alan altındaki kation iyonlarının iletkenliği ve koloidal danelerin hareketi solüsyonun iletkenliğini arttırmaktadır [41].

Bir dane içinde elektriksel yükün değeri doğrudan o danenin yüzey alanı ile ilgilidir. Bu nedenle o danenin davranışına etki eden elektriksel kuvvetlerin kütle kuvvetlerine göre değeri de danelerin birim kütesine düşen yüzey alanı ile ilgilidir. Dane birim kütesine gelen yüzey alanı danelerin davranışına etki eden elektriksel yükün mertebesini gösterir.

Zemindeki tuz oranı elektriksel iletkenlikle belirlenir. Elektriksel iletkenlik değeri 4 miliSiemens (4000 mikroSiemens/cm) değerinden fazla ise zemin tuzludur. Teorik olarak çözeltinin tuz miktarı fazlaştıkça elektriksel akımını iletmesi de artar. Bu metodun esası asit, baz ve tuzların sudaki çözeltilerinin elektrik akımını iletmeleri özelliğine dayanmaktadır.

Elektriksel iletkenliği belirlenecek numuneler laboratuarda oda sıcaklığında (18-21°C) üzeri açık olarak tamamen hava kurusu normuna (yani %3-5 su muhtevasına) ulaştıktan sonra 16 nolu (1,31 mm göz açıklıklı) elekten elenir. Daha sonra bu numunelerden yaklaşık 200 gr alınarak saf suya doğgun hale getirilinceye kadar karıştırılır. Numune suya doğgun hale geldiğinde akıcı bir kıvamdadır. Akıcı kıvamdaki numunenin bulunduğu kabın üzeri kapatılarak bir gün bekletilir. Daha sonra elektriksel iletkenliği ölçecek olan aletin elektrotu batırılarak numunenin elektriksel iletkenliği tespit edilmiş olur. Elektriksel iletkenlik 1 cm² kesitinde ve birbirinden 1 cm uzaklıktaki elektrotlar arasındaki zlenin iletkenliğidir.

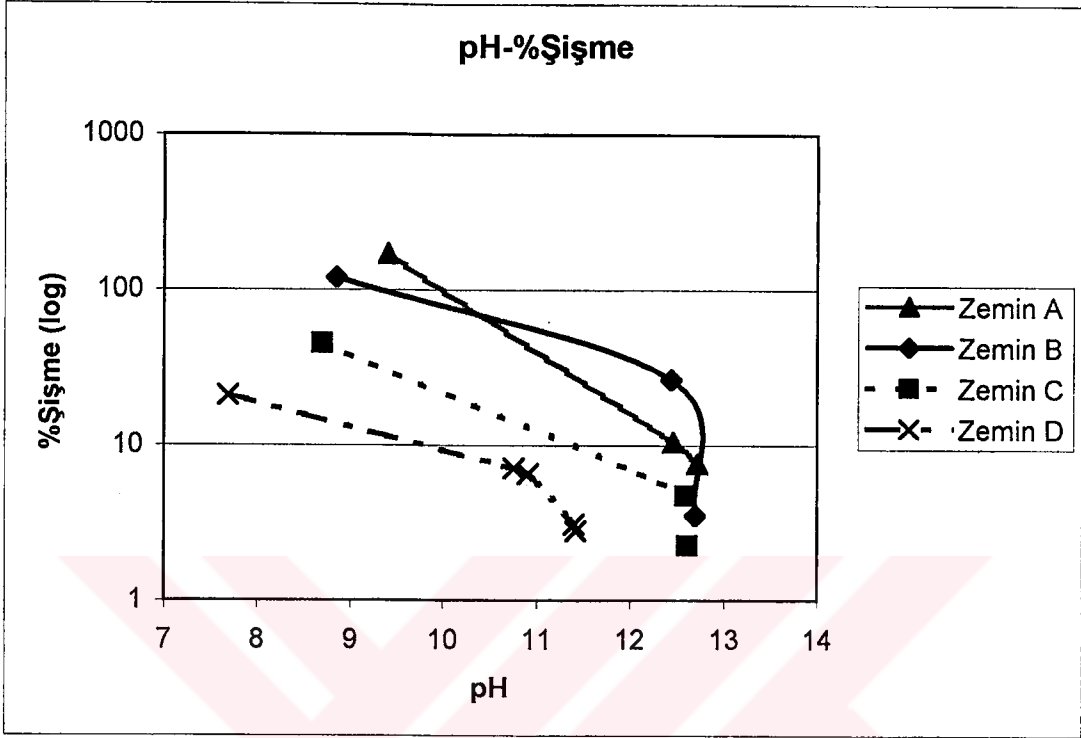


5. DENEYSEL ÇALIŞMA

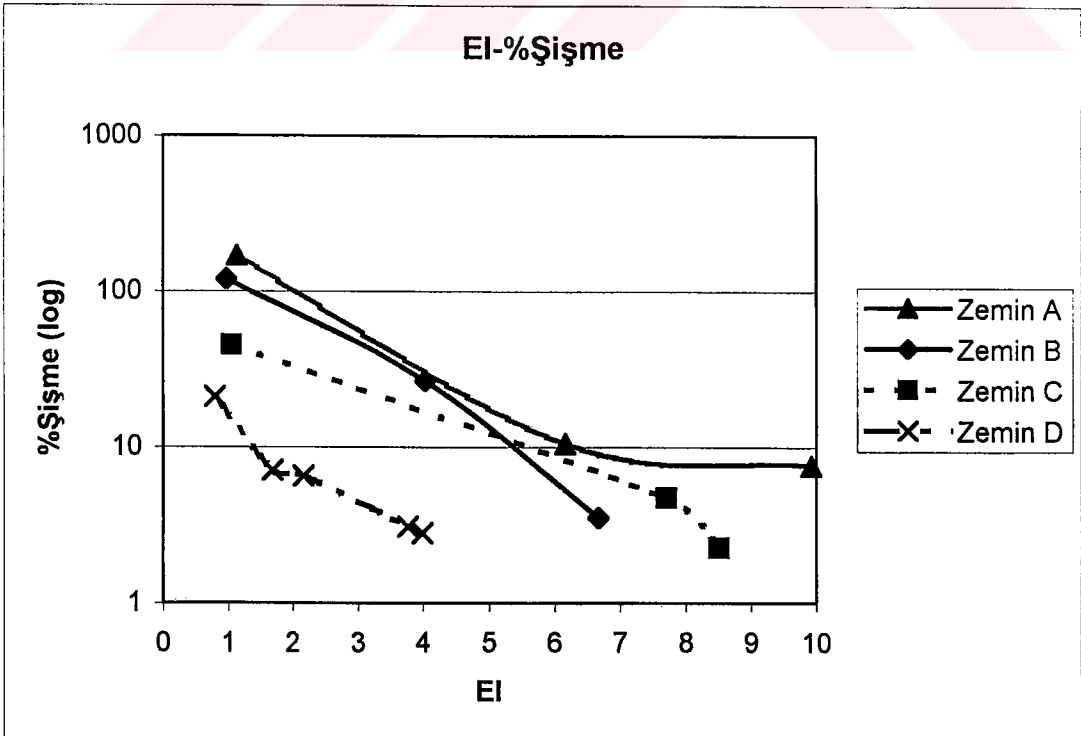
Bu çalışma kapsamında öncelikle seçilen malzemeler üzerinde dördüncü bölümde açıklanan deneyler uygulanıp numunelerin genel geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Deneyler sonucunda ilave malzemelerin plastisite indisini düşürdüğü, optimum su muhtevasını arttırdığı, maksimum kuru birim hacim ağırlığı azalttığı, Zemin A, Zemin B, Zemin C ve bunların stabilize edilmiş hallerinin CH sınıfı, Zemin D'nin CH-MH sınıfı zemin olduğu fakat stabilize edilmesi durumunda ML grubuna geçtiği belirlenmiştir. Bölüm 3'te anlatılan sınıflandırma şemaları bu zeminler üzerinde uygulandığında Zemin A, Zemin B, Zemin C ve bunların stabilize edilmiş hallerinin çok yüksek şişme potansiyeline sahip olduğu, Zemin D'nin ise saf halde iken çok yüksek olan şişme potansiyelinin stabilize edilmesi durumunda düşük şişme potansiyeli gösteren gruba dahil olduğu görülmüştür. Ayrıca numunelerin pH ve elektriksel iletkenlik değerleri belirlenmiştir. Numunelerin pH ve elektriksel iletkenlik değerleri Çizelge 5.1.'de, pH ve EI değerleri ile serbest şişme yüzdesi ilişkileri sırasıyla Şekil 5.1 ve 5.2'de görülmektedir.

Çizelge 5.1 Numunelerin pH ve EI değerleri

İsim	pH	EI
Zemin A	9,40	1,13
Zemin B	8,85	0,97
Zemin C	8,70	1,05
Zemin D	7,69	0,80
Zemin A+4K	12,46	6,16
Zemin A+8K	12,71	9,92
Zemin A+4Ç	12,31	2,33
Zemin A+8Ç	11,95	2,81
Zemin B+3K	12,44	4,03
Zemin B+6K	12,69	6,67
Zemin C+3K	12,59	7,71
Zemin C+6K	12,61	8,51
Zemin D+4K	10,90	2,16
Zemin D+8K	11,41	3,99
Zemin D+4Ç	10,58	1,53
Zemin D+8Ç	10,99	2,20
Zemin D+3K	10,75	1,68
Zemin D+6K	11,39	3,77



Şekil 5.1 pH-Şişme yüzdesi ilişkisi



Şekil 5.2 EI-Şişme yüzdesi ilişkisi

Numunelerin stabilize edilmeleri durumunda, pH ve EI değerlerinde, saf hallerine göre artış görülmüştür. pH değerleri 7,69 ile 12,71 arasında değişirken, EI değerleri 0,80 ile 9,92 arasında değişmiştir. Numunelerin şişme potansiyelleri pH ve EI değerlerindeki artışla azalma göstermiştir. Zemin A, B ve C'nin şişme potansiyeli 12,60 pH değerinde ani düşüşler göstermiştir. Benzer bir etki Zemin D için 10,75 pH değerinde görülmüştür. EI değerleri ise şişme potansiyelindeki azalma ile nispeten daha homojen bir dağılışı göstermiştir.

Daha sonra aşağıda açıklanan çevresel şartların şişme potansiyeline etkisini belirlemek amacıyla hazırlanan numuneler üzerinde serbest şişme ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır.

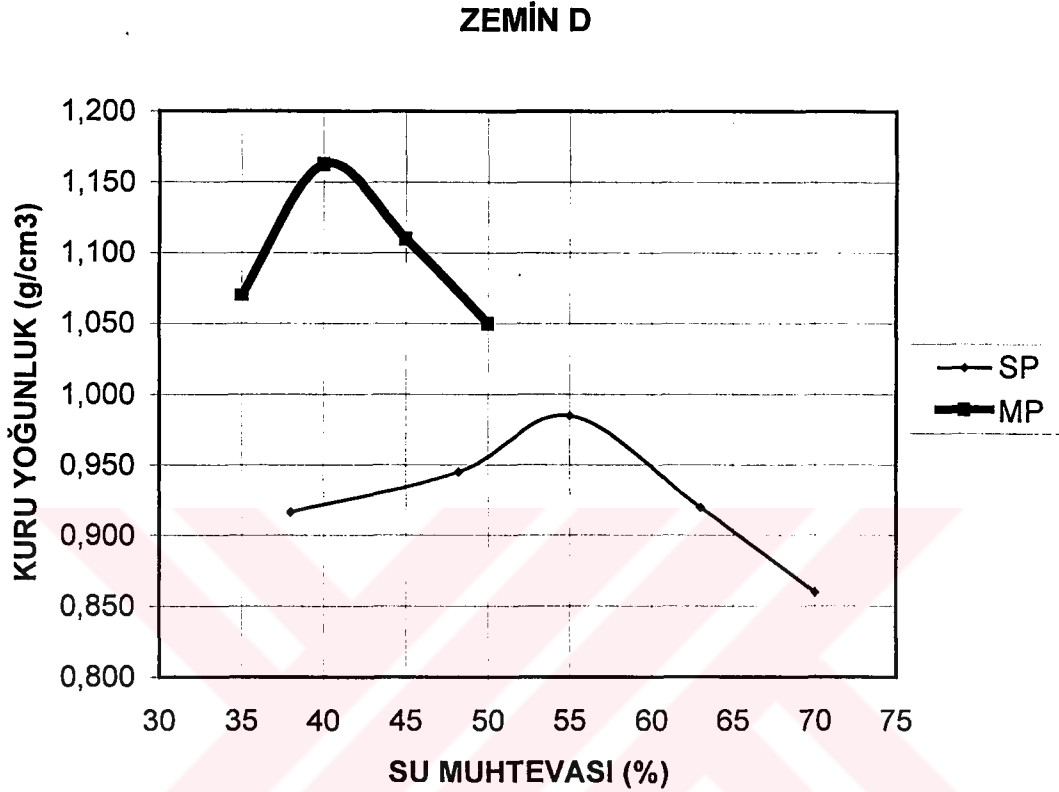
1. Su muhtevası ve enerji miktarının şişme potansiyeline etkileri
2. Katkı maddeleri ve kür süresinin şişme potansiyeline etkisi
3. Kür sıcaklığının şişme potansiyeline etkisi
4. Donma çözünme çevrimlerinin şişme potansiyeline etkisi
5. Islanma kuruma çevrimlerinin şişme potansiyeline etkisi

5.1 Su Muhtevası Ve Uygulanan Enerji Miktarının Şişme Potansiyeline Etkileri

Şişen zeminlerde şişme potansiyelinin önemli ölçüde su muhtevası ve kuru yoğunluktan etkilendiği bilinmektedir. Çalışmanın bu aşamasında, su muhtevası, kuru yoğunluk ve uygulanan enerji miktarının şişme potansiyeline etkisi değerlendirilmiştir. Çalışmada yüksek şişme potansiyeline sahip "Türkmen Kili" olarak adlandırılan doğal bir zemin iki farklı su muhtevasında ve altı farklı enerji seviyesinde sıkıştırılarak şişme potansiyelinin değişimi değerlendirilmiştir.

5.1.1 Deneysel yöntem

Çalışmanın bu bölümünde "Zemin D" olarak ifade edilen, Kütahya kırsal kesiminde sıkça rastlanan doğal bir kil olan "Türkmen Kili" kullanılmıştır. Öncelikle bu zemin 10 numaralı elekten elenmiş ve standart proktor ve modifiye proktor enerji seviyelerinde optimum su muhtevaları belirlenmiştir. Şekil 5.1'de Zemin D'ye ait optimum su muhtevaları verilmiştir. Buna göre standart proktor enerji seviyesinde optimum su muhtevası %55, modifiye proktor enerji seviyesinde optimum su muhtevası %40 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.1.1 Zemin D'ye ait optimum su muhtevası eğrileri

Daha sonra etüvde kurutulan numuneler standart ve modifiye proktor enerjilerinde elde edilen optimum su muhtevalarında sırasıyla hem standart hem de modifiye proktor tokmağıyla 15, 25, 40 vuruş yapılarak sıkıştırılmıştır. Çizelge 5.1'de hazırlanan numunelerin özellikleri verilmektedir.

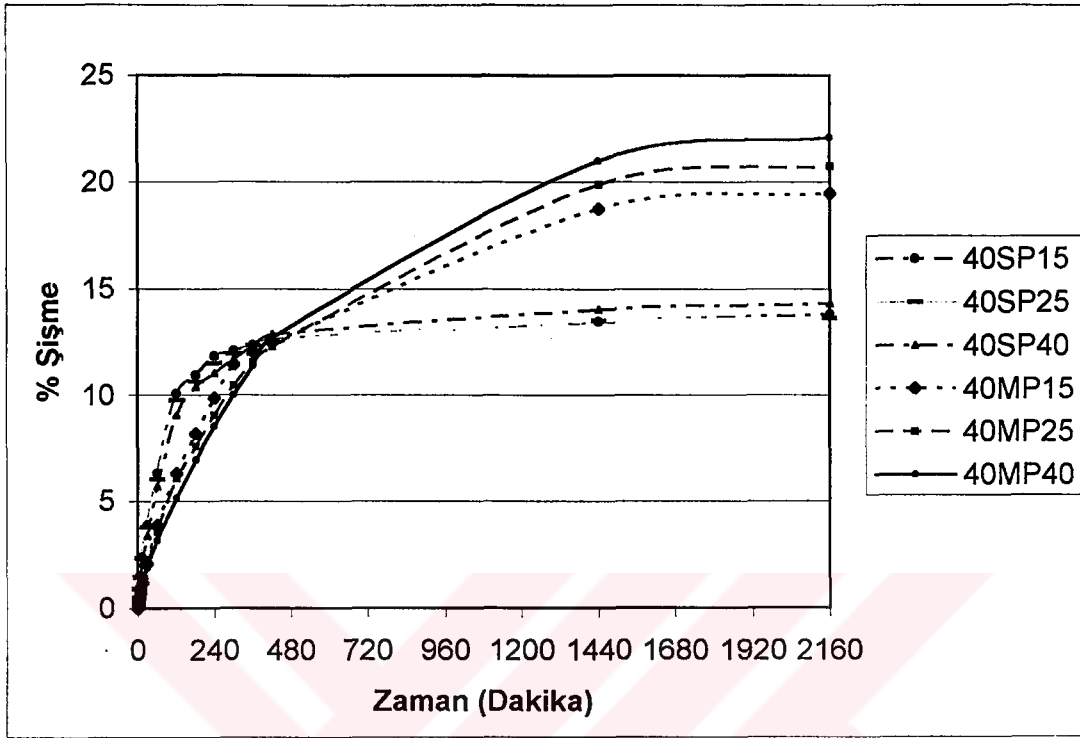
Kalıp içerisindeki numunelerin üst kısmından serbest şişme deneyi için, alt kısmından şişme basıncı için konsolidasyon ringlerine numune alınmıştır. Aynı su muhtevasında daha fazla enerji ile sıkıştırılan numunenin kuru yoğunluğunun daha yüksek olacağı şartını sağlayan iki farklı numune üzerinde serbest şişme ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları yapılan iki deneyin ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.1.1 Hazırlanan numunelerin özellikleri

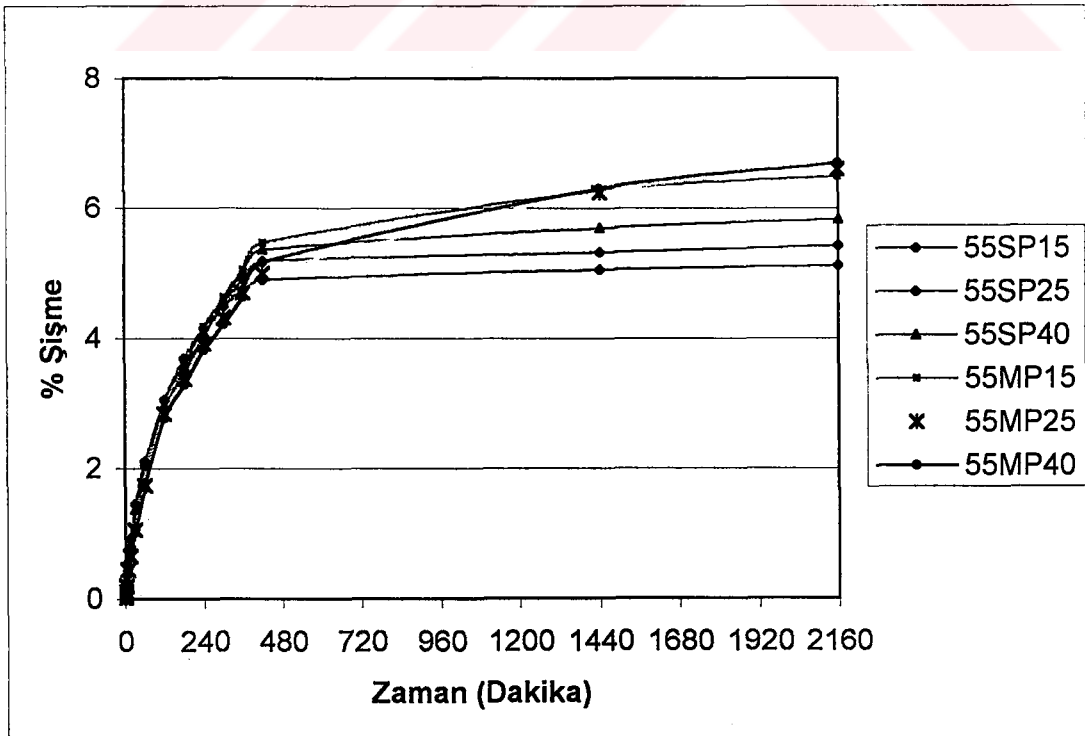
İsim	Su Mutevası(%)	Tokmak Tipi	Vuruş Sayısı	Enerji (kJ/m ³)	Kuru Yoğunluk(g/cm ³)
40SP15	40	Standart	15	355,77	0,943
40SP25	40	Standart	25	592,96	0,954
40SP40	40	Standart	40	948,73	0,987
40MP15	40	Modifiye	15	1617,15	1,133
40MP25	40	Modifiye	25	2695,26	1,163
40MP40	40	Modifiye	40	4312,41	1,178
55SP15	55	Standart	15	355,77	0,976
55SP25	55	Standart	25	592,96	0,985
55SP40	55	Standart	40	948,73	0,993
55MP15	55	Modifiye	15	1617,15	0,995
55MP25	55	Modifiye	25	2695,26	0,999
55MP40	55	Modifiye	40	4312,41	1,003

5.1.2 Deney sonuçları

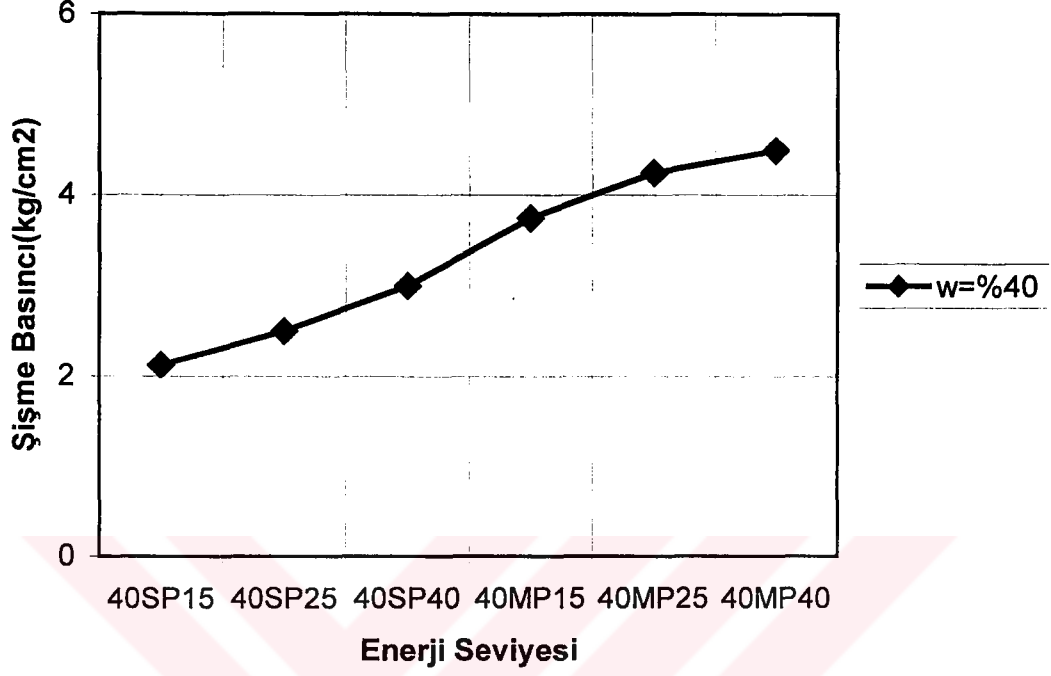
Deneyler sonucunda elde edilen, enerji – şişme yüzdesi ilişkileri Şekil 5.2 ve 5.3'te, enerji şişme basıncı ilişkileri Şekil 5.4 ve 5.5'te, kuru yoğunluk şişme yüzdesi ilişkileri Şekil 5.6'da ve kuru yoğunluk şişme basıncı ilişkileri Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Ayrıca Çizelge 5.2'de numunelerin başlangıçta uygulanan enerji seviyesi için, porozite (n), boşluk oranı (e), doygunluk derecesi, kuru yoğunluk, ve deney sonucunda elde edilen şişme yüzdesi ve şişme basıncı sonuçları verilmiştir. Şekil 5.8'de ise deneyler sonucunda elde edilen şişme basıncı-şişme yüzdesi ilişkisi verilmiştir.



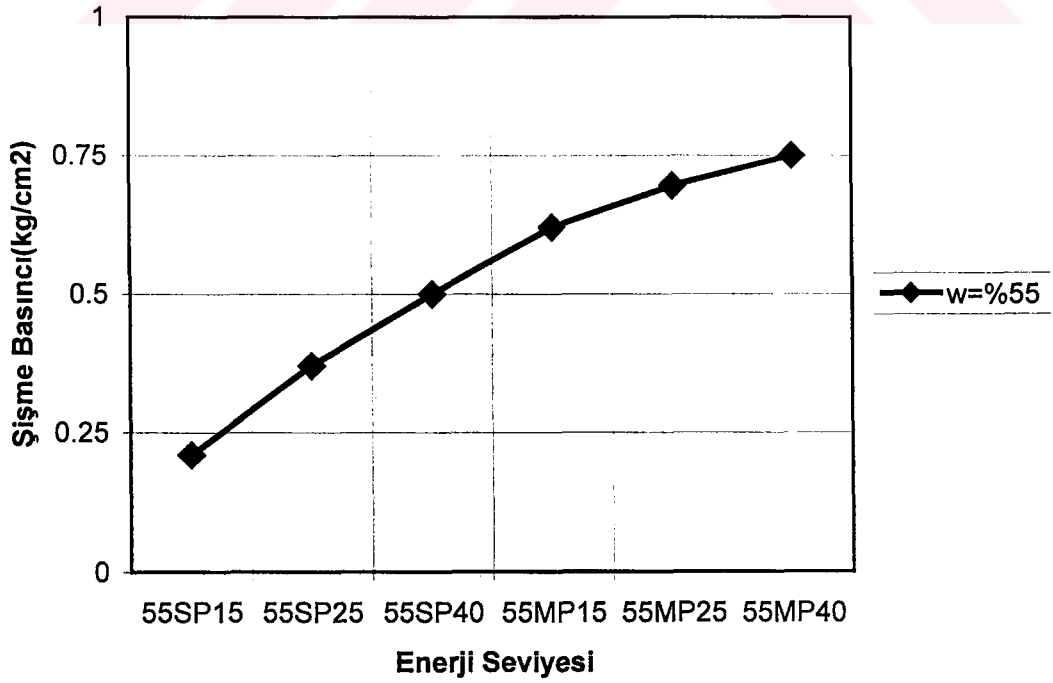
Şekil 5.1.2 %40 Su muhtevasında farklı enerjilerin şişme yüzdesine etkisi



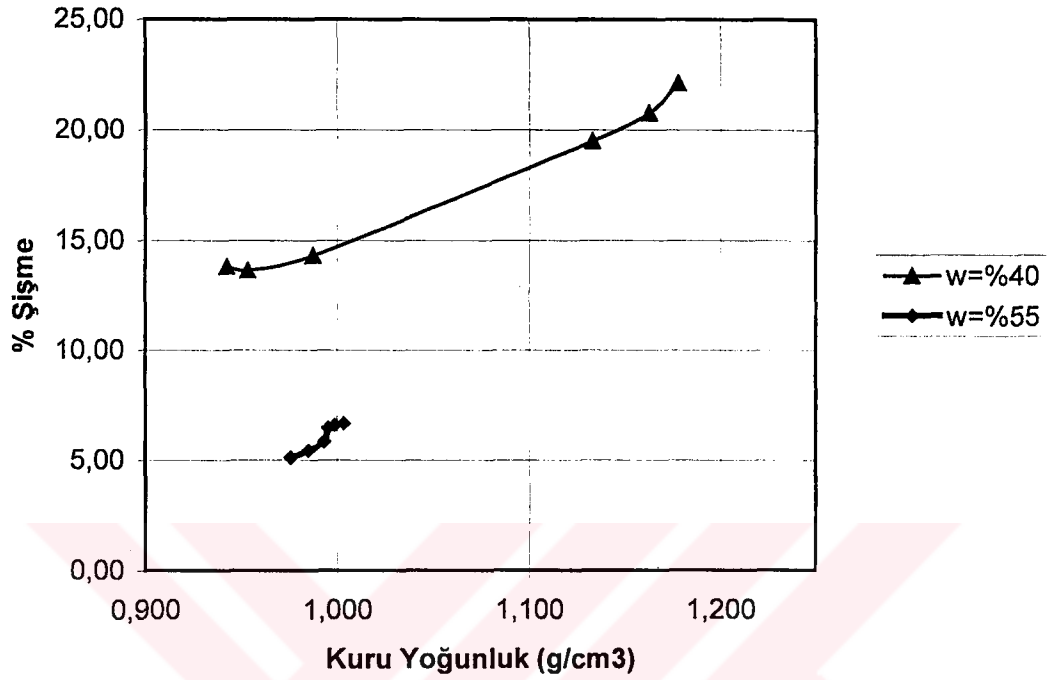
Şekil 5.1.3 %55 Su muhtevasında farklı enerjilerin şişme yüzdesine etkisi



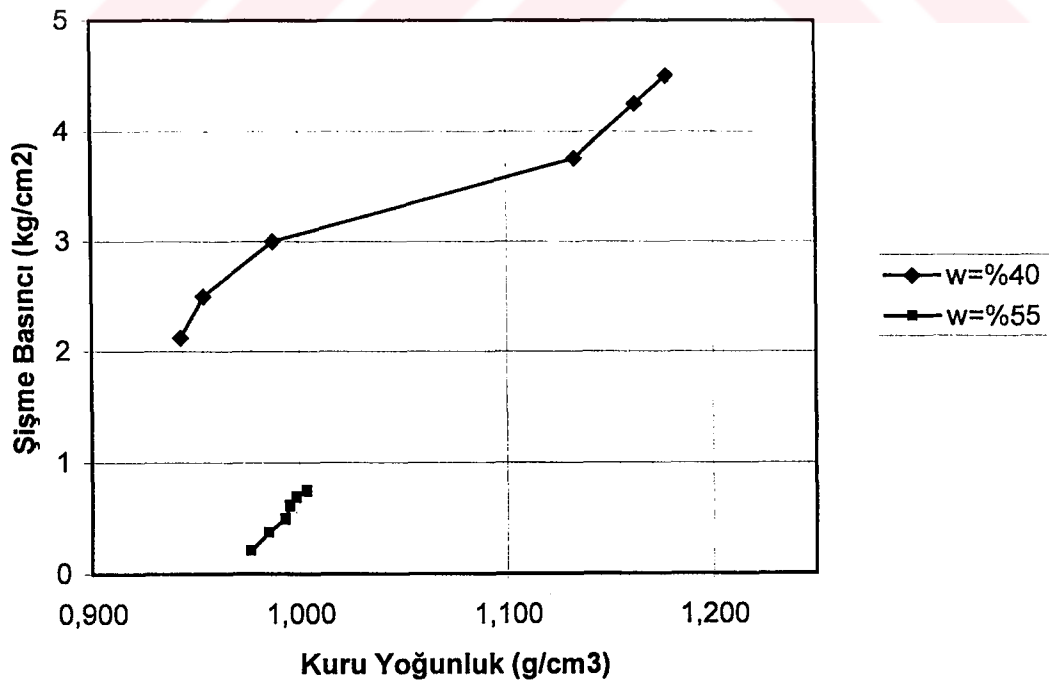
Şekil 5.1.4 %40 Su muhtevasında farklı enerjilerin şişme basıncına etkisi



Şekil 5.1.5 %55 Su muhtevasında farklı enerjilerin şişme basıncına etkisi



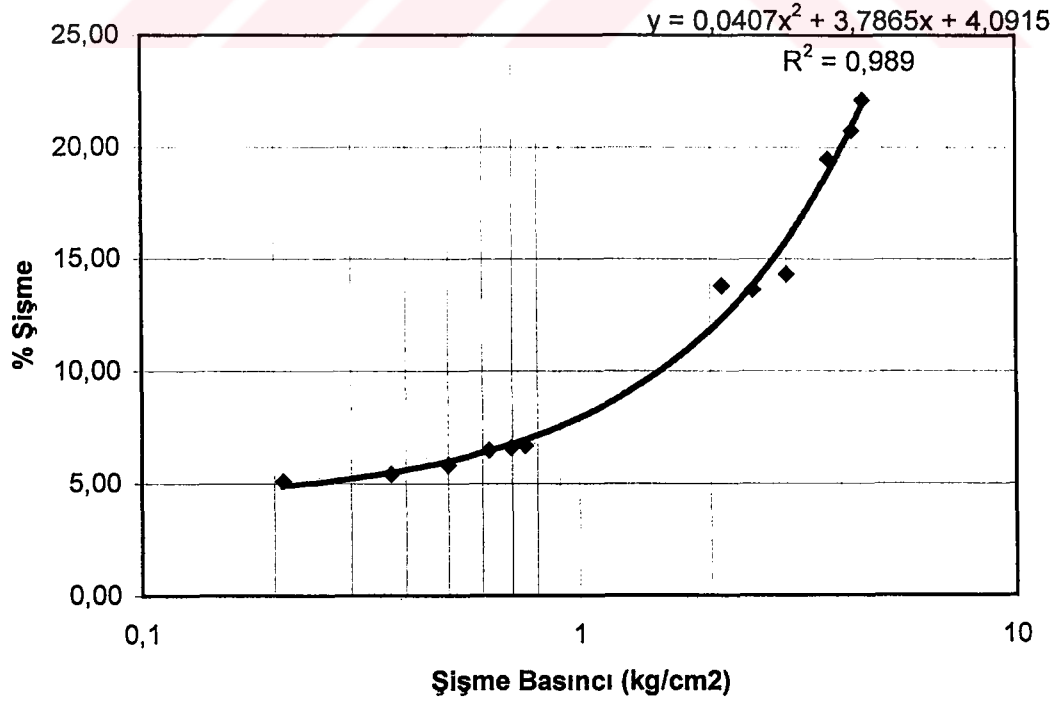
Şekil 5.1.6 Kuru yoğunluk-şişme yüzdesi ilişkisi



Şekil 5.1.7 Kuru yoğunluk-şişme basıncı ilişkisi

Çizelge 5.1.2 Hazırlanan numunelerin bazı geoteknik özellikleri

Numune	Kuru Yoğunluk(g/cm ³)	Porozite (n)	Boşluk Oranı (e)	Doygunluk Derecesi (S)	Şişme Yüzdesi (%)	Şişme Basıncı
40SP15	0,943	0,63	1,71	0,60	13,79	2,13
40SP25	0,954	0,63	1,67	0,61	13,63	2,50
40SP40	0,987	0,61	1,58	0,64	14,31	3,00
40MP15	1,133	0,56	1,25	0,82	19,47	3,75
40MP25	1,163	0,54	1,19	0,86	20,74	4,25
40MP40	1,178	0,54	1,16	0,88	22,11	4,50
55SP15	0,976	0,62	1,61	0,87	5,13	0,21
55SP25	0,985	0,61	1,59	0,88	5,43	0,37
55SP40	0,993	0,61	1,57	0,89	5,83	0,50
55MP15	0,995	0,61	1,56	0,90	6,49	0,62
55MP25	0,999	0,61	1,55	0,90	6,60	0,70
55MP40	1,003	0,61	1,54	0,91	6,69	0,75



Şekil 5.1.8 Serbest şişme-şişme basıncı ilişkisi

5.1.3 Deneý sonuçlarının deęerlendirilmesi

Kuru birim hacim ağırlığı ve başlangıç su muhtevasının zeminlerdeki şişme potansiyelini önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir [26 ve 39]. Çalışmanın bu kısmında doğal bir kil olan ‐Türkmen Kili (Zemin D)‐, üzerinde su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığıın şişme özelliklerine etkileri ve farklı su muhtevalarında uygulanan enerji ile kuru yoğunluk arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir. Sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

%40 ve %55 su muhtevalarında hazırlanan numuneler 355.77 kJ/m^3 ile 4312.41 kJ/m^3 arasında toplam altı enerji seviyesinde sıkıştırılmıştır. Uygulanan enerji seviyesinin kuru yoğunluk üzerinde %40 su muhtevasında çok daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. %40 su muhtevasında hazırlanan numunelerin kuru yoğunlukları 0.943 g/cm^3 ile 1.178 g/cm^3 arasında değişirken, %55 su muhtevasında hazırlanan numunelerin kuru yoğunlukları 0.976 g/cm^3 ile 1.003 g/cm^3 arasında değişmiştir. Doygunluk derecesi başlangıç su muhtevası ve uygulanan enerji miktarından önemli ölçüde etkilenmiştir. %40 su muhtevasında hazırlanan numunelerin doyguluk dereceleri 0.60 ile 0.88 arasında değişirken, %55 su muhtevasında hazırlanan numunelerin doyguluk dereceleri 0.87 ile 0.91 arasında değişmiştir. Su muhtevasının kuru yoğunluk ve doyguluk derecesinde olan etkileri, artan su muhtevası ile zemin taneleri arasındaki boşlukların su ile ve bunun sonucunda uygulanan enerjinin zeminin sıkışmasında olan etkisinin azalmasına bağlanabilir.

%40 su muhtevasında yapılan serbest şişme deneylerinde; en yüksek şişme potansiyeli %22.10 ile 40MP40 numunesinde, en düşük şişme potansiyeli ise %13,63 ile 40SP25 numunesinde görülmüştür. Uygulanan enerji seviyesi kuru yoğunluğu ve şişme potansiyelini önemli ölçüde arttırmıştır. Modifiye proktor enerji seviyelerinde hazırlanan numunelerin serbest şişmelerini tamamlamaları için yaklaşık 24 saatlik süre gerekmiştir, ancak standart proktor enerji seviyelerinde hazırlanan numuneler serbest şişmelerini 5-6 saat ierisinde tamamlamışlardır. Standart proktor enerji seviyelerinde hazırlanan numuneler başlangıçta daha çok şişme gösterirken, zaman içerisinde yüksek enerjilerde sıkıştırılan numuneler daha yüksek şişme değerlerine ulaşmışlardır. Bu davranış düşük enerji seviyelerinde hazırlanan numunelerin daha yüksek olan boşluk oranına (e) bağlanabilir.

%55 su muhtevasında yapılan serbest şişme deneylerinde en yüksek şişme potansiyeli %6.69 ile 55MP40 numunesinde, en düşük şişme potansiyeli ise %5,13 ile 55SP15 numunesinde görülmüştür. Enerji seviyesindeki artış şişme potansiyelinde az da olsa artışa neden olmuştur. Ancak bu etki %40 su muhtevasında gözlemlenen artışın yanında oldukça azdır. %40 su muhtevasında enerji seviyesinin artışı, şişme yüzdesini %8.47 oranında

arttırırken, %55 su muhtevasında bu artış %1.56 olarak gerçekleşmiştir. Şişmenin tamamlanması için gereken süreler ise enerji seviyesinin değişmesinden önemli ölçüde etkilenmemiştir. Bu davranış, boşluk oranının enerji ile önemli değişiklikler meydana getirmemesine bağlanabilir.

Numuneler üzerinde yapılan şişme basıncı deneylerinde, şişme basıncı değişimlerinin serbest şişme değişimleri ile paralellik gösterdiği gözlemlenmiştir. %40 su muhtevasında farklı enerji seviyelerinde hazırlanan numuneler 2.13 kg/cm^2 ile 4.50 kg/cm^2 arasında, %55 su muhtevasında hazırlanan numuneler 0.21 kg/cm^2 ile 0.75 kg/cm^2 aranda şişme basıncı göstermiştir.

Deney sonuçlarının kuru yoğunluk ve su muhtevası ile değişimi incelendiğinde ilginç sonuçlar görülmüştür. Kuru yoğunluğu $0,987 \text{ g/cm}^3$ olan 40SP40 numunesinin serbest şişme değeri %14.31, şişme basıncı değeri 3 kg/cm^2 olarak gerçekleşmiştir. Ancak kuru yoğunluğu hemen hemen aynı olan ($0,985 \text{ g/cm}^3$) 55SP25 numunesinde serbest şişme %5.143, şişme basıncı $0,37 \text{ kg/cm}^2$ olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 5.1.3'de deney başlangıçlarındaki ve deney sonlarındaki su muhtevaları verilmiştir.

Çizelge 5.1.3 Başlangıç ve son su muhtevası değişimi

Numune	Başlangıç Su Muhtevası (%)	Son Su Muhtevası (%)	
		Serbest Şişme	Şişme Basıncı
40SP15	40	70	53
40SP25	40	70	52
40SP40	40	69	52
40MP15	40	65	50
40MP25	40	64	50
40MP40	40	64	49
55SP15	55	69	63
55SP25	55	69	63
55SP40	55	69	62
55MP15	55	68	63
55MP25	55	69	62
55MP40	55	68	62

Özellikle %40 su muhtevasında yapılan deneylerde düşük enerji seviyelerinde hazırlanan numunelerin daha fazla su emmelerine rağmen daha düşük şişme değerleri verdikleri görülmüştür. Bu numunelerin boşluk oranı daha yüksek ve doygunluk dereceleri daha düşüktür. Bu nedenle daha fazla su emmişlerdir. Ancak normal şartlar altında daha fazla su emen zeminin daha yüksek şişme potansiyeline sahip olması beklenebilir. Bu doğrultuda kil mineralinin şişme özelliği, davranışı etkileyebilir. Çünkü bazı kil minerallerinin hacimleri su ile önemli ölçüde artmaktadır.



5.2 Katkı Maddeleri ve Kür Süresinin Şişme Potansiyeline Etkisi

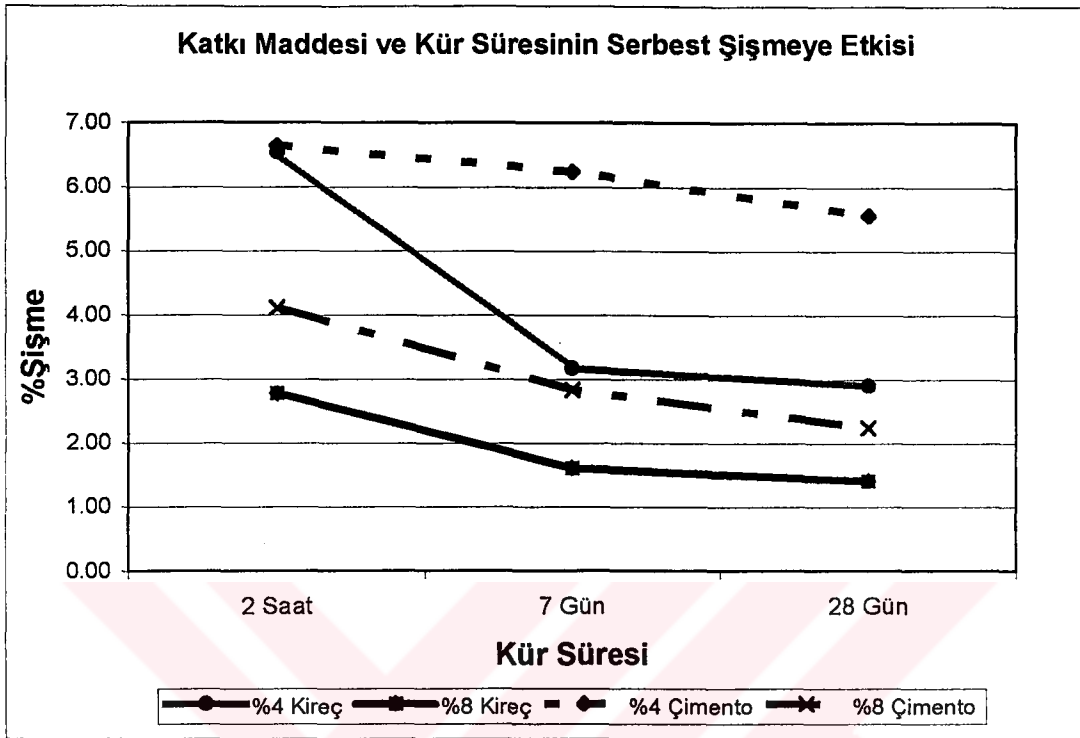
Şişme potansiyelinin tehlike oluşturduğu durumlarda en sık kullanılan iyileştirme yöntemlerinden biri de katkı maddeleri kullanılarak bu zeminlerin şişme potansiyelinin azaltılmasıdır. Çalışmanın bu bölümünde Türkmen Kili (Zemin D) ve çok yüksek şişme potansiyeline sahip olan ticari bentonit (Zemin A) iki farklı oranda kireç ve çimento ile stabilize edilmiş, hazırlanan numuneler 2 saat, 7 gün ve 28 gün süre ile kür edilmiş, şişme potansiyelinin katkı maddesi miktarı ve kür süresi ile değişimi incelenmiştir.

5.2.1 Deneysel yöntem

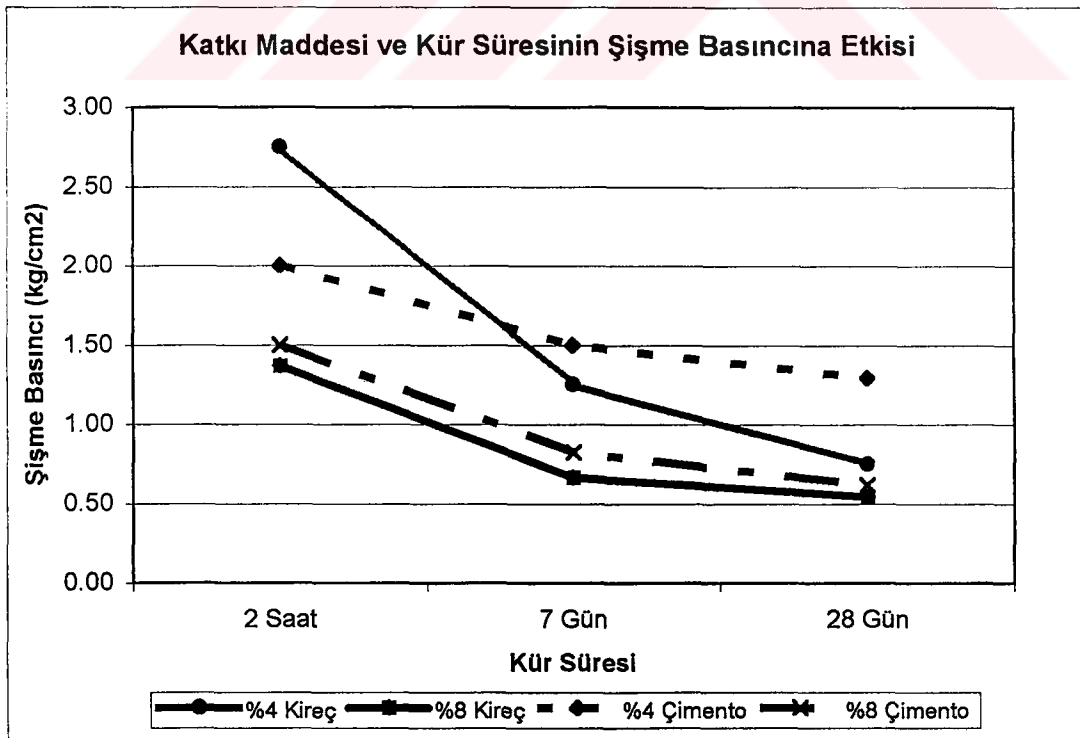
Çalışmanın bu bölümünde; Zemin A ve Zemin D etüvde kurutulmuş ve kuru ağırlıklarının %4 ve %8'i oranında kireç ve çimento ile karıştırılmıştır. Bu karışımlardan, Zemin A, Zemin A için standart proktor optimum su muhtevası olan %40 su muhtevasında standart proktor enerji seviyesinde, Zemin D, Zemin D için modifiye proktor optimum su muhtevası olan %40 su muhtevasında modifiye proktor enerji seviyesinde standart proktor kalıbında sıkıştırılmıştır. Bu şekilde hazırlanan numuneler, kalıptan çıkarılarak, alt kısmı şişme basıncı, üst kısmı serbest şişme deneyinde kullanılmak üzere iki parçaya ayrılmıştır. Bu parçalar su muhtevasını korumak amacıyla plastik folyolar ile kapatılmış ve 2 saat, 7 gün ve 28 gün süreler ile küre bırakılmıştır. Kür süresini tamamlayan numuneler konsolidasyon ringlerine alınarak üzerlerinde serbest şişme ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır.

5.2.2.1 Deney sonuçları (Zemin D)

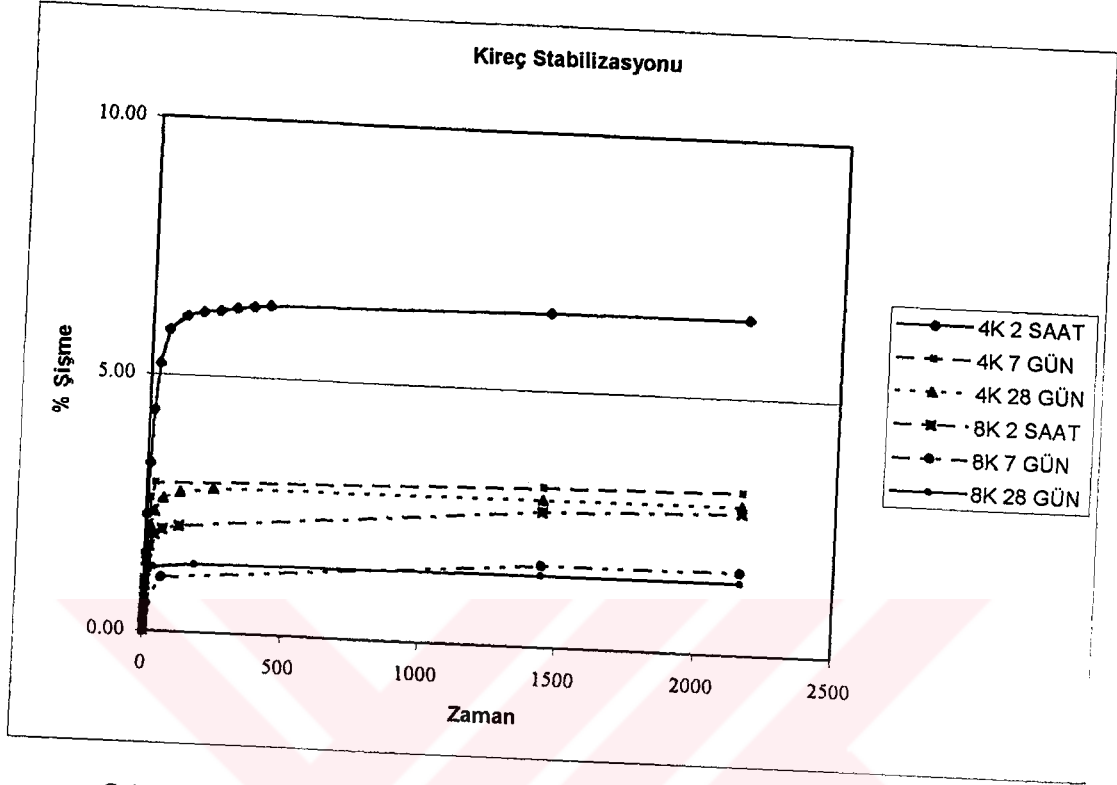
Deneyler sonucunda elde edilen, Zemin D'ye ait katkı maddesi ve kür süresi ile serbest şişme ve şişme basıncı ilişkileri sırasıyla Şekil 5.2.1 ve 5.2.2'de, kireç stabilizasyonunun şişme-zaman grafikleri Şekil 5.2.3'te, çimento stabilizasyonunun şişme-zaman grafikleri Şekil 5.2.4'te verilmiştir. Ayrıca daha önceki bölümde de yapıldığı üzere bu grup deneyler için şişme yüzdesi şişme basıncı ilişkisi Şekil 5.2.5'te verilmiştir.



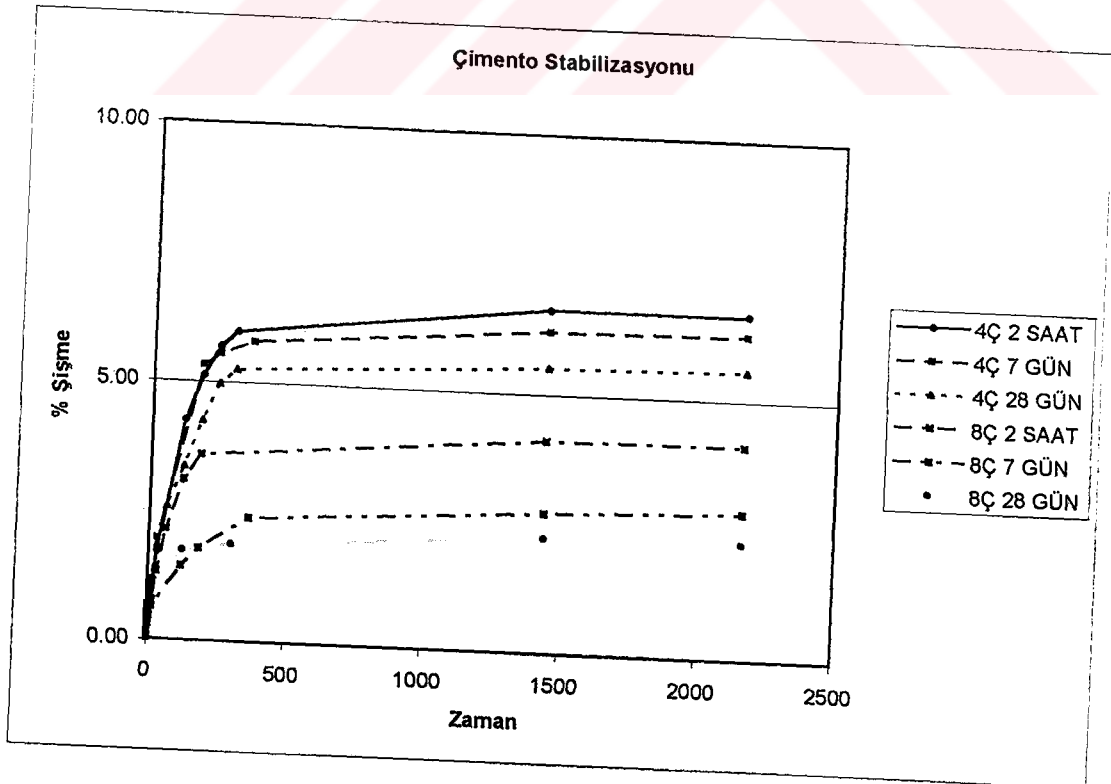
Şekil 5.2.1 Zemin D için katkı maddesi ve kür süresinin şişme yüzdesine etkisi



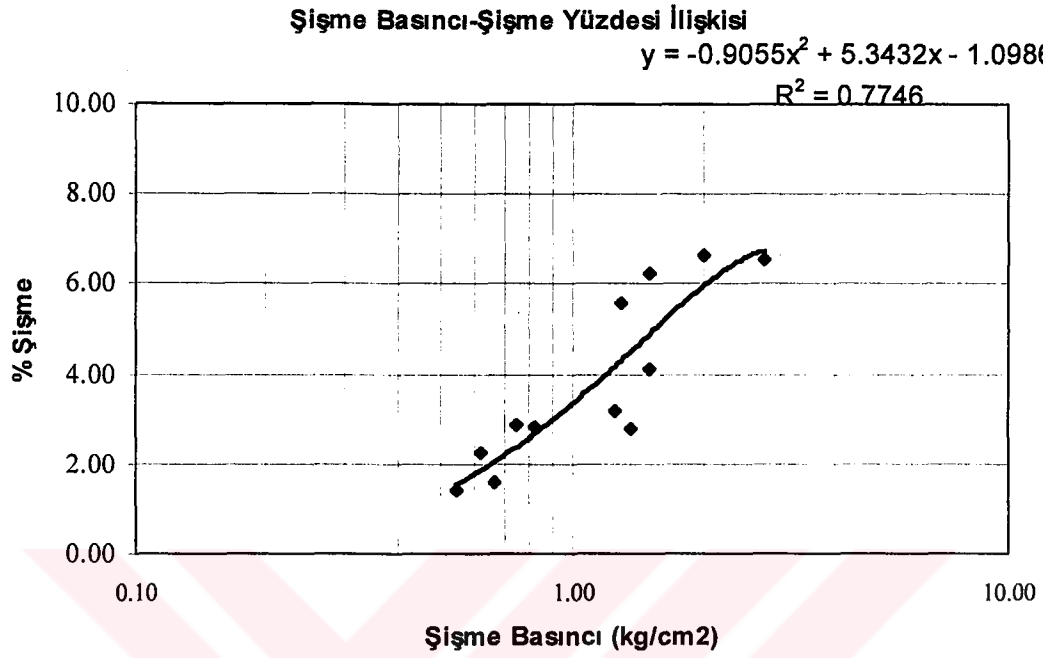
Şekil 5.2.2 Zemin D için katkı maddesi ve kür süresinin şişme basıncına etkisi



Şekil 5.2.3 Kireç ile stabilize edilmiş Zemin D'ye ait şişme-zaman grafikleri



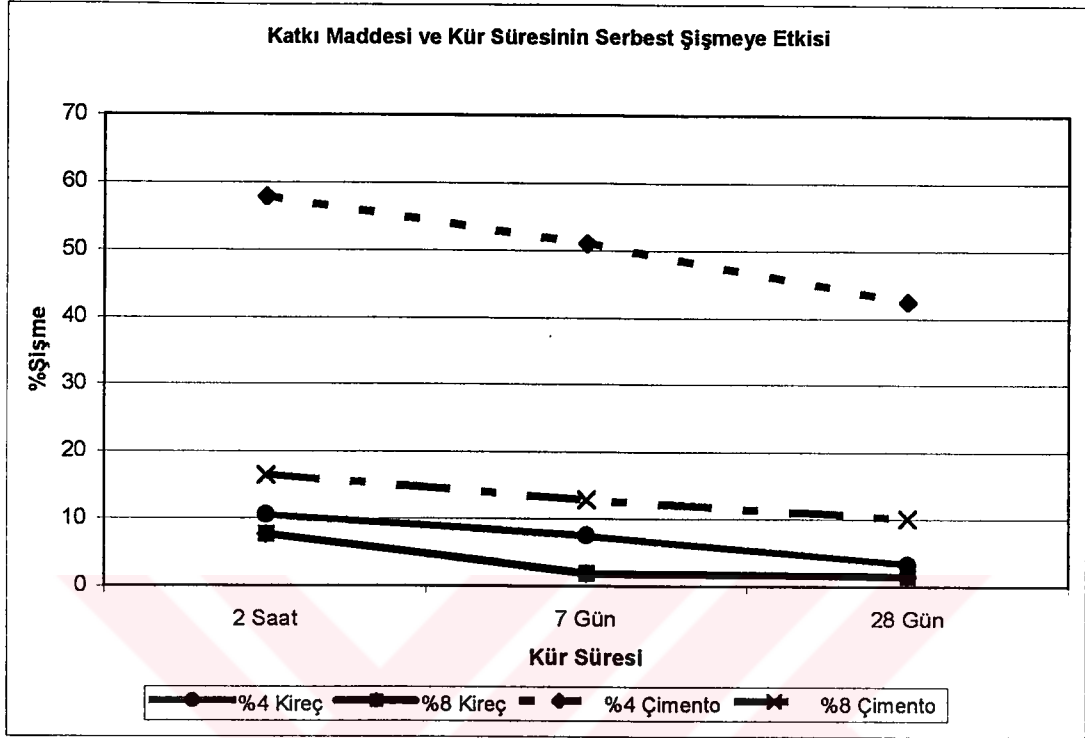
Şekil 5.2.4 Çimento ile stabilize edilmiş Zemin D'ye ait şişme-zaman grafikleri



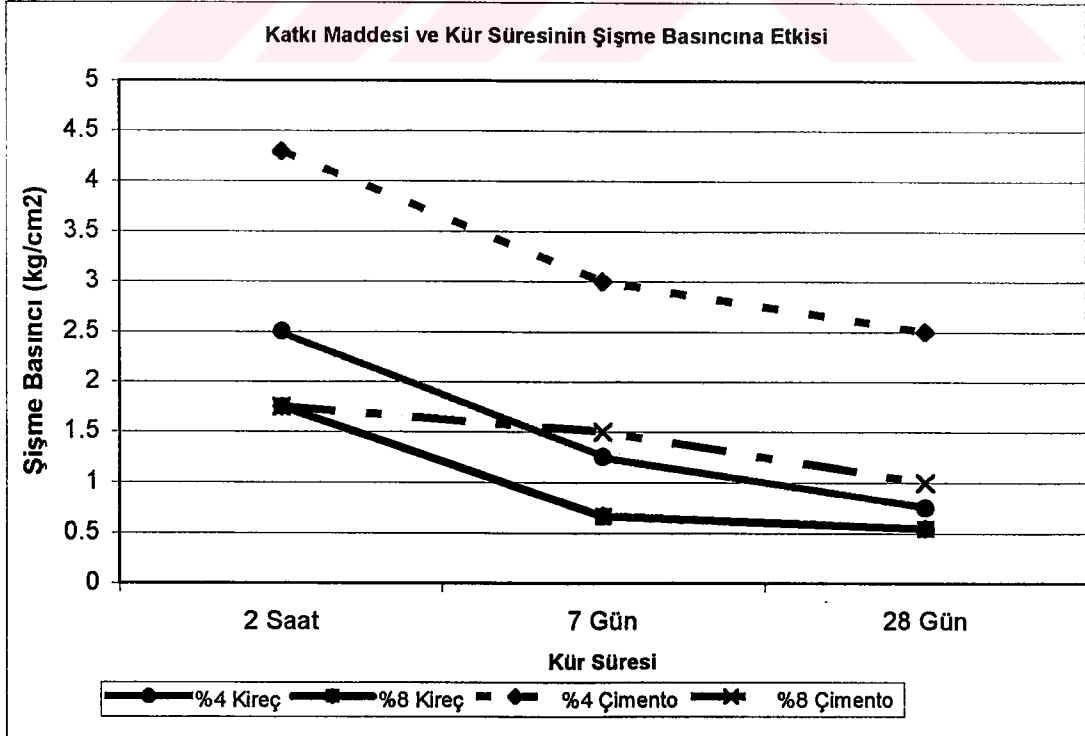
Şekil 5.2.5 Stabilize edilmiş Zemin D'ye ait serbest şişme-şişme basıncı ilişkisi

5.2.2.2 Deney sonuçları (Zemin A)

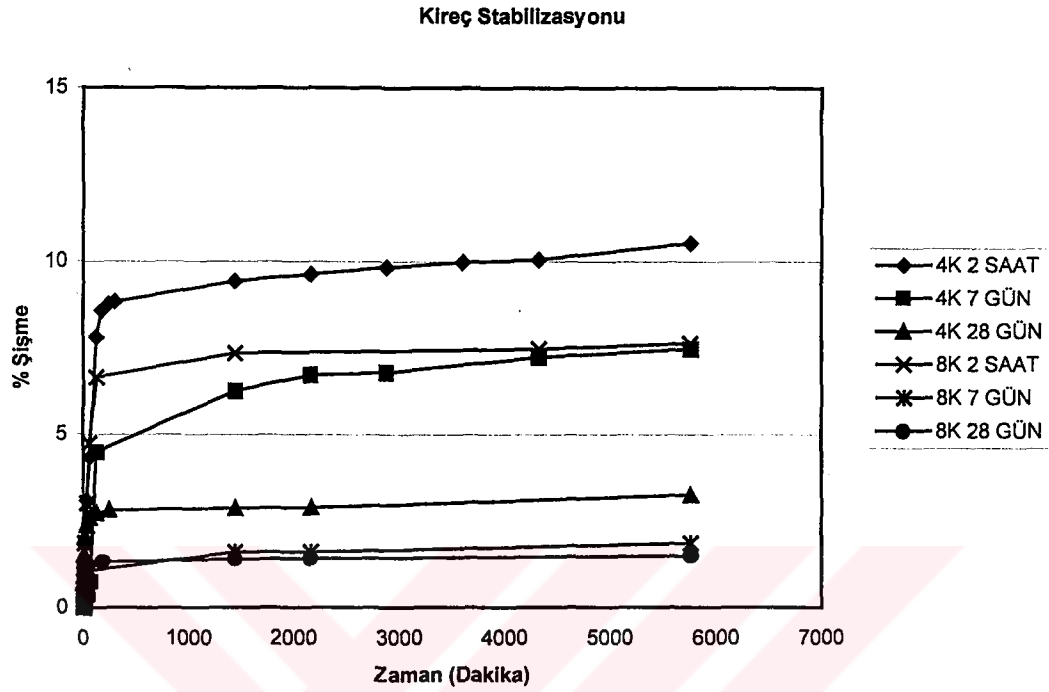
Deneyler sonucunda elde edilen, Zemin A'ye ait katkı maddesi ve kür süresi ile serbest şişme ve şişme basıncı ilişkileri sırasıyla Şekil 5.2.1 ve 5.2.2'de, kireç stabilizasyonunun şişme-zaman grafikleri Şekil 5.2.3'te, çimento stabilizasyonunun şişme-zaman grafikleri Şekil 5.2.4'te verilmiştir. Ayrıca daha önceki bölümde de yapıldığı üzere bu grup deneyler için şişme yüzdesi şişme basıncı ilişkisi Şekil 5.2.5'te verilmiştir.



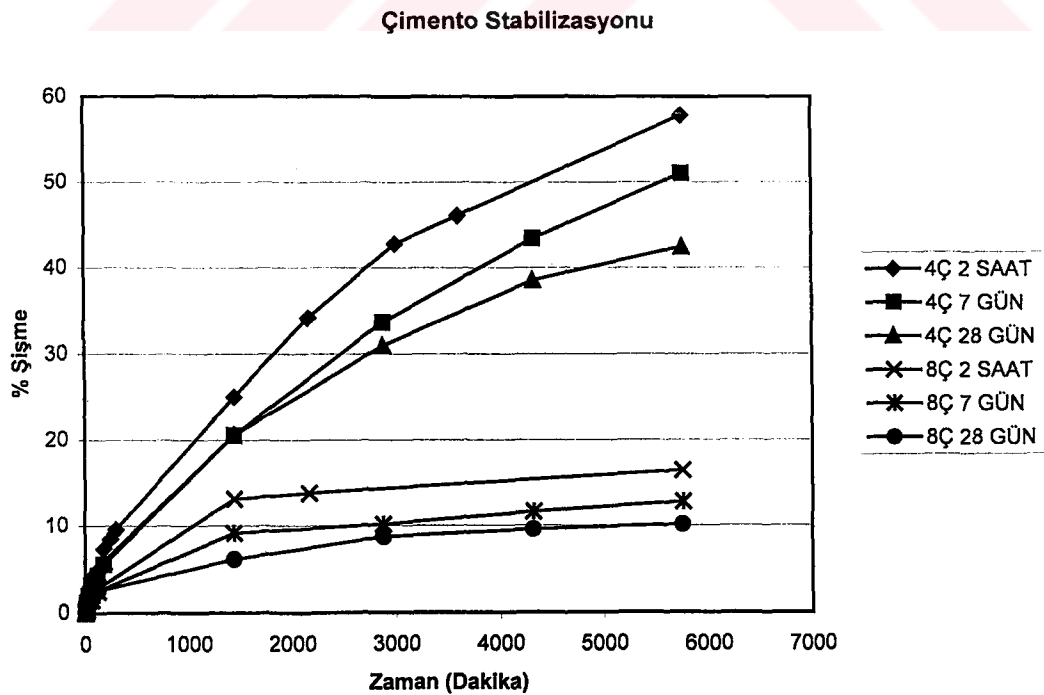
Şekil 5.2.6 Zemin A için katkı maddesi ve kür süresinin şişme yüzdesine etkisi



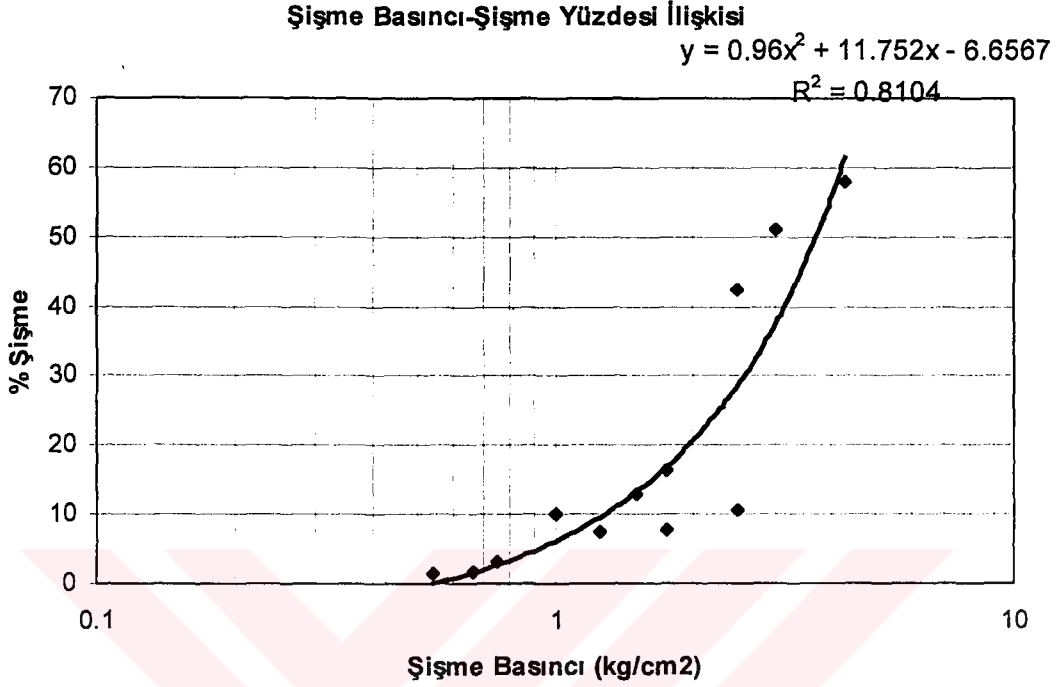
Şekil 5.2.7 Zemin A için katkı maddesi ve kür süresinin şişme basıncına etkisi



Şekil 5.2.8 Kireç ile stabilize edilmiş Zemin A'ya ait şişme-zaman grafikleri



Şekil 5.2.9 Çimento ile stabilize edilmiş Zemin A'ya ait şişme-zaman grafikleri



Şekil 5.2.10 Stabilize edilmiş Zemin A'ya ait serbest şişme-şişme basıncı ilişkisi

5.2.3 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Zeminlerin geoteknik özelliklerinin değişik katkı maddeleri ile iyileştirilmesi oldukça sık kullanılan bir yöntemdir. Bu maksatla en sık çimento ve kireç kullanılmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde iki farklı zemin üzerinde eşit miktarda çimento ve kirecin, ve kür süresinin şişme özelliklerine etkileri değerlendirilmiştir.

Zemin D için aynı su muhtevası ve enerji seviyesinde % 20,74 olan şişme yüzdesi ve 4,25 kg/cm² olan şişme basıncı değerlerinde, en büyük iyileşme %8 Kireç ve 28 gün kür edilen numune üzerinde %1,41 şişme yüzdesi ve 0,55 kg/cm² şişme basıncı belirlemiştir. Aynı malzeme üzerinde çimento stabilizasyonu sonucunda en iyi sonuçlar %8 Çimento ve 28 gün kür edilen numune üzerinde, %2,24 şişme yüzdesi ve 0,62 kg/cm² şişme basıncı ile görülmüştür.

Zemin D üzerinde yapılan çalışmada kür süresinin şişme özelliklerinin iyileşmesinde önemli bir faktör olduğu gözlenmiştir. Kür süresi en önemli etkiyi %4 Kireç ile stabilize edilen numune üzerinde göstermiştir. Çimento stabilizasyonu kür süresinden kireç stabilizasyonuna oranla nispeten daha az etkilenmiştir.

Zemin D için şişme hızları incelendiğinde kireç ile stabilize edilen numunelerin şişmelerini çimento ile stabilize edilen numunelere oranla daha kısa sürede tamamladıkları gözlemlenmiştir.

Zemin A üzerinde yapılan çalışmada, bu zemin üzerinde kireç stabilizasyonunun çimento stabilizasyonuna oranla çok daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Şişme potansiyelindeki en önemli azalma %8 Kireç ve 28 gün kür edilen numune üzerinde görülmüştür.

Zemin A için şişme hızları incelendiğinde, Zemin D'ye benzer olarak kireç ile stabilize edilen numunelerin şişmelerini çimento ile stabilize edilen numunelere oranla daha kısa sürede tamamladıkları görülmüştür.

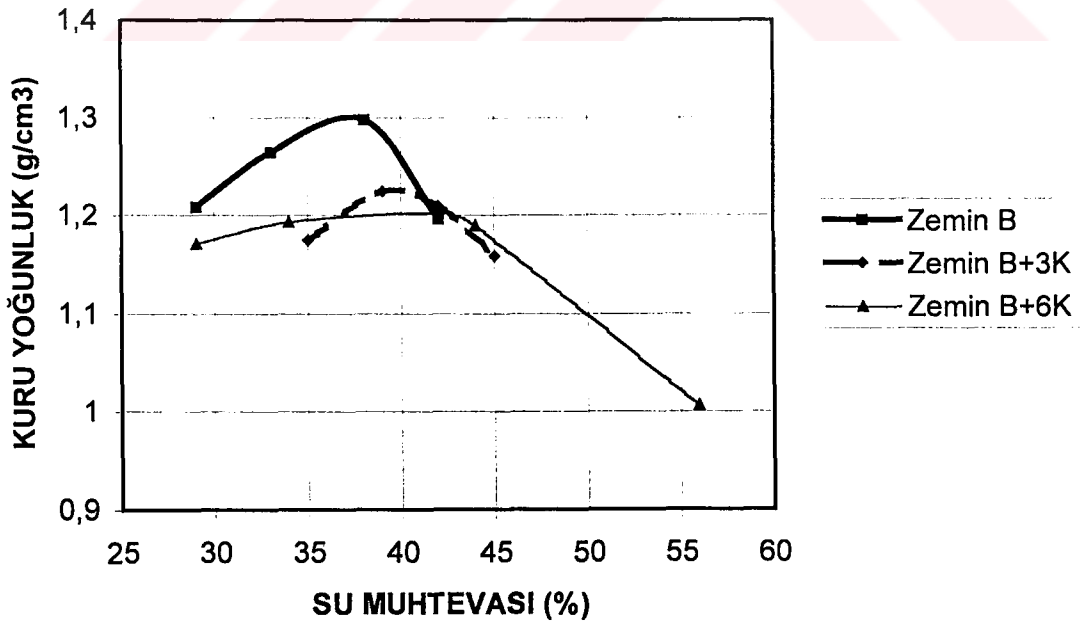
Literatür çalışmalarında, son yıllarda şişen zeminlerin stabilizasyonunda kür süresinin şişme potansiyeline etkisi konusunda hazırlanmış iki çalışmaya rastlanmıştır. Bunlardan ilkinde C sınıfı uçucu küllerin şişen zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini araştırılmıştır [8]. Bu çalışmada değişik oranlarda uçucu kül ile stabilize edilen zeminin şişme potansiyelinde, ortalama, 7 Gün kür sonucunda %15, 28 Gün kür sonucunda %32'lik azalmalar görülmüştür. Al-Mhaidib ve Al-Shamrani (1993) ise kireç ile stabilize edilen zeminlerin şişme karakteristikleri incelenmiştir. Bu çalışmada %1, 2, 4, 8 oranında kireç ile stabilize edilen şişen zeminin 1, 2, 4, 7 günlük kürler sonucunda şişme potansiyelinin değişimi de incelenmiştir. Buna göre kireç miktarı ve kür süresindeki artışlar şişme potansiyelini azaltmıştır. Bu azalma %4 kireç seviyesinde 7 Gün kür sonunda %25, %8 kireç seviyesinde 7 gün kür sonunda %45 seviyesinde olmuştur. Çalışmanın bu bölümünde elde edilen sonuçlar literatürle genelde uyum sağlamaktadır. Ancak kür süresinin özellikle %4 kireç seviyesinde daha etkili olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kireç stabilizasyonu kür süresinden uçucu küle oranla daha fazla etkilenmektedir. %4 Kireç seviyesinde kür süresinin daha etkili olması tartışma konusudur. Bunun sebebinin belirli bir değere kadar katkı miktarı-verim ilişkisinin daha iyi olduğu kanaatine varılmıştır.

5.3 Kür Sıcaklığı ve Süresinin Şişme Potansiyeline Etkisi

Şişme potansiyeline sahip zeminler stabilize edilme esnaslarında değişik çevresel koşullar ile karşılaşabilirler. Bu çevresel koşulların en önemlisi ortam sıcaklığıdır. Bu aşamada Zemin B iki farklı oranda kireç ile stabilize edilmiş, hazırlanan numuneler 7 gün ve 28 gün süre ile iki farklı sıcaklıkta kür edilmiş, şişme potansiyelinin kür süresi ve sıcaklığı ile değişimi incelenmiştir.

5.3.1 Deneysel yöntem

Çalışmanın bu bölümünde; Zemin B etüvde kurutulmuş ve kuru ağırlığının %3 ve %6'sı oranında kireç ile karıştırılmıştır. Bu aşamada kireç katkısının optimum su muhtevasına olan etkilerinin de dikkate alınabilmesi amacıyla %3 ve %6 kireç katkılı Zemin B için optimum su muhtevası belirlenmiştir. Şekil 5.3.1'de elde edilen optimum su muhtevaları görülmektedir. Elde edilen karışımlar kendi optimum su muhtevalarında distile su ile karıştırılarak standart proktor enerji seviyesinde standart sıkıştırılmıştır. Bu şekilde hazırlanan numuneler alt kısımdan şişme basıncı, üst kısmı serbest şişme deneyinde kullanılmak üzere, konsolidasyon ringlerine numuneler alınmıştır.

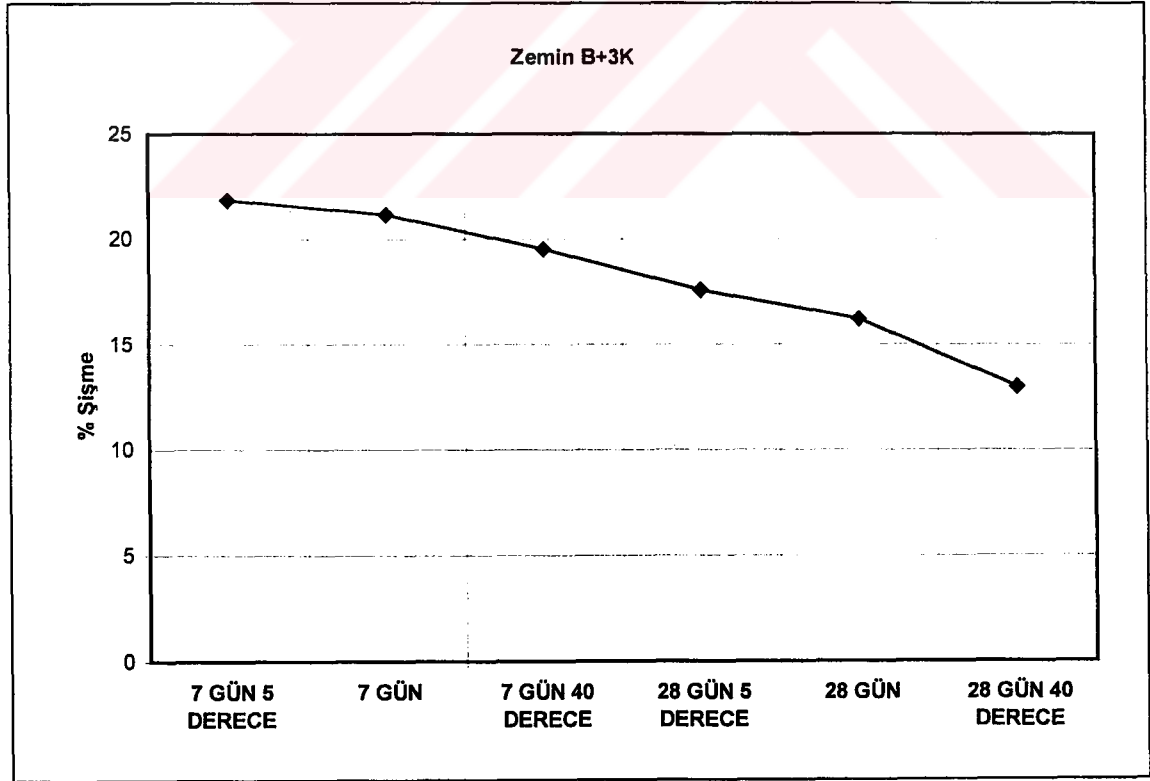


Şekil 5.3.1 Zemin B için elde edilmiş optimum su muhtevaları

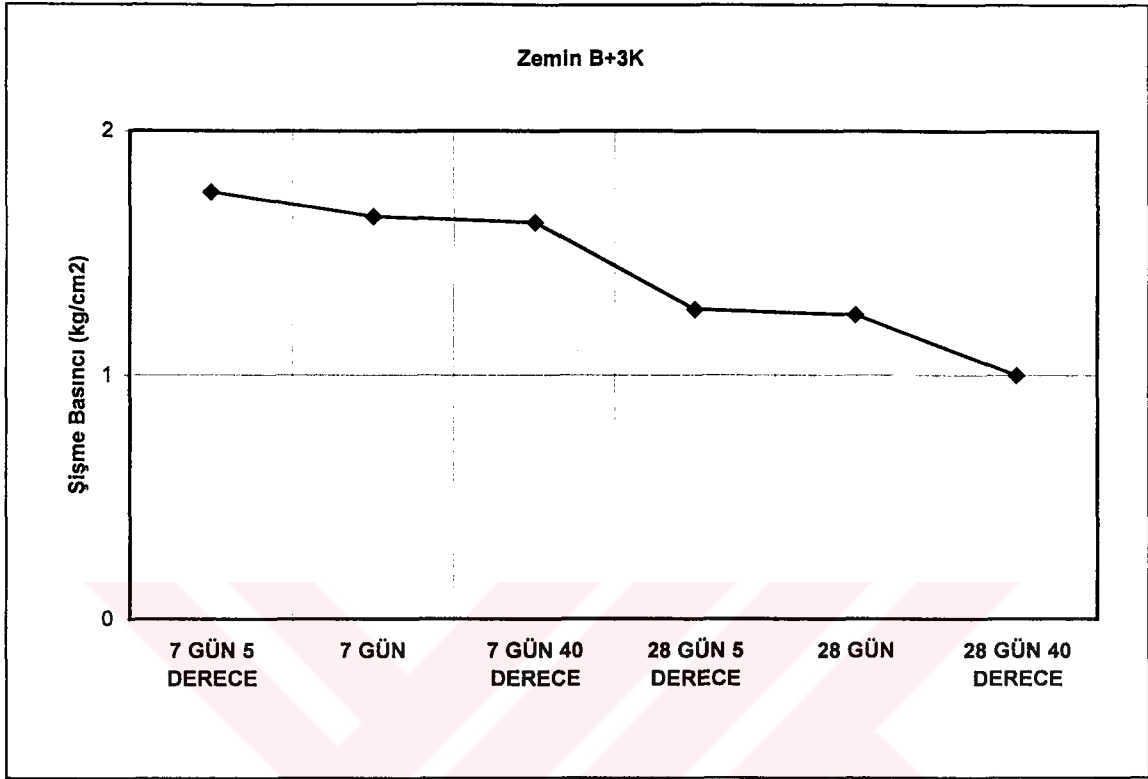
Ringlere alınan numuneler, içlerine su almasını engellemek, ve ısı ile kurummasını önlemek amacıyla iki kat plastik folyo ile sarılmış, ve sabit ısılı su banyolarına bırakılmıştır. Numunelerin aynı özellikleri göstermesini sağlayabilmek amacıyla aynı anda iki kalıba yetecek kadar numune kullanılmış, hazırlanan numunelerin biri 5 derecede, diğeri 40 derecede aynı süre için kür edilmiştir. 40 derece sıcaklık sağlamak amacıyla laboratuarda bulunan sabit sıcaklık banyosu kullanılmıştır. 5 derece su banyosu hazırlamak için, 10 litre hacimli bir kap kullanılmıştır. Kap içerisindeki suyun sıcaklığı sürekli kontrol altında tutulmuş, sıcaklığın artması durumunda su içerisine buz ilave edilerek sıcaklığın 5 derecenin altında kalması sağlanmıştır. Bu şekilde sıcaklık 2-5 derece arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Kür süresini tamamlayan numuneler üzerinde serbest şişme ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır.

5.3.2 Deney sonuçları

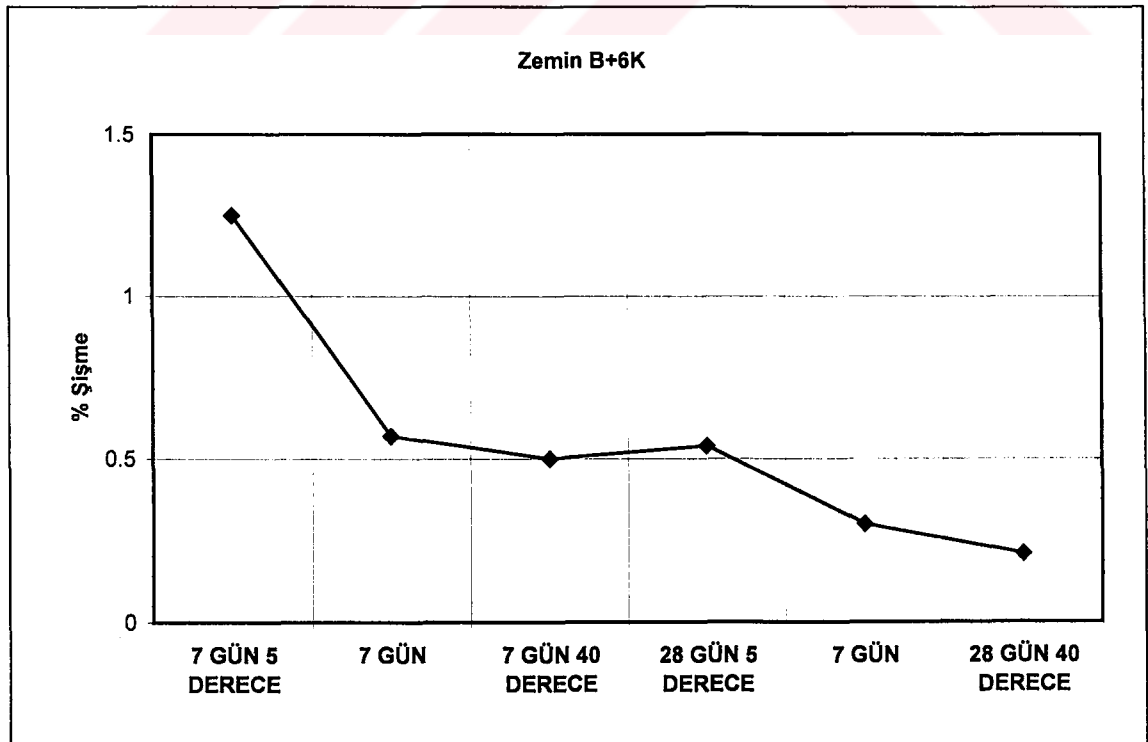
Deneyler sonucunda elde edilen, Zemin B'ye ait kür süresi ve kür sıcaklığı ile serbest şişme ve şişme basıncı ilişkileri sırasıyla Şekil 5.3.2, 5.3.3, 5.2.4 ve 5.2.5'de verilmiştir.



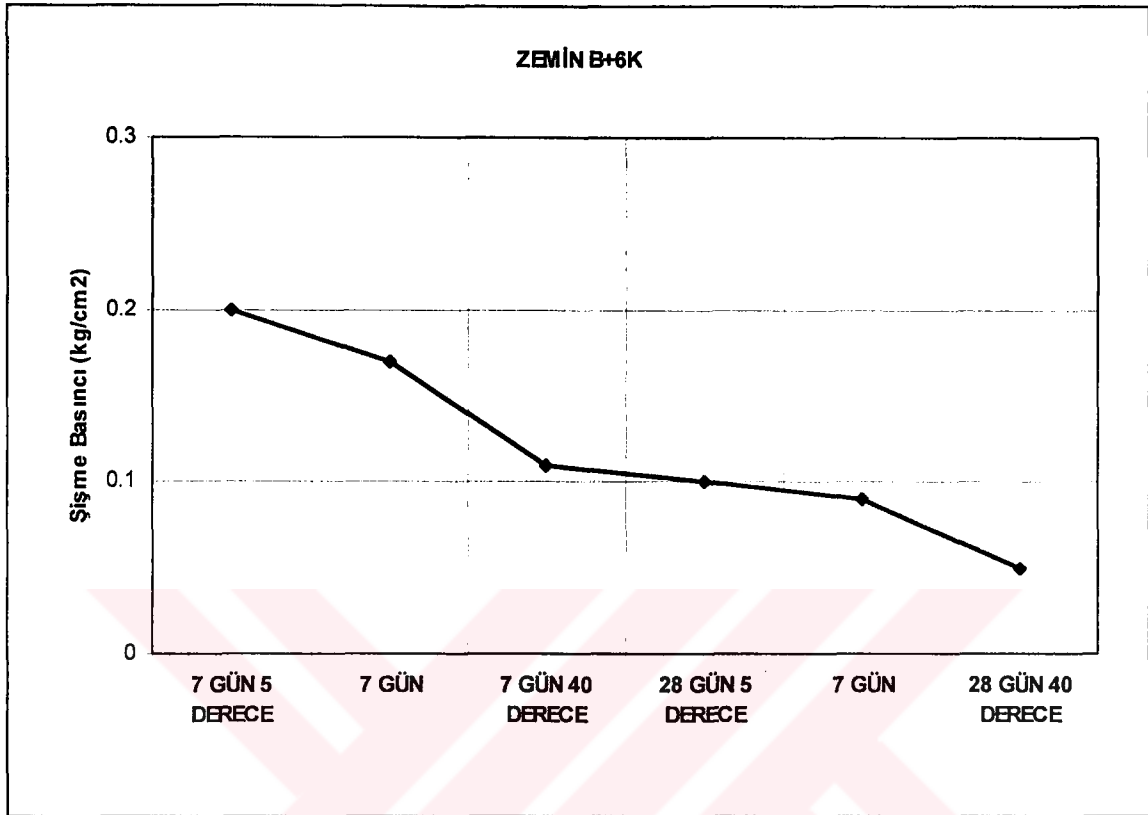
Şekil 5.3.2 Zemin B+3K için kür sıcaklığının şişme yüzdesine etkisi



Şekil 5.3.3 Zemin B+6K için kür sıcaklığının şişme basıncına etkisi



Şekil 5.3.4 Zemin B+6K için kür sıcaklığının şişme yüzdesine etkisi



Şekil 5.3.5 Zemin B+6K için kür sıcaklığının şişme basıncına etkisi

5.3.3 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Çalışmanın bu bölümünde Zemin B, %3 ve %6 oranında kireç ile stabilize edilmiştir. Stabilize edilen numunler 5 derece ve 40 derece sıcaklıkta kür edilerek şişme potansiyelleri değerlendirilmiştir. Sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

%3 Kireç ile stabilize edilen Zemin B farkı sıcaklıklarda kür edildiğinde, yüksek sıcaklıkta kür edilen numunelerin şişme potansiyellerin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu etki, serbest şişme yüzdesinde, %3 kireç katkılı 7 gün kür edilen numunelerde %11, 28 gün kür edilen numunelerde %27 olarak belirlenmiştir. %6 katkı seviyesinde, 7 gün farklı sıcaklıkta kür edilen numuneler üzerinde serbest şişme yüzdesinde, %40, 28 gün kür edilen numunelerde %62'lik bir azalma gözlemlenmiştir.

Kür sıcaklığının şişme basıncına etkileri değerlendirildiğinde, %3 katkı seviyesinde 7 gün kür edilen numunelerde %8, 28 gün kür edilen numunelerde %22 lik bir azalma söz konusudur. %6 katkı seviyesinde 7 gün kür edilen numuneler üzerinde %45, 28 gün kür edilen numunelerde %50'lik bir azalma söz konusudur.

5.4 Donma Çözünme Çevrimlerinin Şişme Potansiyeline Etkisi

Şişme potansiyeline sahip zeminler stabilize edildiklerinde karşılaşılabilecekleri diğer bir çevresel koşulda özellikle kış aylarında meydana gelebilecek donma-çözünme çevrimleridir. Bu aşamada Zemin B %3 oranında kireç ile stabilize edilmiş, hazırlanan numuneler 2 saat ve 7 gün süre ile kür edilmiştir. Bu şekilde kür edilmiş numunelerin de donma çözünme çevrimlerinden nasıl etkilendikleri belirlenmesi amaçlanmıştır. Hazırlanan numuneler 1, 4 ve 7 devir donma çözünme çevrimlerine maruz bırakılmış, daha sonra numuneler üzerinde serbest şişme ve şişme basıncı deneyleri yapılarak numunelerin şişme potansiyellerindeki değişim incelenmiştir.

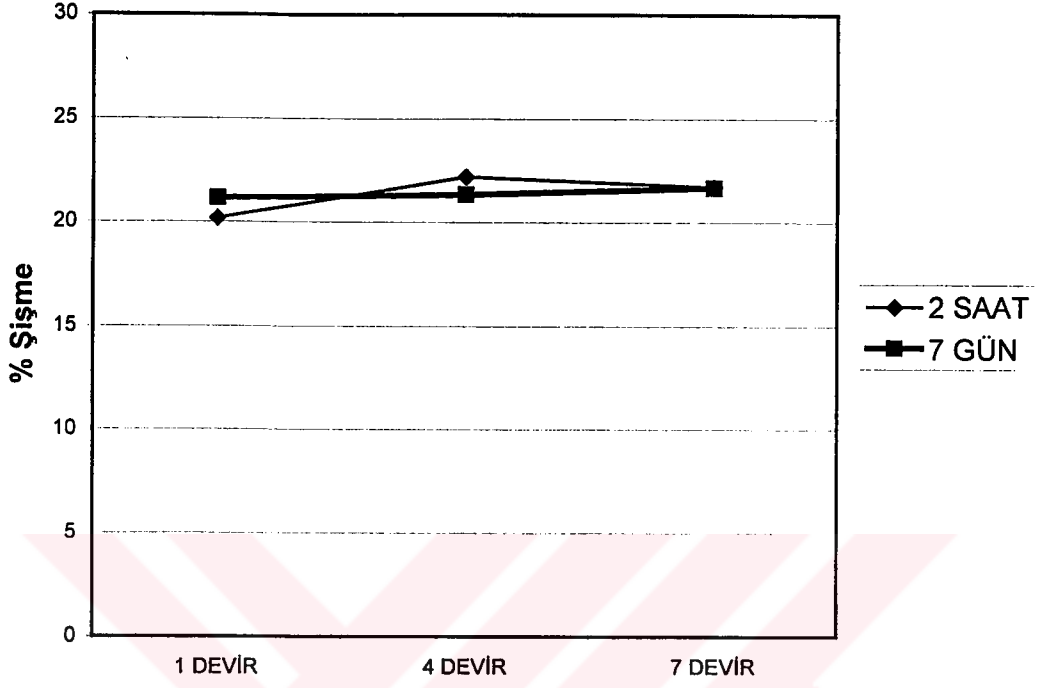
5.4.1 Deneysel yöntem

Çalışmanın bu bölümünde; Zemin B etüvde kurutulmuş ve kuru ağırlığının %3'ü oranında kireç ile karıştırılmıştır. Elde edilen karışım kendi optimum su muhtevasında distile su ile karıştırılarak standart proktor enerji seviyesinde standart proktor kalıbında sıkıştırılmıştır. Bu şekilde hazırlanan numuneler alt kısmından şişme basıncı, üst kısmı serbest şişme deneyinde kullanılmak üzere, konsolidasyon ringlerine numuneler alınmıştır.

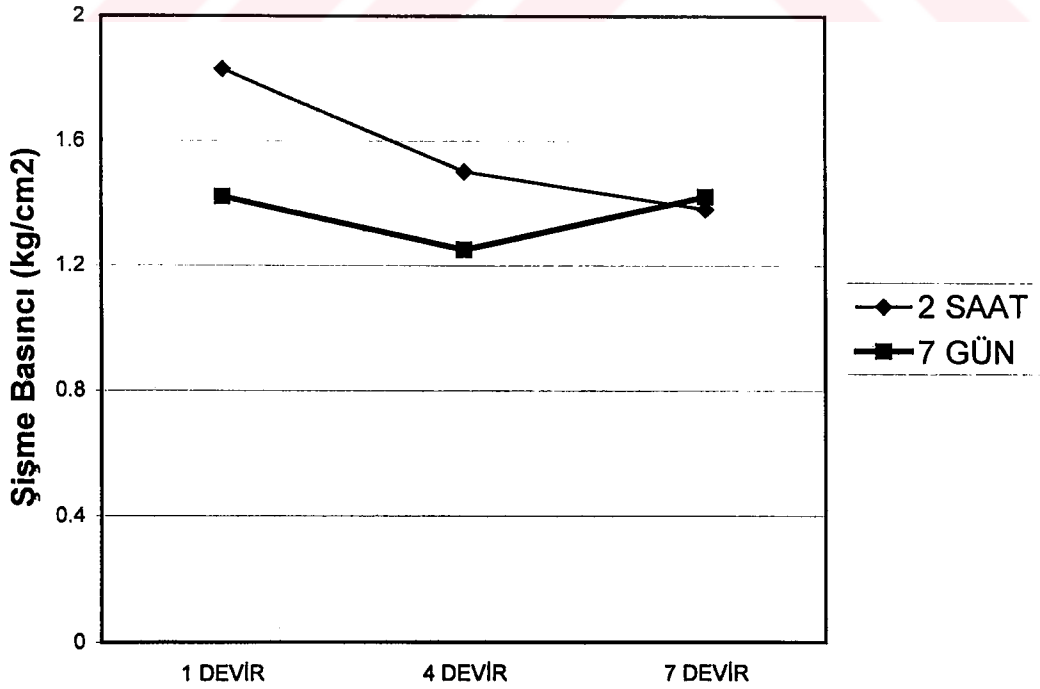
Ringlere alınan numuneler, içlerine su almasını engellemek amacıyla plastik folyo ile sarılmış ve kür için desikatöre konulmuştur. Numuneler aynı özellik göstermesini sağlayabilmek amacıyla aynı anda üç kalıba yetecek kadar numune kullanılmıştır. Kür süresini tamamlayan numuneler -20 derecelik sıcaklıkta 24 saat donmaya, ardından da yine 24 saat laboratuvar sıcaklığında su içerisinde çözünmeye bırakılmıştır. Bu şekilde bir donma – çözünme çevrimi tamamlanmıştır. Sırasıyla 1, 4 ve 7 donma çözünme çevrimini tamamlayan numuneler üzerinde serbest şişme ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır.

5.4.2 Deney sonuçları

Deneyler sonucunda elde edilen, Zemin B+3K'ya ait donma-çözünme çevrimleri ile serbest şişme ve şişme basıncı ilişkileri sırasıyla Şekil 5.4.1 ve 5.4.2'de verilmiştir.



Şekil 5.4.1 Zemin B+3K için donma-çözünme çevrimlerinin serbest şişme yüzdesine etkisi



Şekil 5.4.2 Zemin B+3K için donma-çözünme çevrimlerinin şişme basıncına etkisi

5.4.3 Denev sonuçlarının değerlendirilmesi

Çalışmanın bu bölümünde Zemin B, %3 oranında kireç ile stabilize edilmiştir. Stabilize edilen numunler üzerinde 1,4 ve 7 donma-znme çevrimi uygulanmıştır. evrimlerini tamamlayan numuneler üzerinde serbest şişme ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Yapılan deney sonuçları donma-znme çevrimlerinin şişme potansiyeline etkilerini belirlemek konusunda yetersiz kalmıştır. Deneyler birbirine çok yakın serbest şişme ve şişme basıncı değerleri vermiştir. Grafiklerde de görüldüğü üzere deney verilerinin değişimi düzensizlikler göstermektedir.

Yapılan literatür çalışmalarında donma-znme çevrimlerinin zeminlerin şişme potansiyeline etkisi konusunda herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ancak; 1997 yılında bentonitik bariyerlerin donma znme ve hidrolik konduktivite değerlerini incelendiği yayında, bentonit ağırlıklı  zemin üzerinde yirmi donma znme çevriminden sonra hidrolik konduktivite değerlerinde önemli bir artışın gözlenmediğini bildirmişlerdir [25]. Bu bağlamda %70 bentonit içeren Zemin B üzerinde yapılan deneylerde bir ölçüde bu yayınlara benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Bununla beraber bu konuda yayınlanmış diğer makalelerde farklı zeminlerin hidrolik konduktivite değerlerinin, su muhtevasına da bağlı olarak değişim gösterdiği bildirilmiştir [14 ve 22]. Bu nedenle donma-znme çevrimlerinin şişme potansiyeline etkilerini daha net görebilmek amacıyla farklı zeminler üzerinde bu deneylerin tekrarlanması uygun olacaktır.

5.5 İslanma Kuruma Çevrimlerinin Şişme Potansiyeline Etkisi

Şişme potansiyeline sahip zeminler stabilize edildiklerinde karşılaşılabilecekleri en önemli çevresel koşul özellikle yağmurlu mevsimlerde meydana gelebilecek ıslanma-kuruma çevrimleridir. Bu konuda literatürde çok sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Bu çalışmaların hemen hepsinde, doğal zeminlerin doygun halden başlangıç su muhtevasına kadar kurutulması durumunda şişme potansiyelinin ıslanma kuruma çevrimleri sonucunda azaldığı, ancak rötrelimitine kadar kurutulması durumunda şişme potansiyelinin ıslanma kuruma çevrimleri sonucunda arttığı belirlenmiştir [1]. Ancak bu çalışmalar doğal zeminler üzerinde gerçekleştirilmiştir. 2000 yılında stabilize edilmiş şişen zeminlerde ıslanma kuruma çevrimlerinin etkilerini inceleyen bir çalışma yapılmıştır [28]. Bu çalışmada kireç stabilizasyonunun faydalı etkilerinin ıslanma kuruma çevrimleri sonucunda azaldığı belirtilmekle beraber ıslanma çevriminin ıslak kum içerisinde gerçekleştirilmesi nedeni ile ıslanma kuruma çevrimlerinin stabilize edilmiş şişen zeminlerin şişme potansiyellerine etkisi net olarak gösterilememiştir. Bu nedenle stabilize edilmiş şişen zeminlerde ıslanma kuruma çevrimlerinin şişme potansiyeline etkileri konusunda bir eksiklik olduğu kanaatine varılmıştır. Bu maksatla, farklı şişme potansiyeline sahip olan Zemin B, Zemin C ve Zemin D üzerinde saf ve %3 ve %6 kireç ilavesi ile hazırlanan numuneler üzerinde ıslanma kuruma çevrimleri uygulanmış ve numunelerin şişme potansiyelindeki değişim incelenmiştir.

5.5.1 Deneysel yöntem

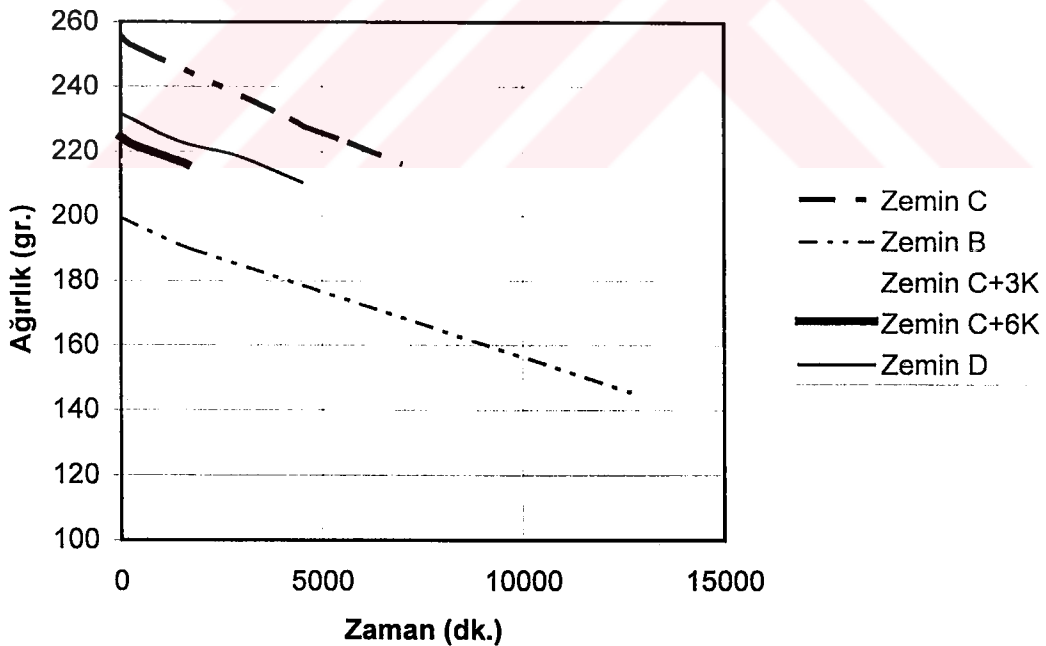
Çalışmanın bu bölümünde; etüvde kurutulmuş olan Zemin B, Zemin C ve Zemin D kuru ağırlığının %3'ü ve %6'sı oranında kireç ile karıştırılmıştır. Elde edilen karışımlardan Zemin B ve Zemin C kendi optimum su muhtevasında distile su ile karıştırılarak standart proktor enerji seviyesinde standart proktor kalıbında sıkıştırılmıştır. Zemin D'de ise modifiye proktor optimum su muhtevası ve enerji seviyesi kullanılmıştır. Bu şekilde hazırlanan numuneler alt kısmından şişme basıncı, üst kısmı serbest şişme deneyinde kullanılmak üzere, konsolidasyon ringlerine numuneler alınmıştır. Bu numunelerden Zemin B+3K ve Zemin B+ 6K numuneleri üzerinde desikatörde 2 Saat ve 7 Günlük kürler uygulanmıştır. Zemin C+3K, Zemin C+6K, Zemin D+3K numuneleri üzerinde ise 24 saatlik kür uygulanmıştır.

Kür süresini tamamlayan numuneler konsolidasyon hücrelerine alınarak üzerlerinde serbest şişme ve şişme basıncı deneyleri uygulanmıştır. Deney tamamlandıktan sonra numune konsolidasyon hücresinden çıkarılarak son ağırlığı belirlenmiştir. Daha sonra numune laboratuvar ortamında, ağırlığı sürekli kontrol edilerek, kurumaya bırakılmıştır. İlk ağırlığına geri dönen numuneler, yeniden konsolidasyon hücresine alınarak serbest şişme veya şişme

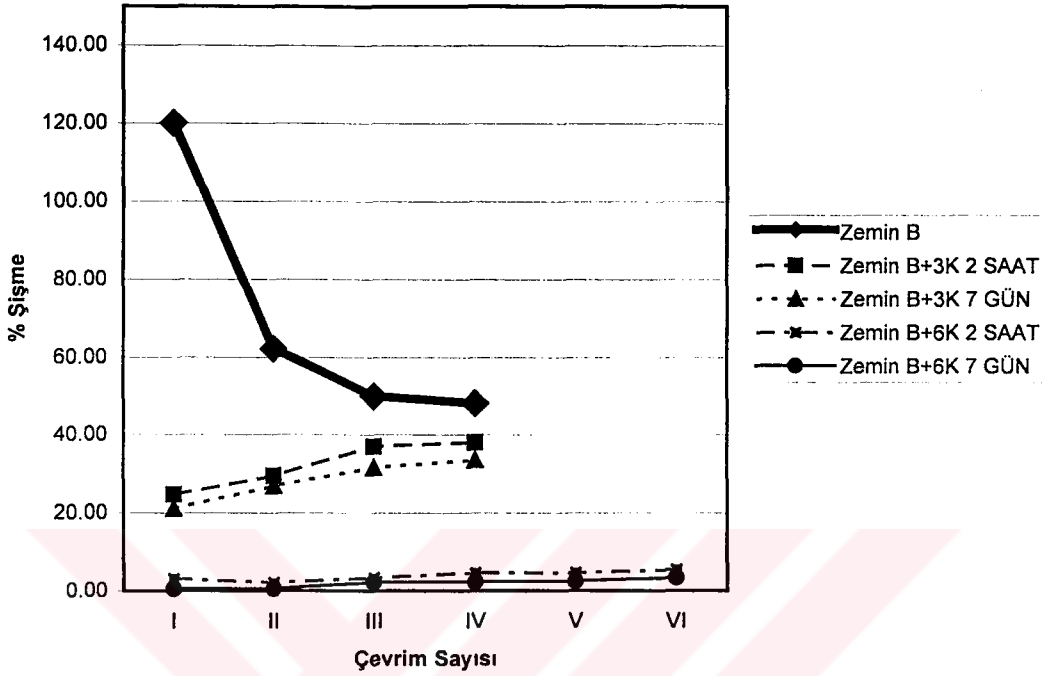
basıncı deneyi tekrarlanmıştır. Numunenin konsolidasyon hücresinde doygun hale gelmesi ve laboratuvar ortamında ilk ağırlığına kadar kurutulması ile bir ıslanma kuruma çevrimi tamamlanmıştır. Bu çevrimlere, çevrimler arasındaki değişimlerin azalması veya numune şeklinin tekrar deney yapılmasına engel olacak boyutta değişmesi durumu oluşuncaya kadar devam edilmiştir.

5.5.2 Deney sonuçları

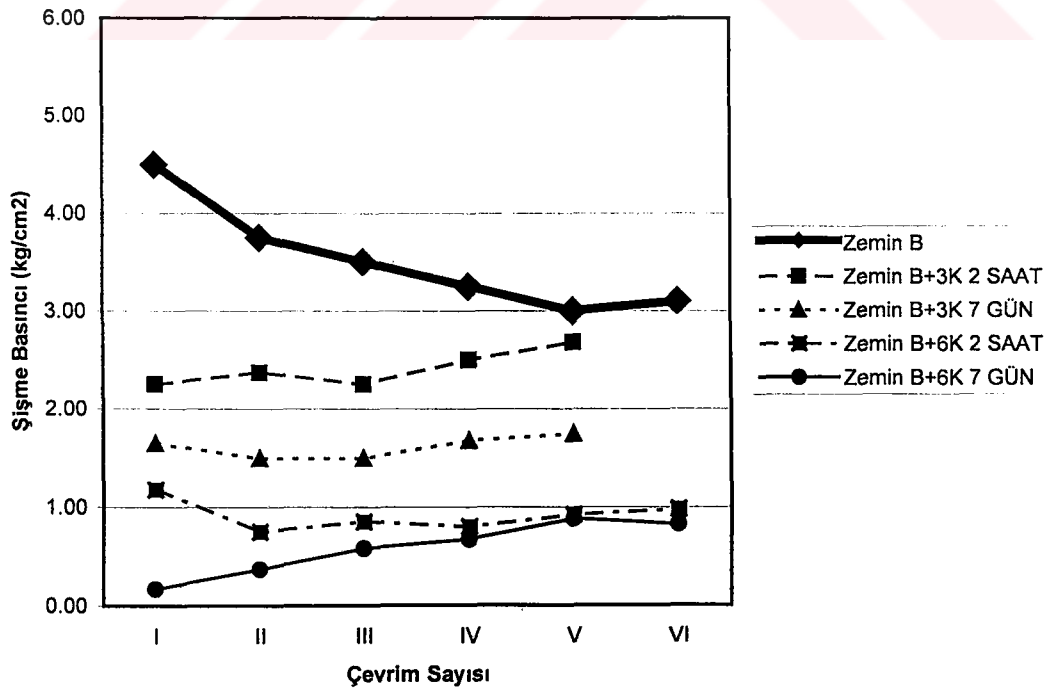
Deneyler sonucunda elde edilen, Zemin B, Zemin C, Zmin D'ye ait kuruma zaman grafikleri Şekil 5.5.1'de, Zemin B, Zemin B+3K, Zemin B+ 6K'ya ait ıslanma kuruma çevrimlerinin serbest şişme yüzdesi ve şişme basıncına etkisi sırasıyla Şekil 5.5.2 ve Şekil 5.5.3'te, Zemin C, Zemin C+3K, Zemin C+ 6K'ya ait ıslanma kuruma çevrimlerinin serbest şişme yüzdesi ve şişme basıncına etkisi sırasıyla Şekil 5.5.4 ve Şekil 5.5.5'te, Zemin D, Zemin D+3K'ya ait ıslanma kuruma çevrimlerinin serbest şişme yüzdesi ve şişme basıncına etkisi sırasıyla Şekil 5.5.6 ve Şekil 5.5.7'de verilmiştir.



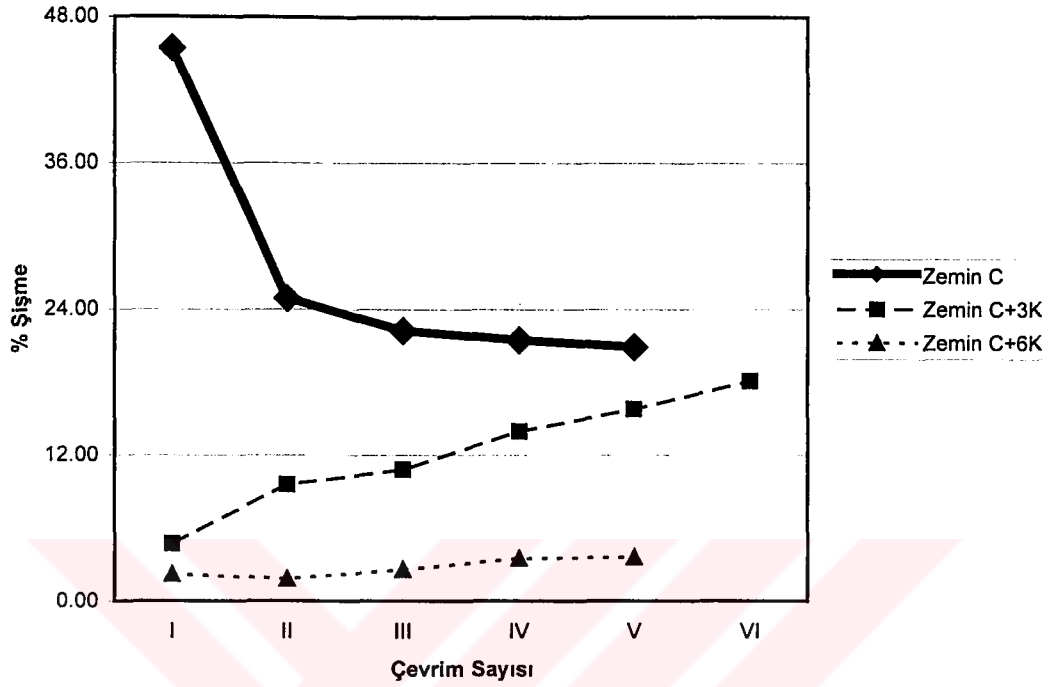
Şekil 5.5.1 Bazı numunelerin kuruma zaman grafikleri



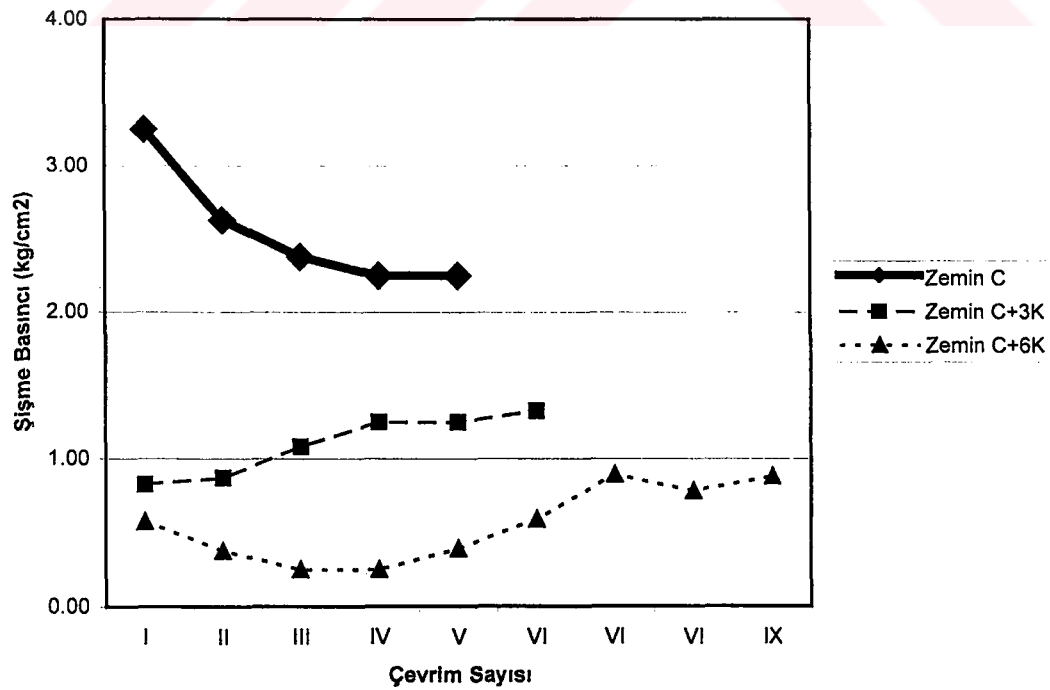
Şekil 5.5.2 Zemin B için ıslanma kuruma çevrimlerinin serbest şişme yüzdesine etkisi



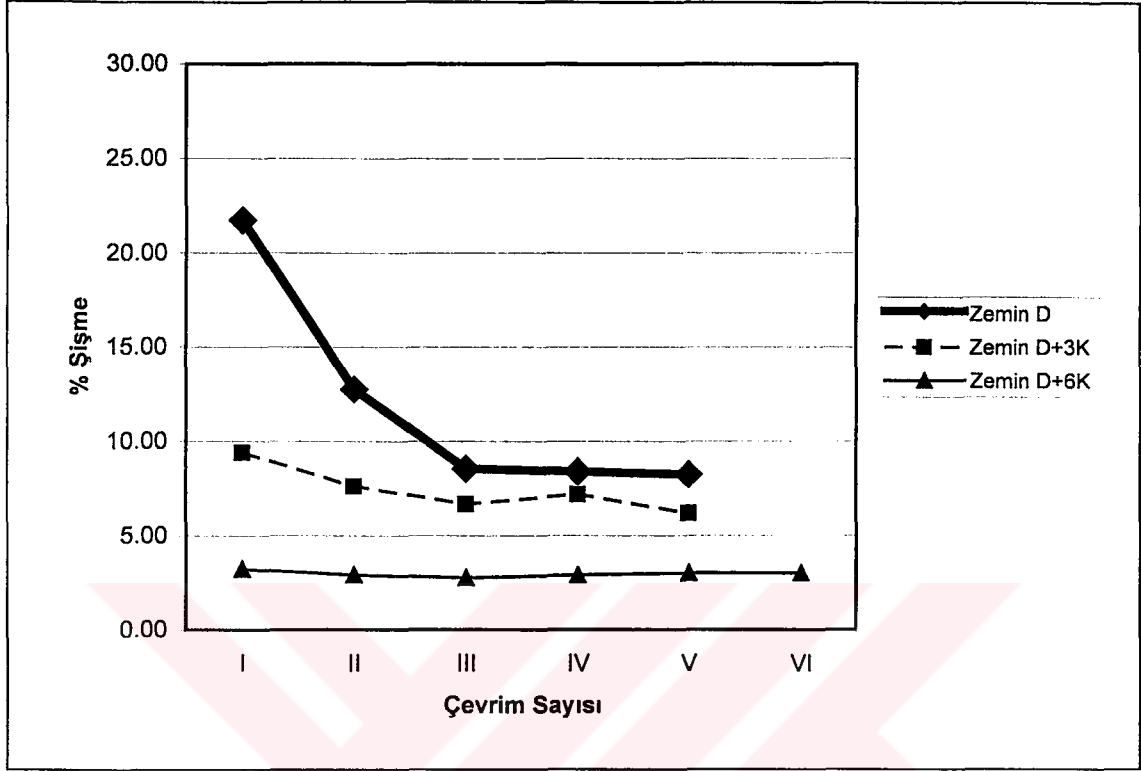
Şekil 5.5.3 Zemin B için ıslanma kuruma çevrimlerinin şişme basıncına etkisi



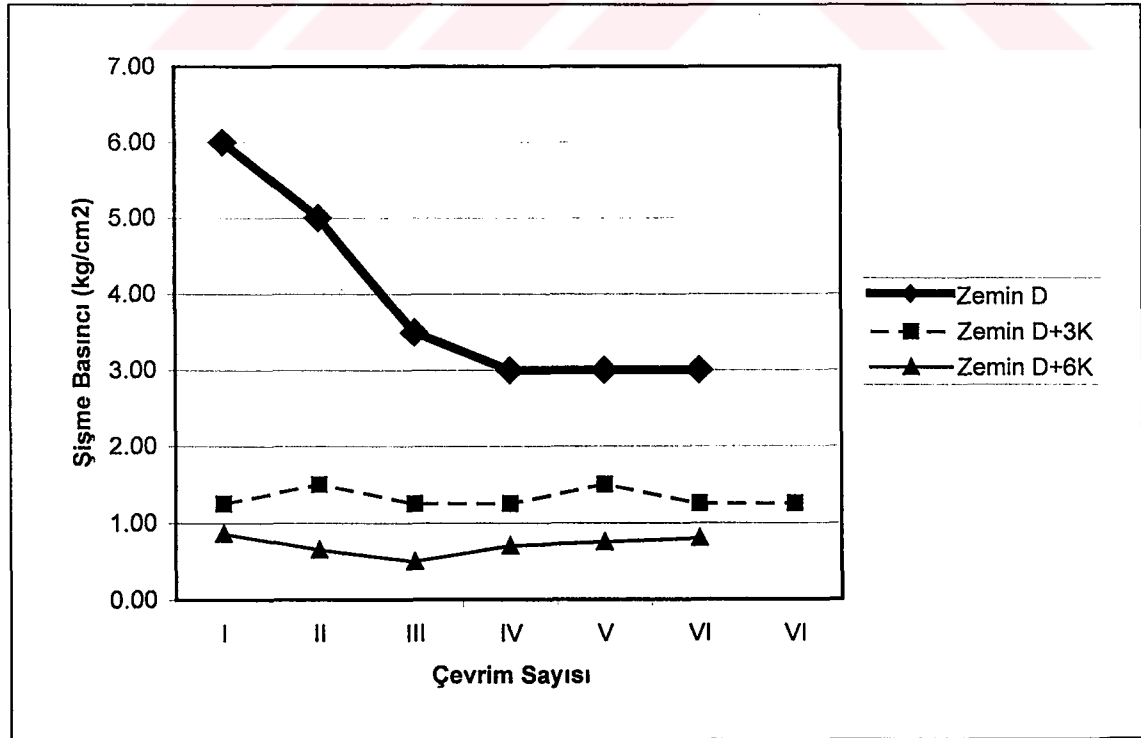
Şekil 5.5.4 Zemin C için ıslanma kuruma çevrimlerinin serbest şişme yüzdesine etkisi



Şekil 5.5.5 Zemin C için ıslanma kuruma çevrimlerinin şişme basıncına etkisi



Şekil 5.5.6 Zemin D için ıslanma kuruma çevrimlerinin serbest şişme yüzdesine etkisi



Şekil 5.5.7 Zemin D için ıslanma kuruma çevrimlerinin şişme basıncına etkisi

5.5.3 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Bu bölümde değişik şişme potansiyeline sahip doğal ve stabilize zeminler üzerinde ıslanma kuruma çevrimleri uygulanmıştır. Islanma kuruma çevrimleri için seçilen yöntemde sürekli olarak aynı numune üzerinde çalışma ve dolayısıyla deneysel hataları minimuma indirme avantajı vardır [13].

Saf numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda, ıslanma kuruma çevrimlerinin şişme potansiyelini azalttığı belirlenmiştir. Bu etki ilk ıslanma kuruma çevriminde çok yüksekken sonraki devirlerde azalmaktadır. Numunelerin şişme potansiyeli 4-6 devir sonrasında dengelenmiştir. Bu sonuçlar literatürde bulunan sonuçlarla paralellik göstermektedir.

Kireç ile stabilize edilmiş numunelerin, şişme potansiyellerinin ıslanma kuruma çevrimleri sonucunda değişimi ise saf numunelere oranla farklılıklar görülmüştür. Özellikle yüksek plastisiteli ve düşük oranlarda kireç ile stabilize edilen numunelerin şişme potansiyelleri ıslanma kuruma çevrimleri sonunda artışlar göstermiştir. Aynı malzemenin daha yüksek oranda kireç ile stabilize edilmesi durumunda ise artışlar daha düşük seviyede kalmıştır. Kullanılan üç malzemedен yalnızca Zemin D'de bu eğilim farklılık göstermiştir. Saf halde ıslanma kuruma çevrimlerine tabi tutulan numune diğer deneylere benzer olarak ilk çevrimlerde şişme potansiyelini önemli oranlarda yitirmiştir, sonraki çevrimlerde ise belirli bir değerde sabit kalmıştır. Aynı malzeme %3 oranında kireç ile stabilize edildiğinde şişme potansiyeli ıslanma kuruma çevrimleri sonucunda azalmıştır. Ancak bu azalma saf malzeme ve literatürde görülen diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında oldukça düşüktür.

Kireç ile stabilize edilmiş numunelerde ıslanma kuruma çevrimleri uygulanırken, kuruma esnasında numune yüzeyinde çevrimlerle birlikte artan miktarda kireç görülmüştür. Bu sonuçlarla birlikte değerlendirildiğinde stabilizasyonun ıslanma kuruma çevrimlerinden olumsuz etkilendiğini desteklemektedir. Özellikle yüksek oranda kireç ile stabilize edilmiş şişme basıncı deneyi uygulanan numunelerde ilk ıslanma kuruma çevrimlerinde azalmalar sonraki çevrimlerde ise artışlar görülmüştür. Bu olaya numunenin şişme basıncı deneylerinde daha düşük su alması ve kuruma esnasında numunenin kür etkisinde kalmasına bağlanmıştır. Çalışmanın genelinde bulunan sonuçlar, daha önce Rao et al. (2000) tarafından bildirilen, kireç stabilizasyonunun dördüncü ıslanma kuruma çevrimi sonucu faydalı etkilerini kaybettiği görüşünü desteklemektedir.

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada doğal ve farklı oranlarda bentonit ve kaolen içeren saf ve stabilize edilmiş zeminlerin değişik çevresel koşullar altında şişme potansiyellerinin değişimi incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle kullanılan numunelerin Atterberg kıvam limitleri, tane çapı dağılımları, özgül ağırlıkları gibi genel geoteknik özellikleri ve pH ve elektriksel iletkenlik gibi fizikokimyasal özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra hazırlanan numuneler üzerinde, enerji, su muhtevası değişimi, kür süresi, kür sıcaklığı, donma-çözünme ve ıslanma-kuruma gibi çevresel şartlar uygulanmış ardından serbest şişme ve şişme basıncı deneyleri uygulanarak numunelerin şişme potansiyellerinin değişimi incelenmiştir.

6.1 Sonuçlar

Şişen zeminlerde şişme davranışı öncelikle başlangıçtaki su muhtevası tarafından belirlenmektedir. Kuru yoğunluğunun daha düşük olması durumunda bile su muhtevası düşük olan numuneler çok daha fazla şişme potansiyeli göstermiştir. Şişme hızını kontrol eden en önemli faktörlerden biri başlangıçtaki boşluk oranıdır. Boşluk oranı fazla olan numuneler şişmelerini daha kısa sürede tamamlamışlardır. Kuru yoğunluk, doyumluk derecesi, boşluk oranı ile uygulanan enerji seviyesi arasındaki ilişki başlangıçtaki su muhtevasından önemli ölçüde etkilenmektedir. Su muhtevasındaki artış, enerjinin kuru yoğunluk, doyumluk derecesi ve boşluk oranı üzerindeki etkisini önemli ölçüde azaltmıştır.

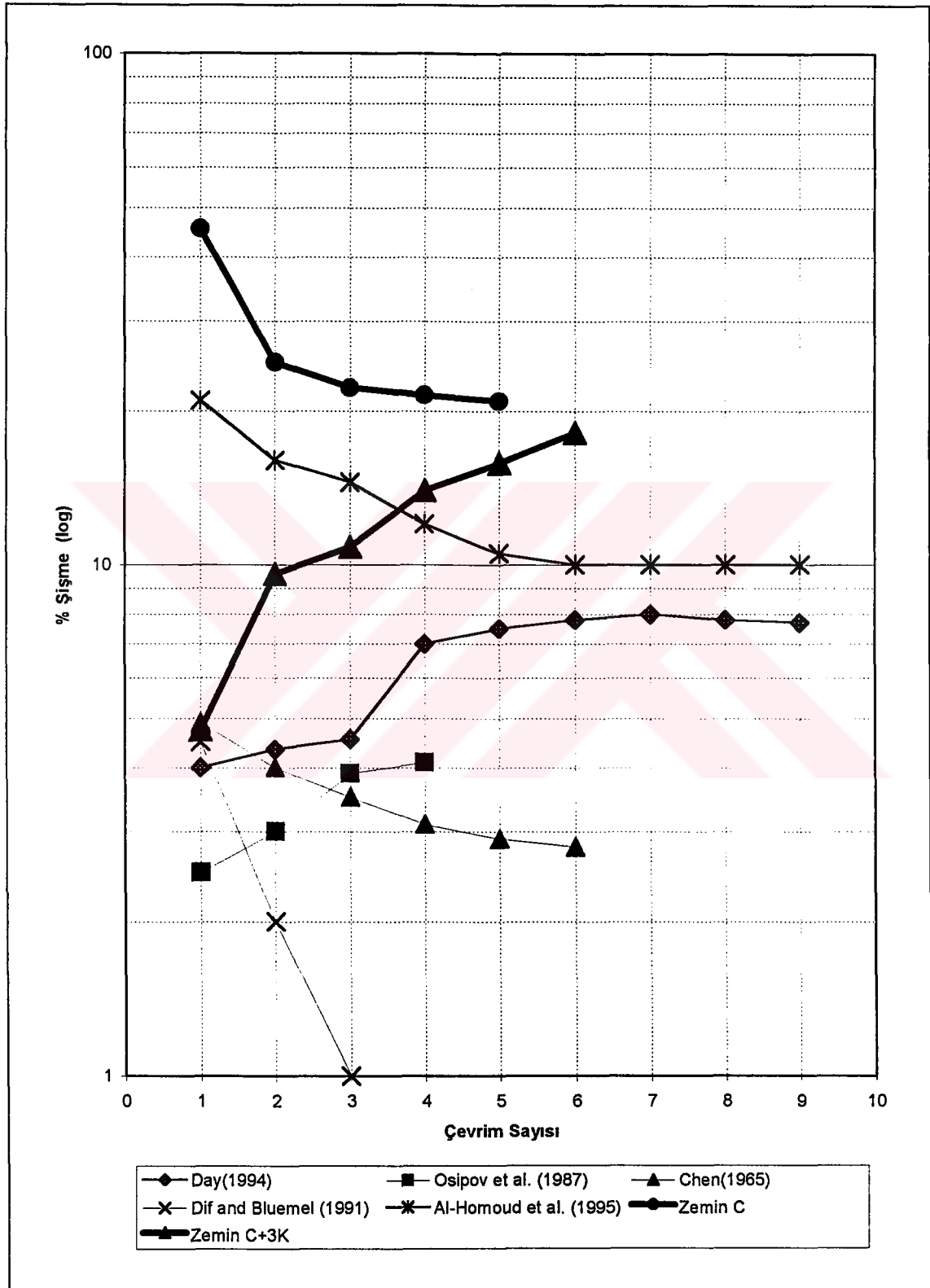
Zeminler üzerinde katkı maddesi ve kür süresi şişme potansiyelin azaltılmasında oldukça etkilidir. Kireç ile stabilize edilen numuneler şişmelerini daha kısa sürede tamamlamaktadırlar. Çimento şişme potansiyeli çok yüksek olan Zemin A'nın şişme potansiyelini azaltmakta kirece oranla etkisiz kalmıştır. Zemin D'nin şişme potansiyeli üzerinde çimento ve kireç benzer etki göstermiştir, ancak kür süresi kireç ile stabilize edilen numuneler üzerinde daha etkili olmuştur. Kür süresinin artması ile şişme potansiyeli azalırken, zeminlerin su tutma miktarlarının da azaldığı gözlemlenmiştir.

Kür sıcaklığı şişme potansiyelin azaltılmasında oldukça etkilidir. Kür süresinin artması, sıcaklık etkisini daha da belirginleştirmiştir. Daha yüksek oranda kireç ihtiva eden zemin üzerinde sıcaklık daha etkili olmuştur.

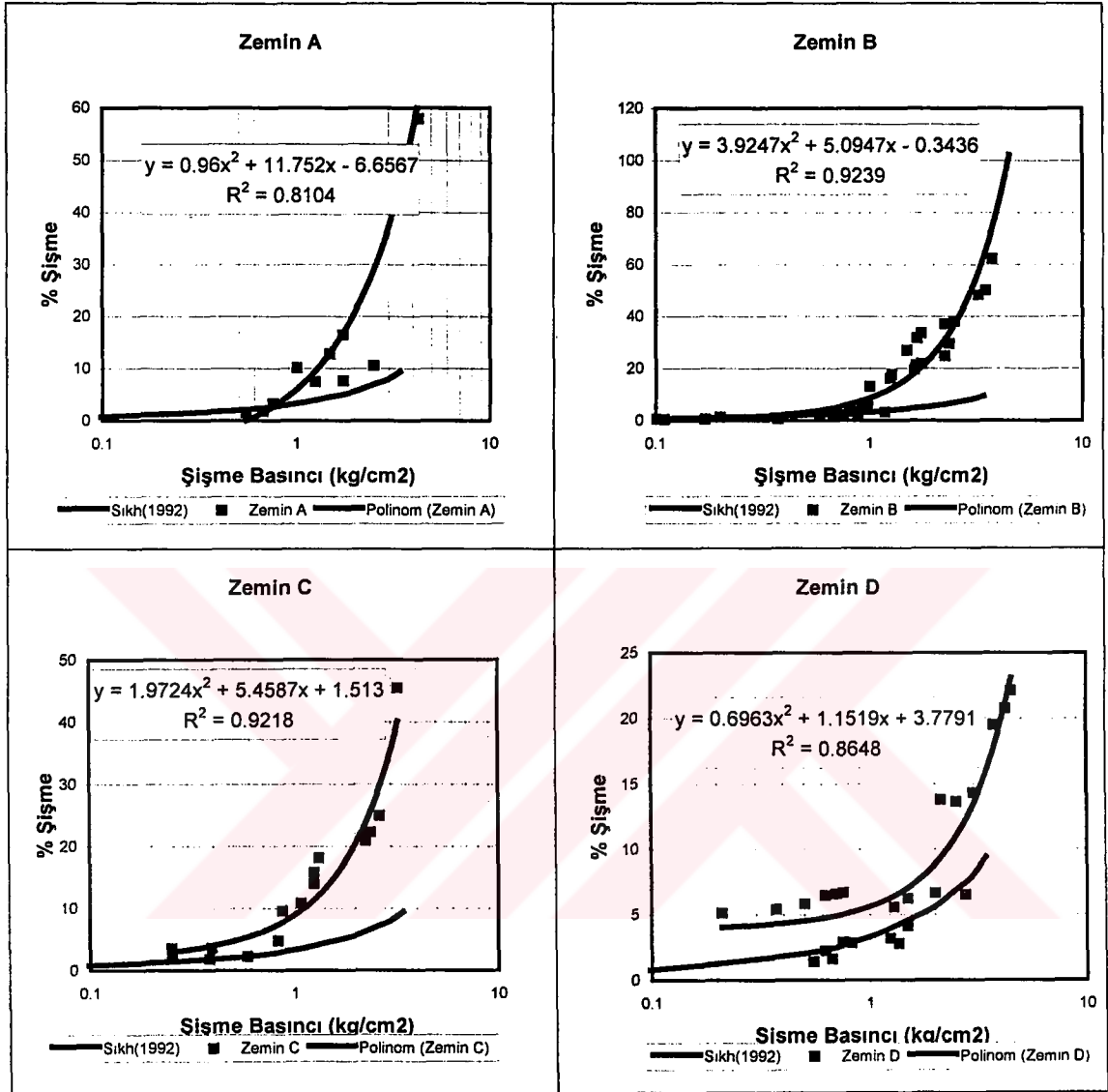
Zemin B üzerinde uygulanan donma çözünme çevrimleri, bu zeminin şişme potansiyelinde önemli etkiler yapmamıştır. Deney sonuçlarındaki düzensiz değişimler, özellikle donma esnasında meydana gelen donma şişmesi (frost-heave) olayına bağlanabilir.

Stabilize edilmemiş zeminler üzerinde yapılan ıslanma kuruma çevrimleri sonucunda şişme potansiyeli azalmıştır. Bu azalma ilk çevrimde maksimum iken sonraki çevrimlerde azalmakta 4-6 devir sonunda dengelenmektedir. Stabilize edilmiş numuneler ıslanma-kuruma çevrimlerinden olumsuz etkilenmiş, şişme potansiyeli çevrimler sonunda artış göstermiştir. Plastisitesi daha yüksek olan stabilize edilmiş zeminlerin şişme potansiyeli ıslanma-kuruma çevrimlerinden daha fazla etkilenmiştir. Şekil 6.1'de ıslanma kuruma çevrimleri ile ilgili literatürde bulunan bazı çalışmalar ve bu çalışmada elde edilen bazı sonuçlar verilmiştir. Bu grafikte Osipov et al. (1987) ve Day (1994), olarak verilen sonuçlar doğal numunelerin rötre limiti değerine kadar kurutulup tekrar ıslanmaya bırakılması ile elde edilmiştir. Diğer sonuçlarda ise numuneler başlangıçtaki su muhtevası değerlerine kadar kurutulmuşlardır. Aynı zemine ait saf ve stabilize edilmiş numunelerin ıslanma-kuruma çevrimleri sonuçları aynı grafikte incelendiğinde, saf numunenin şişme potansiyelinin azalırken, stabilize edilmiş numunenin şişme potansiyelinin arttığı görülmektedir. Bu, özellikle düşük miktarda kireç ile stabilize edilen numunelerin şişme potansiyelinin artan devirlerde birbirine yaklaşmasına neden olmuştur.

Bu çalışmada yaklaşık 120 adet serbest şişme, 120 adet şişme basıncı deneyine yer verilmiştir. Daha önce Sıkh (1992) tarafından verilen serbest şişme ve şişme basıncı arasındaki ilişki, Bölüm 5.1 ve 5.2'de yapılan deneyler üzerinde uygulanmaya çalışılmıştır [30]. Şekil 6.2'de çalışmanın tamamında elde edilen serbest şişme ve şişme basıncı deney sonuçları aynı grafik üzerinde değerlendirilmiştir. Daha önce Sıkh tarafından verilen ilişkide kullanılan numuneler plastisite indisi 14-45, likit limiti 43-74 olan örselenmemiş numunelerdir. Bu çalışmada ise örselenmiş plastisite indisi NP-495, likit limiti NP-535 arasında değişen 18 farklı numune kullanılmıştır. Deneyler esnasında düşük plastisiteli, yüksek enerji ile sıkıştırılan numunelerin yüksek şişme basıncı değerlerine karşılık, düşük şişme yüzdesi, yüksek plastisiteli numunelerde ise düşük şişme basıncı değerleri ve yüksek serbest şişme yüzdeleri gösterdikleri gözlenmiştir. Bu da sonuçların oldukça geniş bir aralıkta olmasına neden olmuştur. Bu nedenle kullanılan zeminler kendi aralarında değerlendirilmiştir.



Şekil 6.1 Al-Homoud et al. çalışmalarında sunulan literatür çalışmasının kendi sonuçları ve bu çalışmada elde edilen sonuçlarla karşılaştırması



Şekil 6.2 Deneyler sonucunda elde edilen serbest şişme-şişme basıncı ilişkileri

Deneyler esnasında özellikle yüksek sıcaklıkta kür edilen numunelerin oldukça sertleştiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle kür sıcaklığının zeminlerin mukavemet özelliklerinde daha önemli katkı sağlayabileceği fikri oluşmuştur. Bu çalışma esnasında -20 derece sıcaklıkta kür edilen numunelerinde şişme potansiyellerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Ancak, -20 derecede numunelerin tamamen donduğu, ve donma etkisi ile numunelerin şeklinde düzensiz değişiklikler olduğu gözlemlenmiştir. Donma şişmesi (frost-heave) denilen bu olay sonucu bu numuneler üzerinde serbest şişme ve şişme basıncı deneyleri yapılamamıştır. Ayrıca literatürde rastlanan bazı çalışmalar boşluk büyüklüğünün artması ile donma-çevrimlerinin zemin özelliklerine olan etkilerinin değiştiği ortaya konmuştur.

6.2 Öneriler

Donma çözünme çevrimlerinin özellikle stabilize edilmiş zeminlerde şişme potansiyeline etkilerinin incelenmesi için daha büyük boşluklar içeren zeminler üzerinde tekrarlanması faydalı olacaktır. Çevrimlerin daha büyük hacimli numuneler üzerinde uygulanıp bu numunelerden ringlere numune alınması donma şişmesi etkilerini azaltacağı için daha uygun olacaktır.

Şişme yüzdesi %60'ın üzerinde olan numunelerde, şişme sonucu zeminin sıkıştırma halkasından taşıdığı ve bu nedenle doğru ölçüm yapılamadığı gözlemlenmiştir. Çalışmada bu tarz zeminler üzerinde ring içerisine 1 cm yüksekliğinde numune alınarak deney yapılmıştır. Bundan sonraki çalışmalarda şişme yüzdesi %60'ın üzerinde olan numuneler üzerinde çalışılırken özel aparatlar veya bu çalışmada uygulanan yöntemin uygulanması sonuçların güvenilirliğini arttıracaktır.

Stabilize edilmiş numuneler üzerinde ıslanma kuruma çevrimlerinin uygulanması, stabilizasyonun etkinliğinin belirlenmesinde yardımcı olacaktır. Bu çevrimlerde büzülme etkileri araştırılmalıdır. Ayrıca stabilizasyon esnasındaki su muhtevasının, etkilerinin belirlenmesi için farklı su muhtevalarında stabilizasyon uygulanması katkı sağlayacaktır. Katkı maddesinin numuneye kuru halde karıştırılması yerine, solüsyon veya tabaka olarak serilmesi yöntemlerinin laboratuvar şartlarında etkinliğinin belirlenmesi yeni çalışmalara konu olabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1] Al-Homoud, A.S., Basma A.A., Husein Malkawi, A.I., Al Bashabsheh, M.A., 1995, Cyclic swelling behaviour of clays, Vol.121, No.7, pp. 562-565
- [2] ASTM, 1985, Annual book of ASTM standards, Natural building stones, soil and rock, Vol: 04.08, ASTM, Philadelphia,Pa.
- [3] Attom, M.F., Abu-Zreig, M.M., Obaidat, M., 2001, Changes in clay swelling and shear strength properties with different sample preparation techniques, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol.24, No.2, pp.157-163
- [4] Basma, A.A., 1993, Prediction of expansion degree for natural compacted clays, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol 16, No:4, pp. 542-549
- [5] Benson, C.H., Abichou T.H., Olson M.A., Bosscher P.J., 1995, Winter effects on hydrolic conductivity of compacted clay, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.121, No.1, pp.69-79
- [6] Braja, D., 1983, Advanced soil mechanics, McGraw-Hill Book Company, p. 511
- [7] Chen, F. H., 1988, Foundation on expansive soils, American Elsevier Science Publication,
- [8] Çokça, E., 2001, Use of Class C fly ashes for the stabilization of an expansive soil, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.127, No.7, pp.568-573
- [9] Day. R.W., 1994, Swell-shrink behaviour of compacted clay, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.120, No.3, pp.618-623
- [10] Day R.W., 1992, Swell versus saturation for compacted clay, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.118, No.8
- [11] Ergene, A., 1987, Toprak biliminin esasları, Atatürk Üniversitesi Yayınları, 156-177 s.
- [12] Gromko, G.J., 1974, Review of expansive soils, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol.100, No.GT6, pp.667-687
- [13] Güney, Y., Koyuncu, H., Çetin, M., 2003, Environmental effects on expansive soils, First International Conference on Environmental Research and Assessment, Bucharest, Romania, March 23-27, pp.291-299
- [14] Hewitt, R.D., Daniel, D.E., 1997, Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners after freeze-thaw, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.123, No.4, pp.305-313
- [15] Işık, İ., 1997, Genel jeoloji, D.P.Ü. Lisans Ders Notları, Kütahya, 60 s. (yayımlanmamış).
- [16] İközler B., Aytakin, M., Nas, E., 2002, Bentonit katkılı şıran kilinde başlangıç emme gerilmesinin serbest şişmeye etkisi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, 21-22 Ekim, Anadolu Üniversitesi Eskişehir

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- [17] İpek, T., 1998, Stabilization of expansive soil using lime, cement and fly-ash, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
- [18] Jones, D. A., Jones, K. A., 1987, Treating expansive soils, Civil Engineering, V.57, N.8, ASCE
- [19] Kandemir, A., 1996, Swell prediction by suction measurements, , Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
- [20] Katti D.R., Shanmugasundaram, V., 2001, Influence of swelling on the microstructure of expansive clays, Canadian Geotechnical Journal, Vol.38, pp. 175-182
- [21] Keskin, S.N., Yıldırım, H., Göksan T.S., 1997, Killi zeminlerde emme kapasitesi şişme-basıncı ilişkisi, Ulusal Kil Sempozyumu, 24-27 Eylül, DPÜ Kütahya
- [22] Kim, W., Daniel, D.E., 1992, Effects of freezing on hydrolic conductivity of compacted clay, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.118, No.7, pp.1083-1097
- [23] Komine, H., Ogata, N., 1996, Prediction for swelling characteristics of compacted bentonite, Canadian Geotechnical Journal, Vol.33, pp.11-22
- [24] Koyuncu, H., 1998, Stabilizasyon, solidifikasyon yöntemiyle iyileştirilmiş petrolü sondaj atıklarının fiziko-kimyasal, mikro-yapısal ve geoteknik özellikleri, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi
- [25] Kraus F. J., Benson H.C., Erickson, A.E., Chamberlain E.J., 1997, Freeze-Thaw cycling and hydraulic conductivity of bentonitic barriers, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.123, No.3, pp.229-238
- [26] Nelson, J.D and Debra, J.M., 1992, Expansive Soils-Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, J. Willey and Sons, New York, p:259.
- [27] O'neil, M.N., Poormayed, N., 1980, Methodology for foundation on expansive clays, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, V.106, No.G.T, p:1345-1367.
- [28] Rao, S.M., Reddy, B.V.V., Muttharam, M. 2001, The impact of cyclic wetting and drying on the swelling behaviour of stabilized expansive soils, Engineering Geology, No:60, pp. 223-233
- [29] Rao, K.S.S., Rao. S.M., Gangadhara S., 2000, Swelling behaviour of a desiccated clay, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol.23, No.2, pp.193-198
- [30] Sikh, T.S., 1993, Swelling soils, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.119, No.4, pp.791-792
- [31] Sivapulliah, P.V., Sridharan, A., Stalin, V.K., 1996, Swelling behaviour of soil-bentonite mixtures, Canadian Geotechnical Journal, Vol.33, pp. 808-814

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- [32] Şengül, T., 2003, Ağır metal ve tuzlarla kirlenmiş killi zeminlerin geoteknik özelliklerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, DPÜ İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
- [33] Tosun H., 1992, Hafif su yapıları açısından şişen killerin önemi ve bir uygulama, Mühendislik Jeolejisi Türk Milli Komitesi Bülteni, V.14, s: 94-109
- [34] Tosun, H. Kırmızıtaş, H., 1993, harran killerinin şişme potansiyeli ve bölgede inşa edilecek su yapıları için önemi, Dolgu Barajlar Yönünde Zemin Mekanik Problemleri Sempozyumu, 20-25 Eylül, Gümüşdör, Bildiri kitabı, s:313-327.
- [35] Tosun, H., Birden, K. Diyar. O.S., 1998, harran killerinin (iv. kısım) geoteknik özellikleri ve şişme potansiyeli, GAP 2. Mühendislik Kongresi, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, Bildiri kitabı, s:201-207
- [36] Tosun, H., Türköz, M., Zorluer, İ. Arslan, A., 2000, sıkışma kontrolü ile şişme potansiyelinin önlenmesi ve harran killerinde (v. kısım) yapılan uygulamalar, 3. GAP Mühendislik Kongresi, Bildiriler kitabı, 24-26 Mayıs, 425-432.
- [37] Tosun, H., 1999, Sulama kanallarında görülen şişen zemin problemleri ve inşaat önlemleri, Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, C.XII., S.1, s:23-44.
- [38] Tosun, H., ve Sevinçli, K., 1994, Şişen killer üzerine inşa edilecek hafif su yapıları için proje kriterleri, DSİ 40. Yıl Sempozyumu, Ankara, 833-844.
- [39] Türköz, M., 2001, Şişen zeminlerin sönmüş kireç katkısı ile stabilizasyonu ve eskişehir-meşelik killerine uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
- [40] Uzuner, B. A., 1998, Temel zemin mekaniği, KTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Teknik yayınevi mühendislik mimarlık yayınları, Ankara.
- [41] Yalçın, M., 1997, Çevresel kirlilik şartlarının bentonit kilinin şişme/büzülme özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı.

**TC. YÜKSEK ÖĞRETİM KURUMU
BİLİM VE TEKNOLOJİ BAKANLIĞI**