

**YENİÇAĞA KİLİNİN
GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE
KİREÇ VE UÇUCU KÜLÜN KULLANILABİLİRLİĞİ**

Halil ORHAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2010
ANKARA**

Halil ORHAN tarafından hazırlanan “YENİÇAĞA KİLİNİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE KİREÇ VE UÇUCU KÜLÜN KULLANILABİLİRLİĞİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Nail Ünsal
Tez Danışmanı, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Recep KILIÇ
Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Yüksel YILMAZ
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tarih: 19/02/2010

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU
Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Halil ORHAN

**YENİÇAĞA KİLİNİN
GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE
KİREÇ VE UÇUCU KÜLÜN KULLANILABİLİRLİĞİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Halil ORHAN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ocak 2010**

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, şişme özelliği bulunan zeminlerin geoteknik özelliklerinin sönmüş kireç ve uçucu kül kullanılarak iyileştirilmesidir. Bolu ili Yeniçağa İlçesinde bulunan göl civarındaki mevcut yerleşim bölgesi inceleme alanı olarak seçilmiştir. İnceleme alanındaki zeminin şişme yüzdesi, şişme basıncı ve serbest basınç dayanımı belirlenerek, sönmüş kireç ve Çayırhan Termik Santralinden alınan uçucu kül katılarak iyileştirme yapılmıştır. Killere %1, %3, %5, %7 ve %9 oranlarında sönmüş kireç ile %5 ve %10 oranında uçucu kül katılarak şişme potansiyelindeki değişim ile yeni durumda oluşacak serbest basınç dayanımı incelenmiştir. Kireç oranının %7 ile %9 ve uçucu külün %10 olduğu durumlarda şişme potansiyelinin önemli ölçüde azaldığı gözlenmiştir.

Bilim Kodu : 911.1.050
Anahtar Kelimeler : Şişme basıncı, Şişme yüzdesi, Yeniçağa kili, Uçucu kül, Kireç, İyileştirme, Serbest basınç dayanımı
Sayfa Adedi : 93
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Nail Ünsal

**THE USABILITY OF LIME AND FLY ASH TO IMPROVE THE
GEOTECHNICAL PROPERTIES OF YENİÇAĞA SOILS**

(M.Sc. Thesis)

Halil ORHAN

GAZİ UNIVERSITY

INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

January 2010

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate to improve the geotechnical properties of swelling soils the usability of lime and fly ash. For this, residential area nearby the Bolu/Yeniçağa Lake is selected for the experimental study. Swell pressure, swell percentage and compressive strength characteristics of the collected sample are determined and the effect of lime and Çayırhan fly ash is examined. Samples are improved by adding lime in proportions of 1 %, 3 %, 5 %, 7 %, 9 % and fly ash by 5 %, 10 % swell pressure, swell percentage and compressive strength are obtained. It is found that swell pressure, swell percentage and compressive strength are reduced considerably as the lime proportion is 7%, 9% and fly ash is 10 %.

Science Code : 911.1.050

**Key Words : Swelling pressure, Swelling percentage,
Yeniçağa clays, Fly ash, Lime stabilization,
Uniaxial compressive strength**

Page Number : 93

Adviser : Prof. Dr. Nail Ünsal

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı hazırlarken, zorlandığım, açmaza düştüğüm, çözümsüz kaldığımı düşündüğüm anlarda; ilgisi ve akademik tecrübesi ile bana yol göstererek daha güçlü bir azimle yeniden başlama enerjisi aşıl原因, engin bilgisi ve deneyimleriyle doğru yönde ilerlememi sağlayarak bu çalışmayı tamamlamamı teşvik eden, çok değerli Danışman Hocam Prof. Dr. Nail ÜNSAL' a,

Yine bu çalışmanın önemli birer parçası olan arazi ve laboratuvar çalışmalarım sırasında, çok değerli bilgi ve tecrübelerinden faydalanmama imkân veren; özverili yardımlarını esirgemeyen, her şeyden çok arkadaşı olmaktan gurur duyduğum, aziz dostum İnş. Yük Müh. Aydın GÖKÇE' ye,

Fikirleri ve çalışmalarım esnasındaki değerli katkılarıyla yardımlarını esirgemeyen, dostluğuyla hem teşvik eden hem de ilham veren sevgili dostum Yrd. Doç. Dr. Taha TAŞKIRAN' a,

Tezin nihai haline getirilmesinde yapmış olduğu katkılarından dolayı Prof. Dr. Recep KILIÇ ve Yrd. Doç. Yüksel YILMAZ'a,

Mensubu olmaktan gurur duyduğum Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne,

Teknik imkânlarından faydalandığım Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne,

Bütün bu süreçte rahat çalışma ortamı sunan Devlete,

Sabır ve desteklerinden dolayı iş arkadaşlarıma, gayret göstermek için ilham aldığım aileme en derin teşekkürlerimle...

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xii
HARİTALARIN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. ŞİŞEN KİLLERİN KÖKENİ VE MİNEROLOJİSİ	2
2.1. Şişen Killerin Kökeni.....	2
2.2. Killerin Mineralojisi.....	2
3. KİLLERİN ŞİŞME ÖZELLİĞİ	4
3.1. Şişme Olayının Mekaniği.....	4
3.2. Killerin Şişme Davranışını Etkileyen Faktörler	5
3.2.1. Killerin şişme davranışını etkileyen zemin özellikleri	5
3.2.2. Killerin şişmesini etkileyen çevre faktörleri	7
3.2.3. Killerin şişme davranışını etkileyen arazi gerilme koşulları	8
4. KİLLERİN ŞİŞME POTANSİYELİNİN TANIMLANMASI VE SINIFLANDIRILMASI	9
4.1. Şişme Potansiyelinin Tanımlanması	9
4.1.1. Şişme yüzdesi	9

Sayfa

4.1.2. Şişme basıncı	10
4.2. Şişen Killerin Hesap ve Sınıflandırılma Yöntemleri	11
4.2.1. Şişen killerin dolaylı yöntemler ile sınıflandırılması.....	11
4.2.2. Şişen killerin doğrudan yöntemlere göre sınıflandırılması	23
4.3. Geçmişte Yapılmış Çalışmalar	25
5. İNCELEME ALANININ TANITILMASI	27
5.1. Genel Bilgiler	27
5.2. İnceleme Alanının Jeolojisi	28
5.3. Depremsellik.....	29
6. ARAZİ VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARI	31
6.1. Arazi Çalışmaları	31
6.1.1 Zemin numunelerinin alınması	31
6.1.2. Mevcut yapılarda gözlenen hasarlar.....	33
6.2. Laboratuvar Çalışmaları	33
6.2.1. Yeniçağa kilinin indeks özellikleri.....	34
6.2.2. Yeniçağa kilinin şişme yüzdesi, basıncı ve serbest basınç dayanımları	34
7. YENİÇAĞA KİLİNİN ŞİŞME YÜZDESİ VE BASINCININ BULUNARAK DEĞERLENDİRİLMESİ	35
7.1.Mineralojik Değerlendirmeler.....	35
7.2. Yeniçağa Kilinin Şişme Potansiyelinin Sınıflandırılması	35
7.3. Şişme Yüzdesi ve Şişme Basıncının Sayısal Hesaplamaları	41
7.4. DeneySEL Yöntemlerle Şişme Yüzdesi ve Basıncı	42
8. YENİÇAĞA KİLİNİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNE KİREÇ VE UÇUCU KÜLÜN ETKİSİ	44
8.1. Sönmüş Kirecin Katkı Maddesi Olarak Kullanılması.....	44

Sayfa

8.1.1. Standart proktor deneyleri ve sonuçları	44
8.1.2. Şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleri ve sonuçları	47
8.1.3. Serbest basınç deneyleri ve deney sonuçları	50
8.2. Uçucu Külün Katkı Maddesi Olarak Kullanılması	52
8.2.1 Standart proktor deneyleri ve sonuçları	52
8.2.2. Şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleri ve sonuçları	53
8.2.3. Serbest basınç deneyleri ve sonuçları	54
9. SONUÇ VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR	62
EKLER	66
EK-1. Yeniçağa killerinin tane boyu dağılımı	67
EK-2. Standart proktor deney sonuçları AÇ-1	68
EK-3. Eksenel birim deformasyon - deviatör gerilme ilişkileri AÇ-1	73
ÖZGEÇMİŞ	78

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Şişme potansiyelinin arazi ve laboratuvar deney sonuçları ile korelasyonu [6].....	12
Çizelge 4.2. Plastisite indisine dayalı şişme potansiyeli sınıflandırılması	12
Çizelge 4.3. Hacim değişikliği, şişme basıncı ve hafif yapılardaki muhtemel hasarlar arasındaki ilişki [22]	13
Çizelge 4.4. Şişme potansiyeli, büzülme limiti ve lineer rötre arasındaki ilişki [23]	13
Çizelge 4.5. Şişen zeminlerin, kolloid içeriği, plastisite indisi ve rötre limitine olarak sınıflandırılması [17].....	14
Çizelge 4.6. Şişen zeminlerin, likit limit, plastisite indisi ve doğal emmesine bağlı olarak sınıflandırılması [18]	19
Çizelge 6.1. Araştırma çukurlarının koordinatları	33
Çizelge 7.2. Yeniçağa kiline ait zemin sınıfı ve şişme parametreleri	43
Çizelge 8.1 Standart proktor deneyi için numune hazırlanması	45
Çizelge 8.2. Standart proktor deney sonuçları	46

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Kil – su sistemi [6]	4
Şekil 4.1. Hacim değişimi, kolloid yüzdesi, plastisite indisi, rötre limiti ilişkileri [17]	14
Şekil 4.2. Şişme potansiyeli – likit limit, başlangıç su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık arasındaki ilişki [24].....	15
Şekil 4.3. Farklı sınıflama sistemlerinin karşılaştırılması [6]	17
Şekil 4.4. Şişen zeminlerin sınıflandırılmasında kullanılan yerinde kuru birim hacim ağırlık – likit limit abağı [25].....	18
Şekil 4.5. Plastisite indisi ve likit limite bağlı şişme potansiyeli kartı [26].....	19
Şekil 4.6. Kil yüzdesi ve plastisite indisine bağlı şişme potansiyeli kartı	20
Şekil 4.7. Kil yüzdesi ve aktiviteye bağlı şişme potansiyeli kartı [13].....	20
Şekil 4.8. Odömetre deneyindeki serbest şişme ve şişme basıncı [31].....	25
Şekil 7.1. Holtz ve Gibbs tarafından önerilen abak	39
Şekil 7.2. Dakshanamurthy ve Raman (1973) tarafından önerilen abak	39
Şekil 7.3 Van Der Merwe (1964) tarafından önerilen abak	40
Şekil 7.4 Seed, Woodward ve Lungreen (1962) tarafından önerilen abak	41
Şekil 8.1 Şişme yüzdeleri değişim grafiği	48
Şekil 8.2 Şişme basınçları değişim grafiği	49
Şekil 8.3. AÇ-1 Serbest basınç dayanımı değişim grafikleri.....	58
Şekil 8.4. AÇ-2 Serbest basınç dayanımı değişim grafikleri.....	58
Şekil 8.5. AÇ-3 Serbest basınç dayanımı değişim grafikleri.....	59
Şekil 8.6. AÇ-4 Serbest basınç dayanımı değişim grafikleri.....	59
Şekil 8.7. AÇ-5 Serbest basınç dayanımı değişim grafikleri.....	60

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 6.1. İnceleme alanı ve araştırma çukurlarının yerleri	32
Resim 6.2. AÇ-3 Araştırma çukurunun açılması	32
Resim 8.1. Değişik kireç oranlarında hazırlanan serbest basınç dayanım deney numuneleri	50
Resim 8.2. Beklemesi biten numunelerin serbest basınç dayanım deneyi ...	51
Resim 8.3. Serbest basınç dayanım deneyi sonunda kırılan numune	51
Resim 8.4. 14 gününü dolduran numunelerin serbest basınç dayanım deneyi sonrası.....	56
Resim 8.5. Serbest basınç dayanım deneyi sonunda kırılan numune	57

HARİTALARIN LİSTESİ

Harita	Sayfa
Harita 5.1. Bolu ili Yeniçağa ilçesi inceleme alanı yer bulduru haritası	27
Harita 5.2. Yeniçağa İlçesi ve çevresi jeoloji haritası, MTA yayınları [47]	29
Harita 5.3. Bolu İli deprem bölgeleri (DAD, 1996) [43]	30

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A	Aktivite
a_v	Sıkışabilirlik ($\Delta e/\Delta \sigma_v$), m^2/kN ,
C	Kil yüzdesi (%),
CL	Düşük plastisiteli kil,
CH	Yüksek plastisiteli kil,
e	Boşluk oranı,
e_o	Başlangıç boşluk oranı,
G_s	Özgül ağırlık,
LL	Likit limit (%),
m_v	Hacimsel sıkışma katsayısı ($\Delta \varepsilon_v/\Delta \sigma_v$), m^2/kN ,
Ps	Şişme basıncı kPa,
PL	Plastik limit (%),
PI	Plastisite indisi (%),
LI	Likidite indisi (%),
I_c	Kıvam indisi (%),
SL	Rötre limiti (%),
S	Şişme yüzdesi (%),
w_n	Doğal su muhtevası (%),
w_o	Başlangıç su muhtevası (%),
w_{opt}	Optimum su muhtevası (%),
γ_n	Doğal birim hacim ağırlık (kN/m^3),
γ_d	Kuru birim hacim ağırlık (kN/m^3),

Kısaltmalar	Açıklama
UÇK	Uçucu kül
ASTM	Amerikan Deney Yöntemleri Standartı
MTA	Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
SPT	Standart penetrasyon deneyi
TS	Türk Standardı
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
USCS	Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi
XRD	X-ışınları kırınım analizi

1. GİRİŞ

Kısmen suya doymun ya da doymun olmayan killi zeminlerin bünyelerindeki su içeriğinde, çevresel etkenlerle artış meydana gelebilir. Su içeriğindeki artış, zeminin hacimsel olarak da artmasına neden olur ki bu olay, zeminde şişme olarak tanımlanır. Zeminlerin şişebilme yetisi, o zeminin şişme potansiyelidir. Şişme potansiyeli terimi, birçok araştırmacı tarafından zeminlerin hem şişme yüzdesi hem de şişme basıncı olarak tanımlanır. Killerin şişme potansiyelleri, Atterberg limitlerine ve aktiviteye bağlı olarak belirlenebilmektedir. En çok şişme potansiyeline sahip killi, montmorillonit kökenli killerdir [1].

İnceleme alanında ön etütlerde belirlenen, bölgenin muhtelif yerlerinden örselenmiş zemin örnekleri alınmıştır. Örnek alma noktalarının daha sonraki çalışmalara ışık tutması amacıyla koordinatları bulunup çalışma içerisinde verilmiştir. Zemin örneklerinin indeks özelliklerini, şişme yüzdesi ve şişme basıncını belirlemek için laboratuvar deneyleri yapılmış ve daha önce benzer çalışma yapan araştırmacıların elde ettiği değerlerle karşılaştırılmıştır.

Çalışma alanından alınan zemin numunelerine %1, %3, %5, %7 ve %9 oranlarında sönmüş kireç ile %5 ve %10 oranlarında uçucu kül maddeleri katılarak şişme basıncı ve şişme yüzdesindeki değişim incelenmiştir. Ayrıca kullanılan bu katkı maddelerinin problemlili zeminin mühendislik özelliklerine nasıl bir etkide bulunacağını anlamak için serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Yürütölen deneysel çalışmanın detayı ve deney bulguları tartışılmıştır.

2. ŞİŞEN KİLLERİN KÖKENİ VE MİNEROLOJİSİ

2.1. Şişen Killerin Kökeni

Chen (1975) şişmeye yol açan kil minerallerinin ana kaynağını iki grupta sınıflandırmıştır [2].

Bunlardan birincisi magmatik kayalar, özellikle de bazalttır. Bu tür kayalar içeriğinde bulunan feldispat ve piroksen minerallerinin bozunmasıyla, montmorillonit ve diğer ikincil mineralleri oluştururlar. Diğer grupta ise fiziksel olarak ayrışması sonucu şişen killeri oluşturan, montmorillonit ihtiva eden sedimanter kayalardır.

Montmorillonit yüksek katyon değişimi yeteneğine sahip kil minerallerinin ve bunların ornatıma uğramış çeşitli kimyasal türlerinin ortak adıdır [3]. Ağırlıklı olarak tuf ve volkan küllerinin bozunmasından meydana gelen montmorillonit şişme potansiyeli en yüksek kil grubundadır [4,5].

Şişen killerin oluşumunun daha iyi anlaşılabilmesi için kil mineralleri ve özellikleri hakkında bahsetmek uygun olacaktır.

2.2. Killerin Mineralojisi

Killer, tane boyutları 2 mikron (<0.002 mm) ve daha küçük olan, hidratlı alüminyum veya magnezyum silikatlardan oluşan ikincil minerallerdir [1].

Her kil minerali; iki, üç veya dört levhadan oluşan birim hücrelere sahiptir. İki levhalı mineraller bir silis levhası (tetrahedral – dört yüzlü) ve bir oktahedral (sekizyüzlü) levhadan oluşmaktadır. Üç levhalı mineraller ise, iki silis levhası arasına sıkışmış dioktahedral (tabaka katyonu iki değerlikli: Mg^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Ni^{2+}) veya trioktahedral (tabaka katyonu üç değerlikli: Al^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{3+}) levhadan oluşur. Dört levhalı mineraller, 2:1 tabaka + bir tabaka arası hidroksit levhasından oluşur [5].

Kil mineralleri başlıca dört ana gruba ayrılır [6];

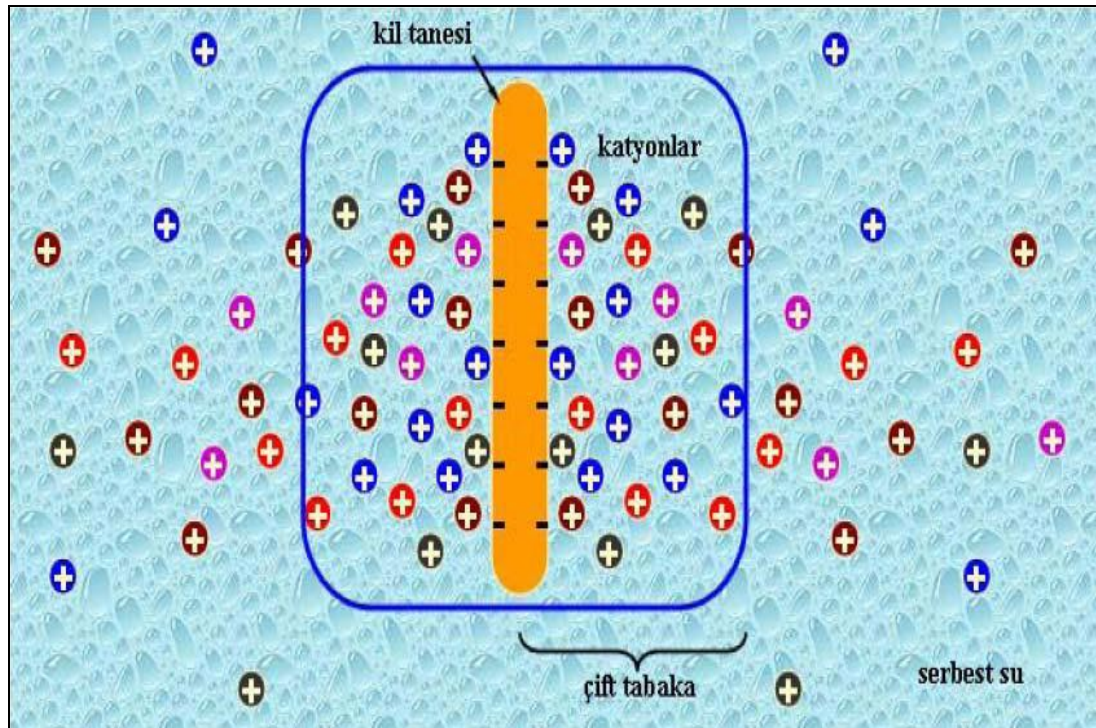
- a) *Kaolinit Grubu Kil Mineralleri* genelde şişme özelliği göstermezler
- b) *Mika-İllit Grubu Kil Mineralleri* illit ve vermikülit içerirler. Şişebilen kil grubunda olmakla beraber, genelde önemli problemlere yol açmazlar.
- c) *Smektit Grubu Kil Mineralleri* montmorillonitleri içerirler. Oldukça yüksek şişme özelliğine sahip olup, en çok problem yaratan kil mineralleridir.
- d) *Vermikülit Grubu Kil Mineralleri* montmorillonit, notronit ve saponit ile bir grup oluşturur. Tabakalarının arasına su alarak şişme özelliği göstermesi bu grubun en önemli özelliğidir.

3. KİLLERİN ŞİŞME ÖZELLİĞİ

3.1. Şişme Olayının Mekanîği

Kil taneleri, yüzeylerinde negatif elektrik yükü olan, pozitif yüklü köşelere sahip plakacıklardır. Boşluklardaki suyun içerisindeki katyonların kil tabakasının yüzeyine elektriksel kuvvetler ile tutunmasıyla, negatif yükler dengelenmektedir (Şekil 3.1) [6].

Elektriksel çekim kuvvetinin etki alanı hem negatif yüklerin hem de zemin suyunun elektro-kimyasal özelliklerinin bir fonksiyonudur. Van der Waals yüzey kuvvetleri ve kil minerali ile su molekülleri arasındaki adsorbsiyon kuvveti de bu çekim kuvvetini etkilemektedir. Bu iç elektro-kimyasal kuvvet sistemi dışarıdan uygulanan gerilmeler ve suyun kapilar gerilmesi ile dengede olmak zorundadır. Kapilar gerilme sıklıkla “kılcal emme” olarak adlandırılır [6].



Şekil 3.1. Kil – su sistemi [6]

Şişme ise zemin-su sisteminde (Şekil 3.1) içsel gerilme dengesini bozan bir takım değişikliklerin sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Sıvının miktarı veya kimyasal bileşiminin değişmesi ile zemin tanelerinin içindeki kuvvetlerde değişecektir [6].

İç elektro-kimyasal kuvvet sistemi, yeraltı suyundaki kapiler gerilme (matris emme) ve dışarıdan uygulanan gerilmeler arasındaki denge bozulduğunda; denge yeniden sağlanıncaya kadar, tanelerin arasındaki boşluk oranı değişir ve zeminde hacim değişikliği (şişme veya büzülme) meydana gelmektedir [6].

3.2. Killerin Şişme Davranışını Etkileyen Faktörler

Killerin şişme davranışına etki eden çok sayıda faktör olmakla beraber bu faktörler aynı zamanda zeminin fiziksel özelliklerini de (plastisite, yoğunluk vb.) etkilemekte ya da bunlardan etkilenmektedir. Killerin davranışını etkileyen faktörler üç ana grupta toplanabilir. Bunlar [5];

- a) Zemin Özellikleri tane içi kuvvet alanını etkilemektedir.
- b) Çevresel faktörler iç kuvvet sistemindeki olası değişiklikleri etkilemektedir.
- c) Arazi gerilme durumudur.

3.2.1. Killerin şişme davranışını etkileyen zemin özellikleri

Farklı kil mineralleri, yapılarındaki ve tabakalar arası bağlanmalarındaki değişiklikler nedeniyle farklı şişme potansiyelleri gösterirler. Smektit ve vermikülitler, ıslanma ve kuruma sonucunda büyük hacim değişimlerine neden olurlar. Bu hacim değişimleri, illitlerde orta, kaolinitlerde ise daha düşük seviyededir [5].

Kasyon değeriği ile konsantrasyon arttıkça şişme miktarı azalmaktadır. Örneğin; zemin suyu içerisindeki Mg^{+2} kasyonları, Na^{+} kasyonlarına nazaran daha düşük şişmeye neden olacaktır [6].

Boşluk suyunun iyonik konsantrasyonu ve iyonların değeriği, bir kilin hacimsel davranışını önemli ölçüde etkileyen iki önemli kimyasal değişimdir. Boşluk suyundaki iyonların değeriği ile çift tabaka kalınlığı ters orantılıdır. Boşluk sıvısında daha düşük değeriğli kasyonların olması durumunda çift tabaka kalınlığı artmakta ve bu durum da zeminin şişmesine neden olmaktadır [9].

Bununla birlikte, boşluk suyundaki tuz konsantrasyonu da şişme potansiyelini azaltma eğilimindedir [10].

Zemin emmesi; belirli su muhtevasına sahip bir zeminin, boşluk suyunu emme potansiyelini tanımlayan fiziksel bir özelliktir ve bu nedenle zeminlerin hacim değıştirme davranışıyla ilişkilidir. Başlangıç emme değeriğinin artmasıyla, toplam şişme miktarı artmaktadır [6].

Kil yapısı, zemin tanelerinin ve boşluklarının boyutu, şekli ve dizilimi olarak tanımlamıştır. Fabrik terimi ise genellikle zemin tanelerinin dizilimini ifade etmek için kullanılmaktadır. Su muhtevasının, fabrik üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır ve fabrikteki değışimler sonucunda şişme davranışı da değışmektedir [14].

Tane diziliminin şişme üzerindeki etkisi, kil tipine bağlıdır. Sodyum montmorilloniti gibi yüksek şişme potansiyeline sahip killer için paralel tane oryantasyonu durumunda en büyük şişme gözlenir. Bununla birlikte, Seed ve Chan [12] en büyük şişme basıncı ve hacim artışının rastgele ve flokülleşmiş tane dizilimi durumunda meydana geldiğini belirtmişlerdir [11]. Çimentolaşmış partiküller ise daha az şişme gösterirler [10].

Zemin davranışındaki belirli kritik aşamalardaki su içeriğini ifade eden kıvam limitleri şişme potansiyelinin değerlendirilmesinde pek çok araştırmacı tarafından kullanılmıştır [12].

Şişebilen zeminlerin çoğunda, doğal su içeriği plastik limiti (PL) altındadır. Şişen killer genellikle, daha geniş bir su muhtevası aralığında plastik kalırlar, yani plastisite indisleri daha yüksektir [12].

3.2.2. Killerin şişmesini etkileyen çevre faktörleri

Arazide gerçekleşebilecek şişmenin miktarı çevresel koşulların bir fonksiyonudur ve bunun sonucu olarak, sınıflarına göre aynı şişme potansiyeline sahip olabilen iki zemin, çok farklı miktarlarda şişme gösterebilir [13].

Su içeriğindeki değişiklikler, en fazla yüzeyden itibaren birkaç metresinde yaşanır. Genelde zemin profili, zemindeki su içeriğinin değişiminde önemli rol oynar. Aynı zamanda bu bölgelerdeki örtü gerilmesi de düşük olduğundan, zemin şişmeden kaynaklanan hareketlere karşı koyamamaktadır. Zemin profilinin yüzeye yakın, şişme ve büzülme olayının meydana geldiği kesim aktif zon olarak adlandırılmaktadır [13].

Buharlaşıma ile yağış miktarındaki farklılıklar, önemli ölçüde zeminin su içeriğinde mevsimsel olarak meydana gelen dalgalanmaların derinliğini etkilemektedir. Mevsimsel olarak en büyük kabarma, kısa dönemli yağış periyotları ile yarı kurak iklimlerde meydana gelmektedir [13].

Su tablasının sığ derinlikte olması ve su tablasında meydana gelen dalgalanmalar, zeminin su içeriğinde değişikliklere neden olmaktadır [13].

Abouleid, yoğrulmuş kil numuneleri için üç ya da dört ıslanma kuruma tekrarından sonra şişme özelliklerinde herhangi bir hacim değişikliği

olmadığını belirtmiştir. Diğer taraftan Nordquist ve Bauman, Obermeier ve Popescu kuruma ve ıslanma tekrarlarının sayısıyla şişme yeteneğinin arttığını vurgulamışlardır [15].

3.2.3. Killerin şişme davranışını etkileyen arazi gerilme koşulları

Şişme basıncı, uygulanan gerilme izine kuvvetli şekilde bağlıdır ve elde edilen sonuçlar farklı gerilme izleri için oldukça farklı olabilir. Aşırı konsolide bir zemin, aynı boşluk oranında fakat normal konsolide zeminden daha çok şişme özelliğine sahiptir. Doygun olmayan bir kilin ıslanması sonucunda; uygulanan gerilme değerine, gerilme tarihçesine ve emme değişimine bağlı olarak, şişme veya göçme meydana gelebilmektedir. Bu durum aktif kil mineralleri içeren yüksek oranda şişebilen killer için bile geçerlidir [11].

4. KİLLERİN ŞİŞME POTANSİYELİNİN TANIMLANMASI VE SINIFLANDIRILMASI

4.1. Şişme Potansiyelinin Tanımlanması

Şişme potansiyeli genelde zeminlerin şişme özelliğini ifade eden bir kavram olarak kullanılmaktadır. Literatürde, şişme potansiyelinin belirlenmesi ve tanımlanması açısından tam bir fikir birliği bulunmamaktadır. Bununla birlikte, şişme potansiyeli; genellikle, zeminlerin hem şişme yüzdesini hem de şişme basıncını kapsayan bir terim olarak kabul edilmektedir [11].

4.1.1. Şişme yüzdesi

Şişme yüzdesi, örselenmemiş veya laboratuvarında istenilen herhangi bir başlangıç koşulunda sıkıştırılarak hazırlanan zemin numunesinin, yük altında numunenin doymuş hale gelinceye kadar su altında bırakılması sonucu hacminde meydana gelen artışın, başlangıç hacmine oranıdır. Daha kısa tanımlamak gerekirse zemin numunesinde meydana gelen hacimsel artış yüzdesidir. Bu hacimsel artış yüzdesi iki şekilde tanımlanabilir. Birincisi; sabit ve küçük bir sürşarj yükü altında numune doymuş hale gelirken, yanal deformasyonların engellenmesi (bir boyutlu odömetre koşullarında) durumunda meydana gelen düşey boy değişimidir. İkincisi ise; eksenel deformasyonların engellenmesi (üç eksenli koşullarında) durumunda, meydana gelen yanal çap değişimi şeklinde ifade edilmektedir [11].

Literatürde, farklı araştırmacıların çalışmalarında, şişme potansiyelinin belirlenmesinde; kullanılan deney sistemi ve izlenen prosedür açısından önemli farklılıklar bulunmaktadır.

Örneğin, Holtz ve Gibbs [17] zeminin şişme potansiyelini, havada kurutulmuş örselenmemiş bir zeminin, 6.9 kPa sürşarj yükü altında doymuş hale gelmesi sırasında meydana gelen hacim değişim yüzdesi olarak tanımlamışlardır.

Seed [13] şişme potansiyelini, standart AASHTO proktor testi su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırılmış zemin numunesinin, odömetre koşullarında 6,9 kPa sürşarj basıncı altında, su altında bırakılması sonucu meydana gelen düşey boy değiştirmesinin başlangıç numune yüksekliğine oranı olarak tanımlamıştır.

Snethen [18] şişme potansiyelini, örselenmemiş zemin numunesinin, odömetre koşullarında, arazide maruz kalacağı yüke eşdeğer sürşarj yükü altında ıslatılması sonucunda nihai denge doygunluk durumuna kadar meydana gelen hacim değişiminin, başlangıç numune hacmine oranı olarak tanımlamıştır.

Coduto'ya [19] göre, şişme potansiyelini belirlemeye yönelik odömetre deneylerinde kullanılacak sürşarj yükü 2,9 kPa ~ 71,4 kPa arasında değişmelidir. Aynı deneyde kullanılacak ring çaplarının 50 ~ 112 mm, ring yüksekliklerinin ise 12 ~ 37 mm arasında olması gerekmektedir [19].

“Serbest şişme (free swell)”, deney başında örnek üzerine uygulanan basıncın 7 kPa ve bu değerden daha az olması halinde elde edilen şişme olarak ifade edilirken, sürşarj yükünün bu değerden daha büyük olması durumunda elde edilen şişme değerleri ise “ sürşarj altında şişme (yükli şişme)” olmak üzere farklı şekillerde ifade edilmektedir.

4.1.2. Şişme basıncı

Şişen zeminlerin, suyla temasa geçmeleri sonucunda ortaya çıkan hacim artışları engellenmeye çalışıldığında, bir basınç meydana gelmekte ve bu basınç şişme basıncı olarak isimlendirilmektedir. Sridharan ve Choudhury [20] şişme basıncını, kilin su veya elektrolit absorbe etmesine izin verilmesi halinde, kil – su sistemini istenen boşluk oranında tutmak için gerekli basınç olarak tanımlamışlardır. ASTM ise şişme basıncını, numunenin şişmesini

engelleyecek ya da şişme tamamlandıktan sonra numuneyi eski haline (boşluk oranı, yükseklik) getirecek basınç olarak tanımlamıştır [21].

4.2. Şişen Killerin Hesap ve Sınıflandırılma Yöntemleri

Zeminin şişme özelliği göstermesi için birleştirilmiş zemin sınıflama sistemine (USCS) göre muhtemelen CH ya da CL sınıfına ait olması gerekmektedir. Şişme özelliğine sahip zeminler genellikle kılcal çatlaklı, kırık ve cilalı yüzeylidir ve önceki şişme ve büzülmenin izlerini taşırlar [19].

Zeminlerin şişme potansiyelini hesap etmek için birçok deney ve yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler, genel olarak dolaylı ve doğrudan yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır. Dolaylı yöntemler, kıvam limitleri, kil içeriği, aktivite, kuru birim hacim ağırlığı vb. zemin değişkenlerinden yararlanılarak şişme potansiyelinin tahmin edildiği yöntemlerdir. Ayrıca, çeşitli zemin değişkenleriyle şişme yüzdesi ve şişme basıncını ilişkilendiren deneye dayalı eşitlikler de mevcuttur. Doğrudan yöntemler ise, zemin şişmesinin gerçek fiziksel ölçümleri olup, deney sonuçlarına bağlı olarak zeminin şişme potansiyelinin belirlenmesini ifade etmektedir.

4.2.1. Şişen killerin dolaylı yöntemler ile sınıflandırılması

Bu değerlendirme yöntemi, şişen killeri tanımlamak ve sınıflandırmak için likit limit, plastisite indisi, büzülme limiti, büzülme indisi, serbest şişme indisi, aktivite, kuru birim hacim ağırlık, başlangıç su muhtevası, katyon değiştirme kapasitesi, emme indisi, zeminin mineralojik özellikleri gibi parametreler kullanılarak korelasyona gidilmesi esasına dayanmaktadır. Bu korelasyonlar yaklaşık olup, ön değerlendirme safhasında fikir vermesi bakımından faydalıdır.

Çeşitli araştırmacılar, şişen killerin şişme potansiyelinin dolaylı (nitel) olarak belirlenmesinde birçok korelasyon geliştirmişlerdir. Bu korelasyonlardan sık kullanılanların bazıları bölüm içerisinde verilmiştir.

Chen (1975), şişme potansiyelini tahmine etmek için 200 nolu elekten geçen (USCS) dane boyutunun ağırlıkça yüzdesi, likit limit ve SPT darbe sayıları arasında bir ilişkiye işaret etmiştir (Çizelge 4.1). Ayrıca buna ek olarak sadece plastisite indisine bağlı olarak da bir sınıflandırma önermiştir (Çizelge 4.2) [6,19].

Çizelge 4.1. Şişme potansiyelinin arazi ve laboratuvar deney sonuçları ile korelasyonu [6]

Laboratuvar ve arazi verileri			Şişme derecesi		
200 no'lu elekten geçen yüzde	Likit Limit (%)	SPT N değeri	Muhtemel Şişme (%)	Şişme Basıncı (kPa)	Şişme Potansiyeli
< 30	< 30	< 10	< 1	50	Düşük
30 ~ 60	30 ~ 40	10 ~ 20	1 ~ 5	120~250	Orta
60 ~ 95	40 ~ 60	20 ~ 30	3 ~ 10	250~1000	Yüksek
> 95	> 60	> 30	> 10	> 1000	Çok Yüksek

Çizelge 4.2. Plastisite indisine dayalı şişme potansiyeli sınıflandırılması [19]

Şişme Potansiyeli	Plastisite indisi PI (%)
Düşük	0 ~ 15
Orta	10 ~ 35
Yüksek	20 ~ 55
Çok Yüksek	> 35

Wayne vd. [22] hafif yapılardaki, şişen zeminlerin olumsuz etkilerini gözlemlemiş, hasar boyutu ile şişme yüzdesi ve şişme basıncı arasında ilişkiyi sınıflandırmışlardır (Çizelge 4.3).

Altmeyer [23] şişme potansiyelinin tahmin edilmesi için rötire limiti veya lineer rötrenin kullanımını önermiştir (Çizelge 4.4).

Holtz ve Gibbs [17] tarafından verilen, örselenmemiş zemin numunelerindeki şişme davranışını belirleyen kriterler Çizelge 4.5' de, grafiksel gösterim ise Şekil 4.1' de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Hacim değişikliği, şişme basıncı ve hafif yapılardaki muhtemel hasarlar arasındaki ilişki [22]

Hacim Değişikliği (%)	Şişme Basıncı (kPa)	Hafif Yapılardaki Olası Hasar
0 ~ 1,5	< 50	Düşük
1,5 ~ 5	50 ~ 250	Orta
5 ~ 25	250 ~ 1000	Yüksek
> 25	> 1000	Çok Yüksek

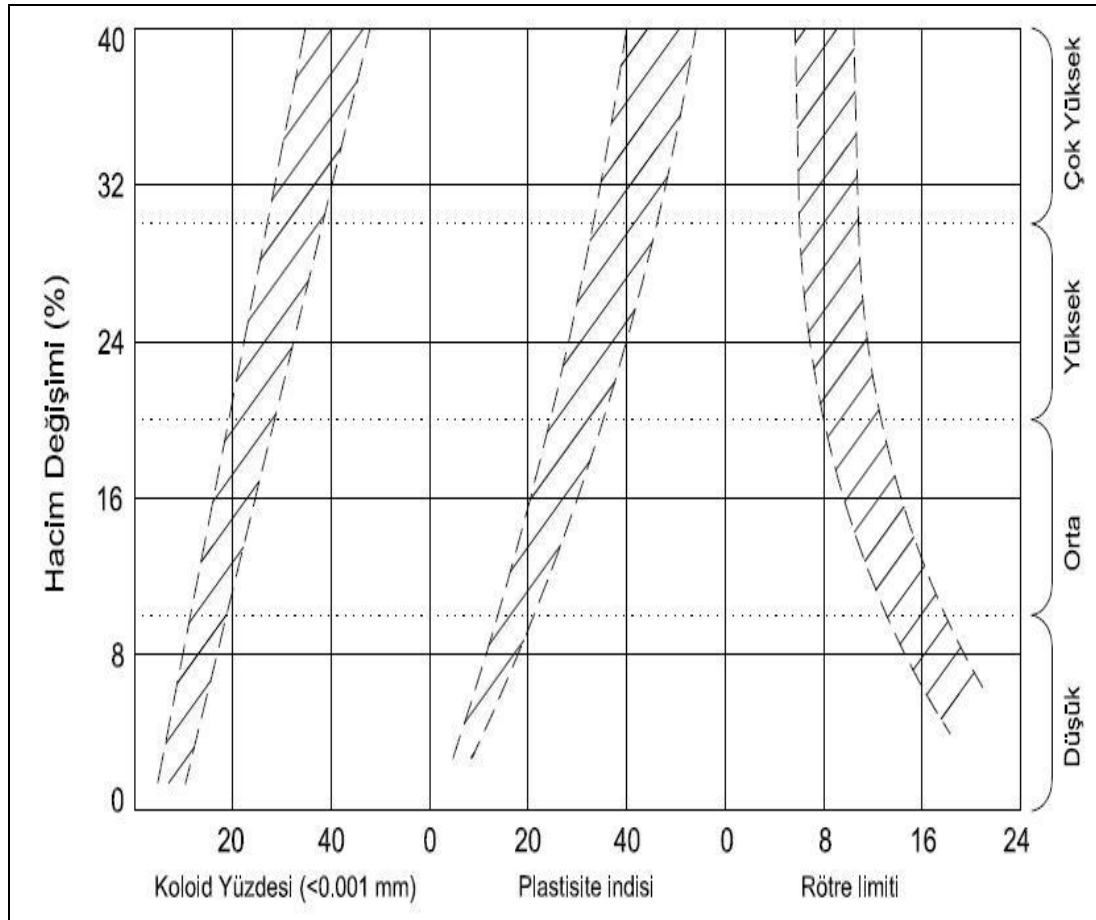
Çizelge 4.4. Şişme potansiyeli, büzülme limiti ve lineer rötire arasındaki ilişki [23]

Lineer Rötire	Rötire Limiti (%)	Muhtemel Şişme (%)	Şişme Derecesi
< 5	> 12	< 0,5	Kritik değil
5 ~ 8	10 ~ 12	0,5 ~ 1,5	Sınır
> 8	< 10	> 1,5	Kritik

Çizelge 4.5. Şişen zeminlerin, kolloid içeriği, plastisite indisi ve rötre limitine bağlı olarak sınıflandırılması [17]

Kolloid içeriği (<0,001 mm)	Plastisite İndisi PI (%)	Rötre Limiti (%)	Muhtemel Şişme* (%)	Şişme Derecesi
> 28	> 35	< 11	> 30	Çok Yüksek
20 ~ 31	25 ~ 41	7 ~ 12	20 ~ 30	Yüksek
13 ~ 23	15 ~ 28	10 ~ 16	10 ~ 20	Orta
< 15	< 18	> 15	< 10	Düşük

*: 6.9 kPa sürşarj yükü altında

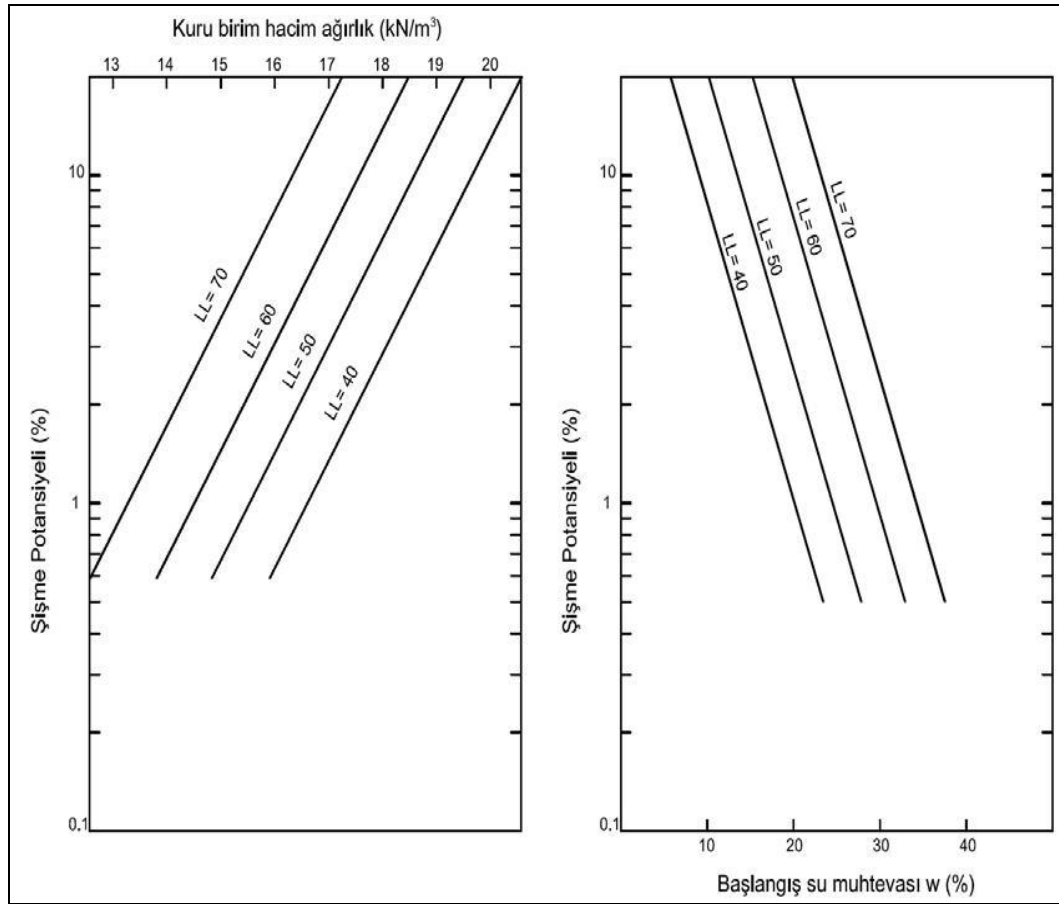


Şekil 4.1. Hacim değişimi, kolloid yüzdesi, plastisite indisi, rötre limiti ilişkileri [17]

Vijayvergiya ve Ghazzaly [24], örselenmemiş numunelerin üzerinde şişme potansiyellerinin belirlenmesinde Şekil 4.2.' de gösterilen abağı geliştirmişlerdir. Bu korelasyonda, başlangıç su muhtevası, likit limit ve kuru

birim hacim ağırlık bağımsız değişkenler olarak alınmakta ve 6.9 kPa sürüşarj yükü altındaki şişme potansiyeli verilmektedir.

Büzülme ve şişme arasında nitel bir ilişkinin var olduğu inancı, çeşitli araştırmacılar [17,23] tarafından büzülme limitinin zeminin şişme potansiyelini gösteren bir parametre olarak kullanılmasına neden olmuştur. Bununla birlikte, literatürde şişme potansiyeli ile büzülme limiti arasında güçlü ve tutarlı bir ilişkinin bulunmadığını gösteren birçok çalışma mevcuttur [2, 13, 26,27].



Şekil 4.2. Şişme potansiyeli – likit limit, başlangıç su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık arasındaki ilişki [24]

Chen (1975), kendisi ve farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen, plastisite indisi - şişme potansiyeli arasındaki ilişkiyi aynı grafik üzerinde farklı eğriler

ile karşılaştırmıştır (Şekil 4.3.). Bu eğriler, bilinen bir plastisite indisi değerine karşılık gelen potansiyel hacim değişim yüzdelerini, çok geniş bir aralıkta göstermektedir [6].

Plastisite indisinin $PI = \%15$ olması durumu için farklı metotlar: $\%8,5$, $\%1,5$ ve $\%1,0$ gibi farklı hacim değişimlerini işaret etmektedir (Şekil 4.3). Araştırmacıların dikkate aldığı deney yöntemleri birbirleriyle benzerlik gösterse de, bu üç tahmini hacim değişim yüzdelerinin doğrudan kıyaslanması çok doğru olmaz, çünkü deneyde kullanılan örneğin durumu ve su içeriği sınırları önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Holtz ve Gibbs tarafından geliştirilen yaklaşımda havada kurutulmuş örselenmemiş zemin numunelerinin doygun hale gelmesi sırasında göstermiş olduğu hacim değişikliği dikkate alınmıştır ve 38 ayrı örnek üzerinde gerçekleştirilen deney sonuç verileri temel alınarak hazırlanmıştır. Seed ve diğerleri tarafından geliştirilen yöntemde ise örselenmiş zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilen deney sonuçları kullanılmıştır. Chen ise yaptığı çalışmada, örselenmemiş ve doğal su içeriğinde şişmeye bırakılan zemin numunelerin deney sonuçlarını kullanmıştır [6].

Mitchell - Gardner, Gibbs, likit limit ve yerinde kuru birim hacim ağırlık parametreleri kullanarak, zeminleri şişebilen (düşük, orta, yüksek, çok yüksek şişme) ve çöken diye sınıflandıran bir abak geliştirmişlerdir (Şekil 4.4) [25]. Dakshanamurty ve Raman [26] zeminlerin şişme potansiyelinin tahmin edilmesinde plastisite abağından yararlanmışlardır (Şekil 4.5).

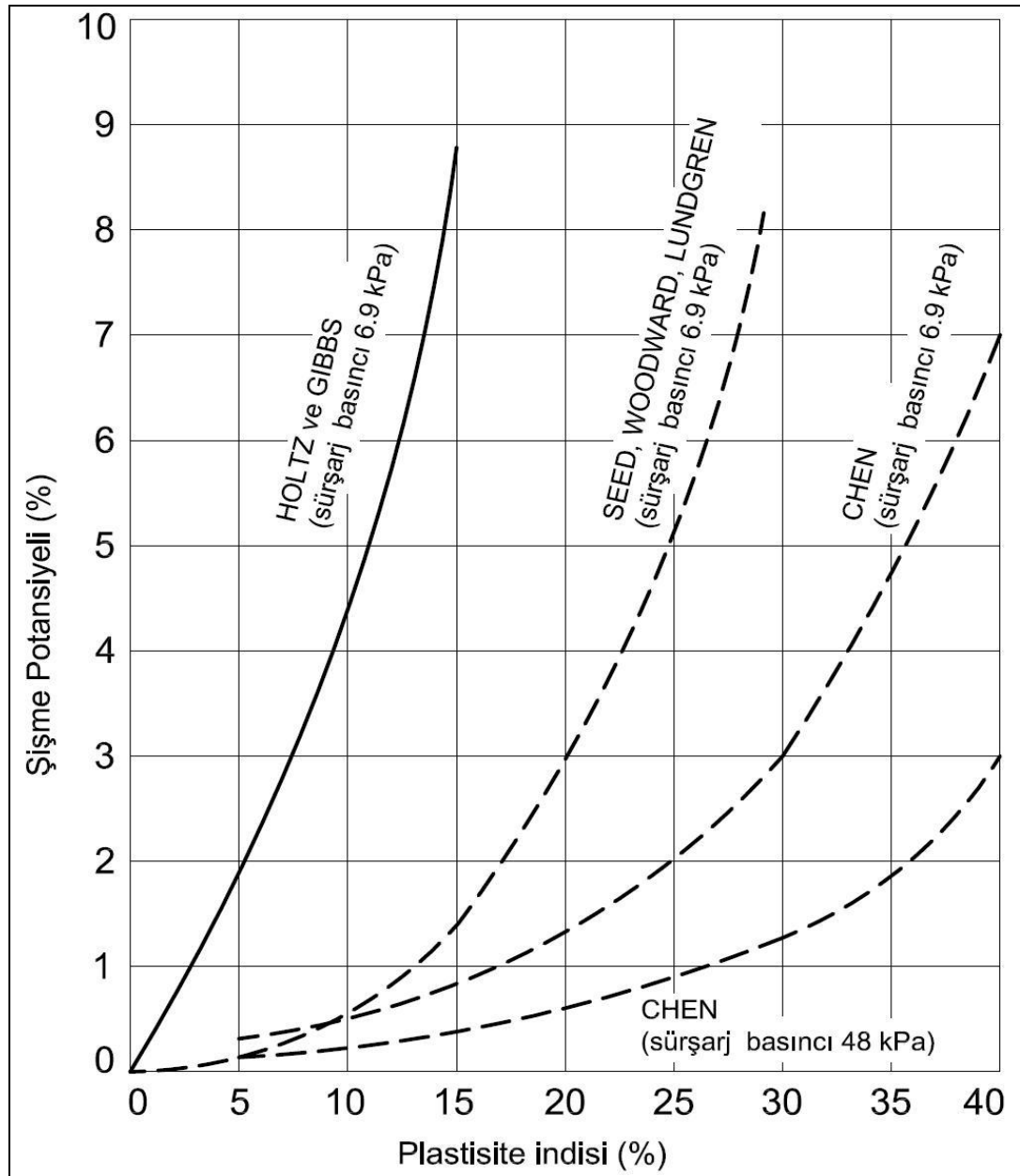
Van der Merwe [27] ise plastisite indisi ve kil yüzdesine bağlı olarak, şişme potansiyelinin tahmin edilmesi için Şekil 4.6' de görülen abağı vermişlerdir.

Seed vd. [13] standart proktor sıklığında ve optimum su muhtevassından sıkıştırılmış killerin, 6.9 kPa sürşarj yükü altında şişme karakteristikleri üzerine yaptıkları çalışmada, aktivite ve kil boyutlu tanelerin yüzdesine dayanan bir abak geliştirmişlerdir (Şekil 4.7).

Skempton, plastisite indisi ile kil yüzdesini, aktivite (A) olarak isimlendirilen tek bir parametrede birleştirmiştir (Eş. 4.1) [6,28].

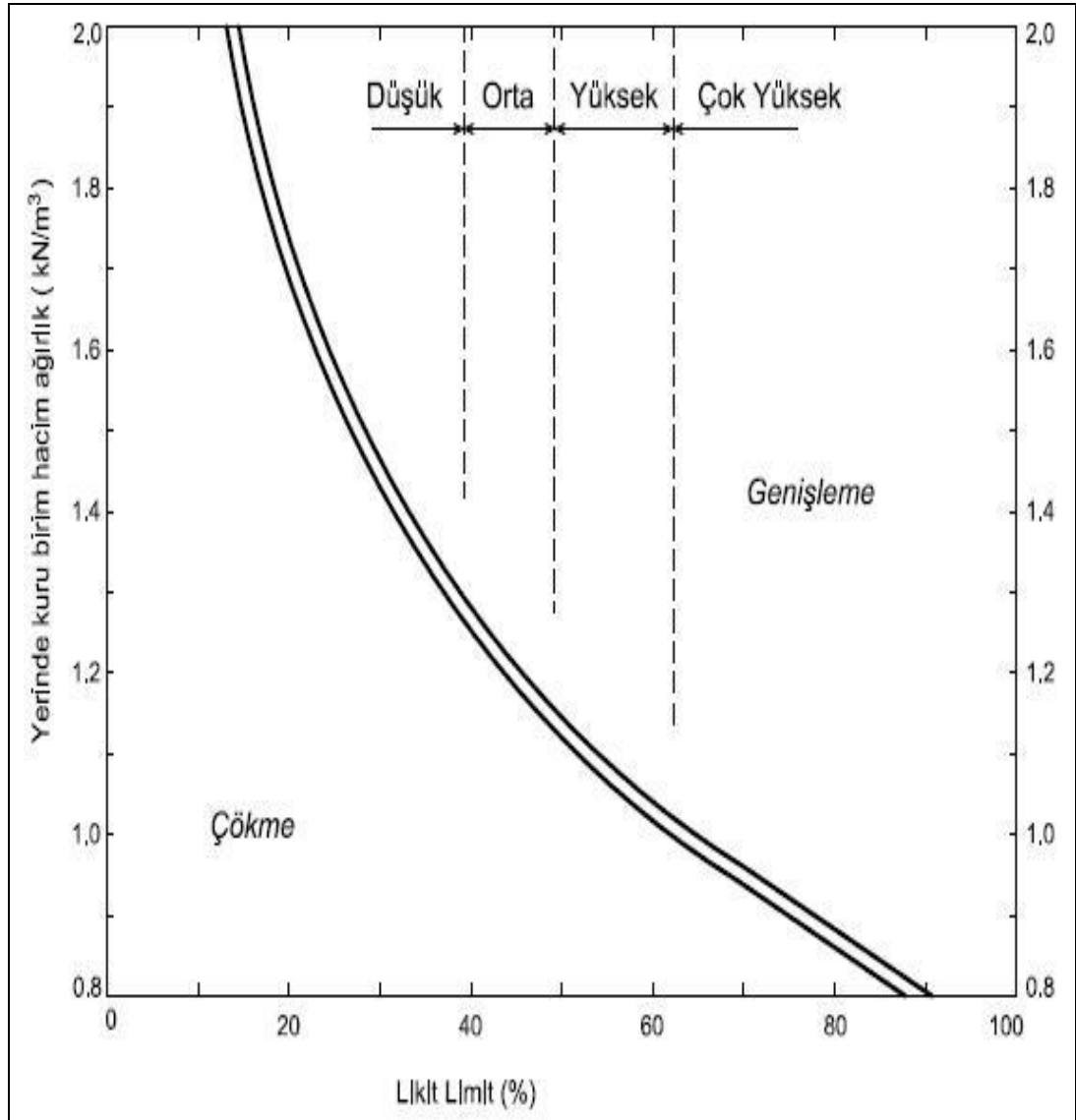
$$A = PI / C \quad (4.1)$$

Burada, A - aktivite, PI - plastisite indisi, C - kil yüzdesidir.



Şekil 4.3. Farklı sınıflama sistemlerinin karşılaştırılması [6]

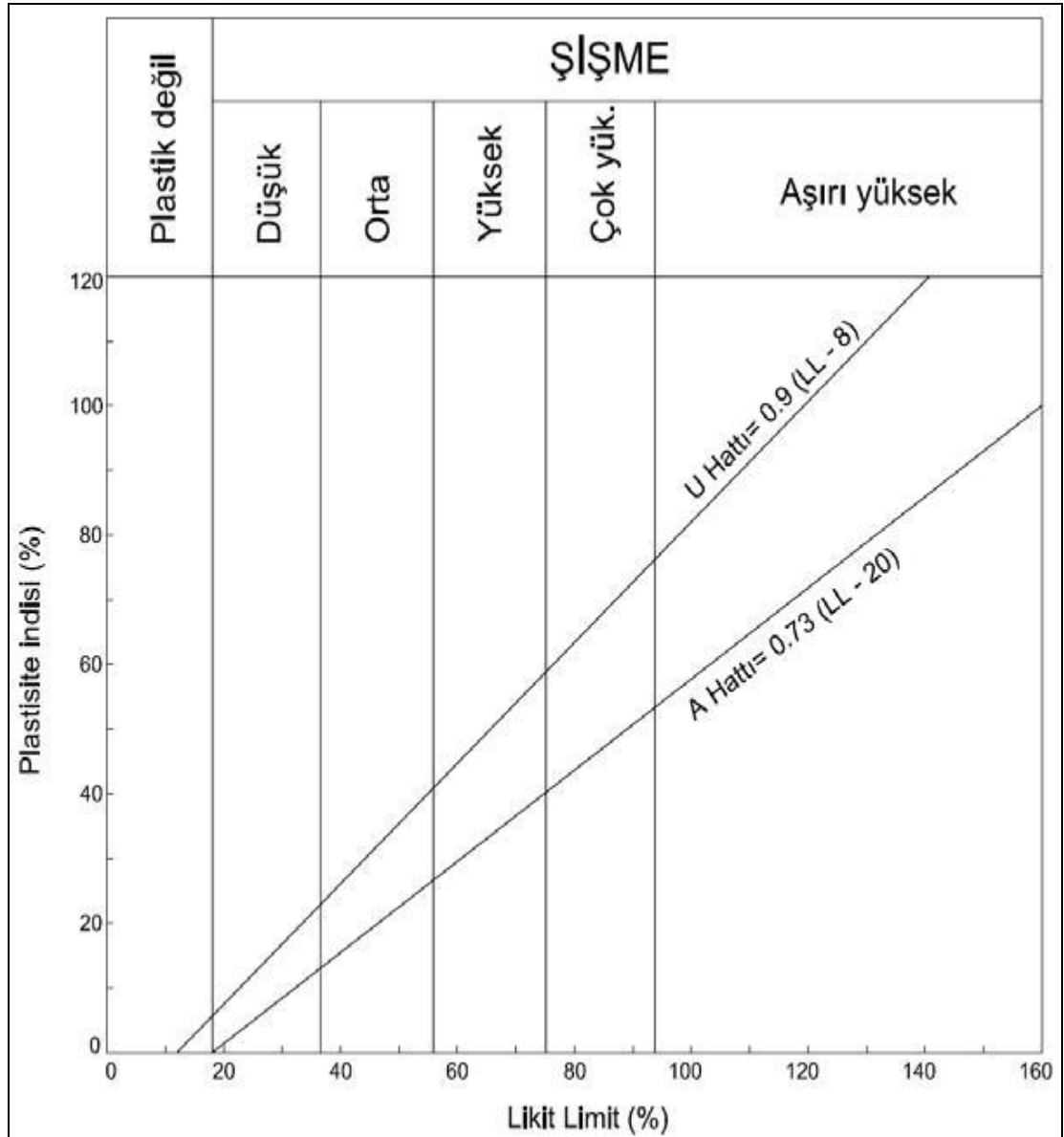
Snethen vd. potansiyel şişmeyi tahminde kullanılan, yayımlanmış 17 farklı kriteri değerlendirmişlerdir. Bu değerlendirmenin sonucunda, likit limit ve plastisite indisinin, potansiyel şişmenin en iyi göstergesi olduğu sonucuna varmışlar ve şişen zeminlerin sınıflandırılmasında (zeminin kendi doğal sürşarj yükü altında) kullanılmak üzere Çizelge 4.6.' da verilen likit limit, plastisite indisi ve doğal su muhtevasında zemin emmesine değişkenlerine bağlı tabloyu geliştirmişlerdir. Zemin emmesi, doymamış zeminlerde negatif boşluk basıncıyla ifade edilen, bağımsız efektif gerilme değişkenidir [18].



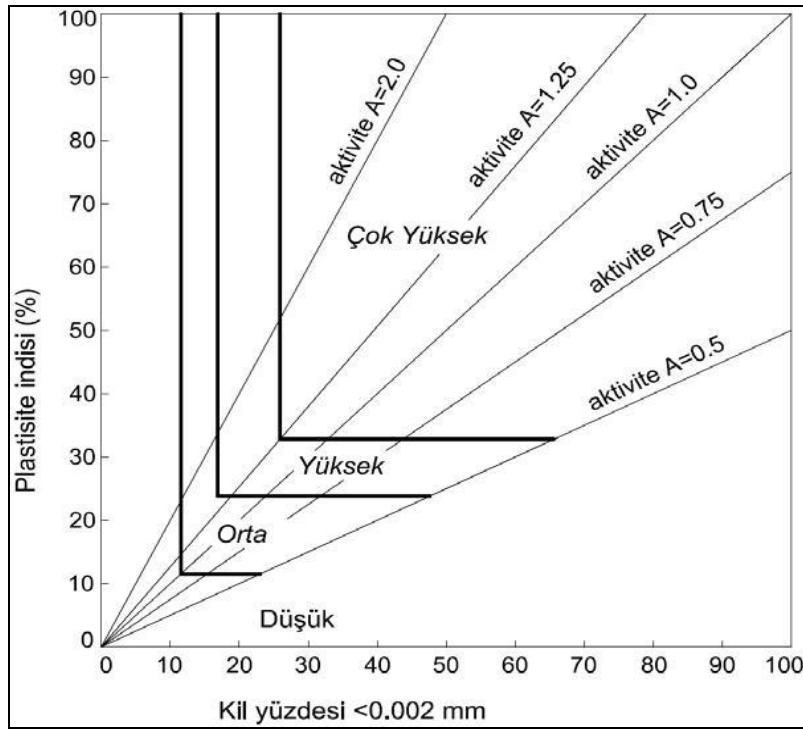
Şekil 4.4. Şişen zeminlerin sınıflandırılmasında kullanılan yerinde kuru birim hacim ağırlık – likit limit abağı [25]

Çizelge 4.6. Şişen zeminlerin, likit limit, plastisite indisi ve doğal emmesine bağlı olarak sınıflandırılması [18]

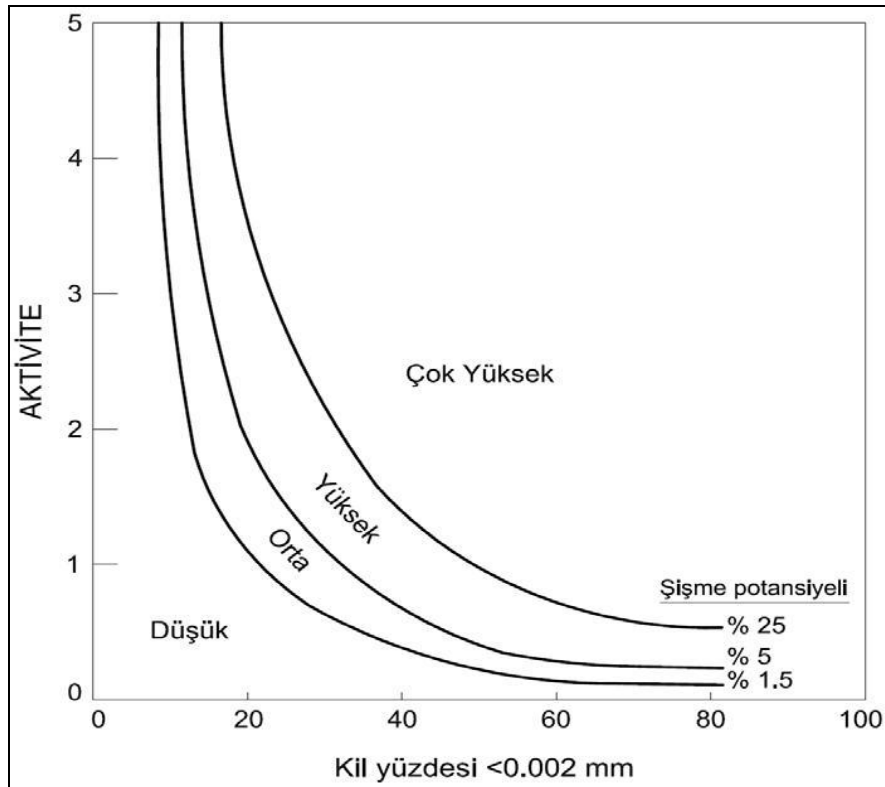
Likit Limit LL (%)	Plastisite İndisi PI (%)	μ (doğal emme) (MPa)	Potansiyel Şişme (%)	Şişme Derecesi
> 60	> 35	< 0,38	> 1,5	Yüksek
50 ~ 60	25 ~ 35	0,14 ~ 0,38	0,5 ~ 1,5	Orta
< 50	< 25	> 0,14	< 0,5	Düşük



Şekil 4.5. Plastisite indisi ve likit limite bağlı şişme potansiyeli kartı [26]



Şekil 4.6. Kıl yüzdesi ve plastisite indisine bağlı şişme potansiyeli kartı [27]



Şekil 4.7. Kıl yüzdesi ve aktiviteye bağlı şişme potansiyeli kartı [13]

Ampirik eşitlikler

Killerin şişme potansiyelinin belirlenmesine yönelik çeşitli ampirik yaklaşımlar da geliştirilmiştir. Bunlardan birkaç tanesine yer verilecektir. Seed, standart proktor sıkılığında ve optimum su muhtevasında sıkıştırılan, 6.9 kPa sürşarj yükü altında şişmeye bırakılan killerin şişme potansiyelinin belirlenmesinde Eş. 4.2' yi ve Seed ayrıca, Woodward ve Ludgren ile Eş. 4.3' deki basit ampirik formülü vermiştir. Eş. 4.2 yalnızca %8 ~ %65 arasında kil içeren zeminler için geçerli olduğu ve hesaplanan değerin %33' lük bir hata payına sahip olduğu ifade edilmiştir [7,8].

$$S = 3.6 \cdot 10^{-5} \cdot A^{2.44} \cdot C^{3.44} \quad (4.2)$$

$$S = 3.6 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot PI^{2.44} \quad (4.3)$$

Burada,

S - Şişme yüzdesi (%),

A - Aktivite,

C - Kil yüzdesi (%),

M - Sabit, (Doğal zeminler için 60, yapay zeminler için 100)

PI - Plastisite indisidir (%).

Chen [2], kuru birim hacim ağırlıkları $15,7 \sim 17,2 \text{ kN/m}^3$ ve su muhtevaları 15-20% aralığında değişen, örselenmemiş zemin numunelerinin 6,9 kPa sürşarj altındaki şişme yüzdeleri için aşağıdaki eşitliği vermiştir.

$$S = 0.2558 \cdot e^{0.0838 \cdot PI} \quad (4.4)$$

Burada,

S - Şişme yüzdesi (%),

PI - Plastisite indisidir (%).

Vijayvergiya ve Ghazzaly [39] likit limit ve su muhtevasına bağılı olarak killi zeminlerin şişme yüzdesinin tahmin edilmesi için Eş. 4.5' i vermişlerdir.

$$\log S = \frac{1}{12} (0.44 \cdot LL - w_o + 5.5) \quad (4.5)$$

Burada,

S - Şişme yüzdesi (%),

LL - Likit limit (%),

w_o - Başlangıç su muhtevasıdır (%).

Nayak ve Christensen [29] sıkıştırılmış zeminler için, plastisite indisi, kil yüzdesi ve başlangıç su muhtevasına bağılı olarak şişme yüzdesinin tahmin edilmesi için Eş. 4.6' yı vermişlerdir.

$$S = 2.29 \cdot 10^{-2} \cdot PI^{1.45} \frac{C}{w_o} + 6.38 \quad (4.6)$$

Burada,

S - Şişme yüzdesi (%),

PI - Plastisite indisi (%),

C - Kil yüzdesi (%),

w_o - Başlangıç su muhtevasıdır (%).

Komornik ve David [10, 30] şişme basıncının örselenmemiş zeminler için, likit limit, kuru birim hacim ağırlık ve başlangıç su muhtevasına bağılı olarak tahmin edilmesi için Eş. 4. 7' yi vermişlerdir.

$$\log P_s = -2.132 + 0.0208 \cdot LL + 0.000665 \cdot \gamma_k - 0.0269 \cdot w_o \quad (4.7)$$

Burada,

P_s - Şişme basıncı (kN/m^2),

LL - Likit limit (%),

γ_k - Kuru birim hacim ağırlık (kN/m^3).

W_o - Başlangıç su muhtevasıdır (%).

Nayak ve Christensen [29] sıkıştırılmış zeminler için şişme basıncının, plastisite indisi, kil yüzdesi ve başlangıç su muhtevasına bağlı olarak tahmin edilmesi için Eş. 4.8' i vermişlerdir.

$$P_s = (3.58 \cdot 10^{-2}) \cdot PI^{1.12} \cdot \frac{C^2}{w_o^2} + 3.79 \quad (4.8)$$

Burada,

P_s - Şişme basıncı (psi), ($1 \text{ psi} \cong 6.9 \text{ kPa}$)

PI - Plastisite indisi (%),

C - Kil yüzdesi (%),

W_o - Başlangıç su muhtevasıdır (%).

Dolaylı yöntemlerle ilgili yukarıda bahsedilen çalışmalar tamamlandığında, araştırma konusu olan bölgedeki killerin şişmesi hakkında ön bilgi verebilmektedir. Bu yöntemleri kullanılarak kesin yargıya varmak yanlış olur. Bu yöntemler, tavsiye eden araştırmacıların tecrübe ve çalışmaları sonucu önerdikleri yaklaşık teorileridir.

4.2.2. Şişen killerin doğrudan yöntemlere göre sınıflandırılması

Doğrudan yöntemler, zemin şişmesinin gerçek fiziksel ölçümleri olup, deney sonuçlarına bağlı olarak zeminin şişme potansiyelinin belirlenmesini ifade etmektedir ve bu sebeptendir ki şişme potansiyelinin belirlenmesinde, nicel yöntemlerin kullanılması çok daha uygun olacaktır [1].

Şişme davranışı ve şişme parametrelerinin doğrudan (nicel) belirlenmesi için geliştirilen birkaç deney yöntemi mevcut ise de klasik odömetre deney düzeneği örselenmiş ya da örselenmemiş zemin numunelerin şişme potansiyelinin belirlenmesinde kullanılabilir.

Odömetre Deney Metodu

Şişme potansiyelinin belirlenmesine yönelik alternatif nitelikte ASTM D 4546-03' de üç farklı odömetre deney metodu (A, B ve C) önerilmiştir [47]. Bu üç metodun hepsinde zemin numunesinin yanal deplasmanının sınırlandırılması ve yalnızca eksenel yükleme yapılmaktadır. Burada, sadece tez çalışmasında kullanılan odömetre deney metodu (A) anlatılmıştır.

Metot A

Bu yöntemde zemin numunesi, sadece üzerine konacak poroz taş ve yükleme plakasının oluşturduğu en az 1 kPa sürşarj yükü altında suya doyurularak şişme tamamlanıncaya kadar beklenir. Sonra numunenin şişme öncesindeki boşluk oranı (numunenin başlangıç yüksekliği) elde edilinceye kadar klasik odömetre deneyindeki yük kademeleri altında numune yüklenir. Her yük artırımını öncesinde, numunenin uygulanan yük altından tamamıyla konsolide olmasına izin verilir.

Bir boyutlu odömetre koşullarında, numunenin kesit alanı sabit tutulduğundan dolayı serbest şişme yüzdesinin hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır [31].

$$S = \frac{H_1 - H_0}{H_0} \times 100 \quad (4.9)$$

Burada,

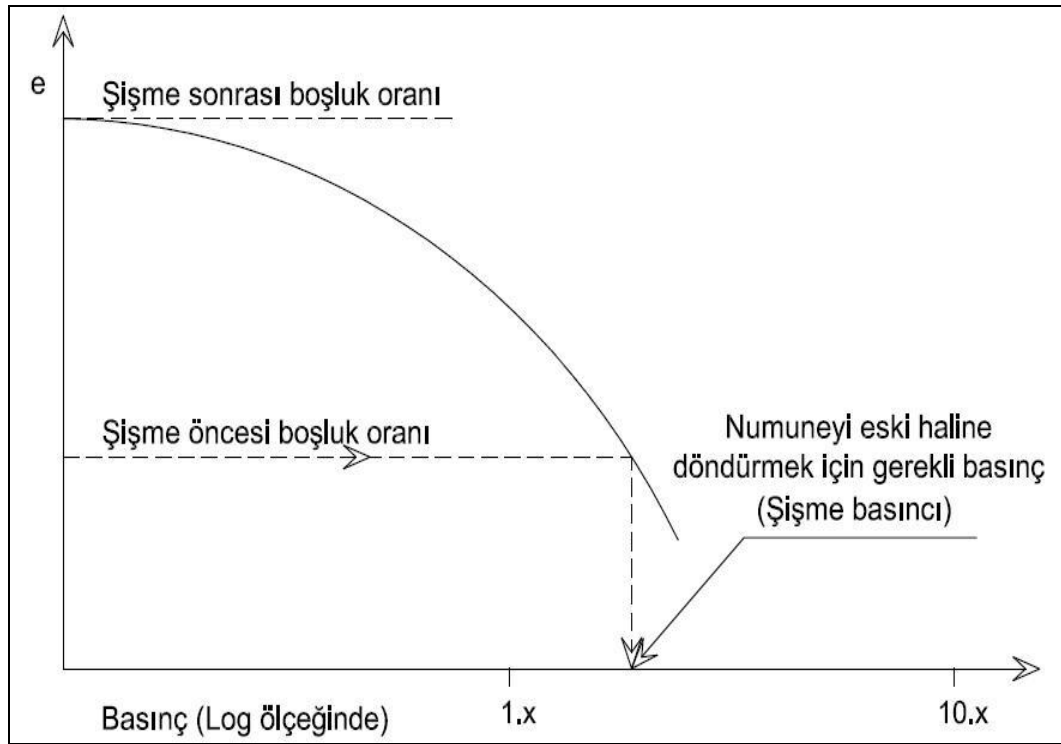
S - Serbest şişme yüzdesi ($\cong$ 1 kPa sürşarj yükü altında),

H_0 - Numunenin başlangıç yüksekliği,

H_1 - Şişme sonrasındaki numune yüksekliğidir.

ASTM şişme basıncını (Şekil 4.8), şişme tamamlandıktan sonra numuneyi eski haline (boşluk oranı, yükseklik) getirecek basınç olarak tanımlamıştır [31].

Bu yöntemin avantajı ise tek numune ile yalnızca şişme potansiyeli değil zeminin konsolidasyon parametreleri hesaplanabilmektedir.



Şekil 4.8. Odometre deneyindeki serbest şişme ve şişme basıncı [31]

4.3. Geçmişte Yapılmış Çalışmalar

Ülkemizde, şişen killerin bölgesel olarak tespit edilmesini amaçlayan çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Köylü [32], Yenikent (Ankara) yerleşim alanı killерinin şişme potansiyelinin belirlenmesine yönelik bir çalışma yapmıştır. Yüksek şişme yüzdesi ve şişme basınçları elde etmiştir.

Uran [33], Yeniçağa (Bolu) killerinin şişme potansiyelini irdeleyerek çevresel etkilerini araştırmıştır. Yüksek şişme yüzdesi ve şişme basınçları elde etmiştir.

Angın [7], şişen killerin mineralojik yapılarının hacim değiştirme etkilerini incelemiştir.

Durgunoğlu [34], (Tarsus-Pozantı) ayrımı-Adana-Toprakkale-Gaziantep otoyolu projesi çerçevesinde rastlanan, yöreye özgü aşırı konsolide kil-kil taşlarının şişme özelliklerini, taban zemininin plastisite indisinin bir fonksiyonu olarak incelemiştir. Uçucu kül ve kireç stabilizasyonu ile zemin iyileştirilmesi uygulanmıştır.

Taşkıran [35], Diyarbakır ili, Kayapınar-Yeniköy-Bağcılar yöresi kilinin şişme potansiyelini incelemiştir. Yüksek şişme yüzdesi ve şişme basınçları elde etmiştir.

Gökçe [36], Ankara kili parametrelerinin yerel değişimi ve şişme potansiyelini inceleyerek yorumlamıştır.

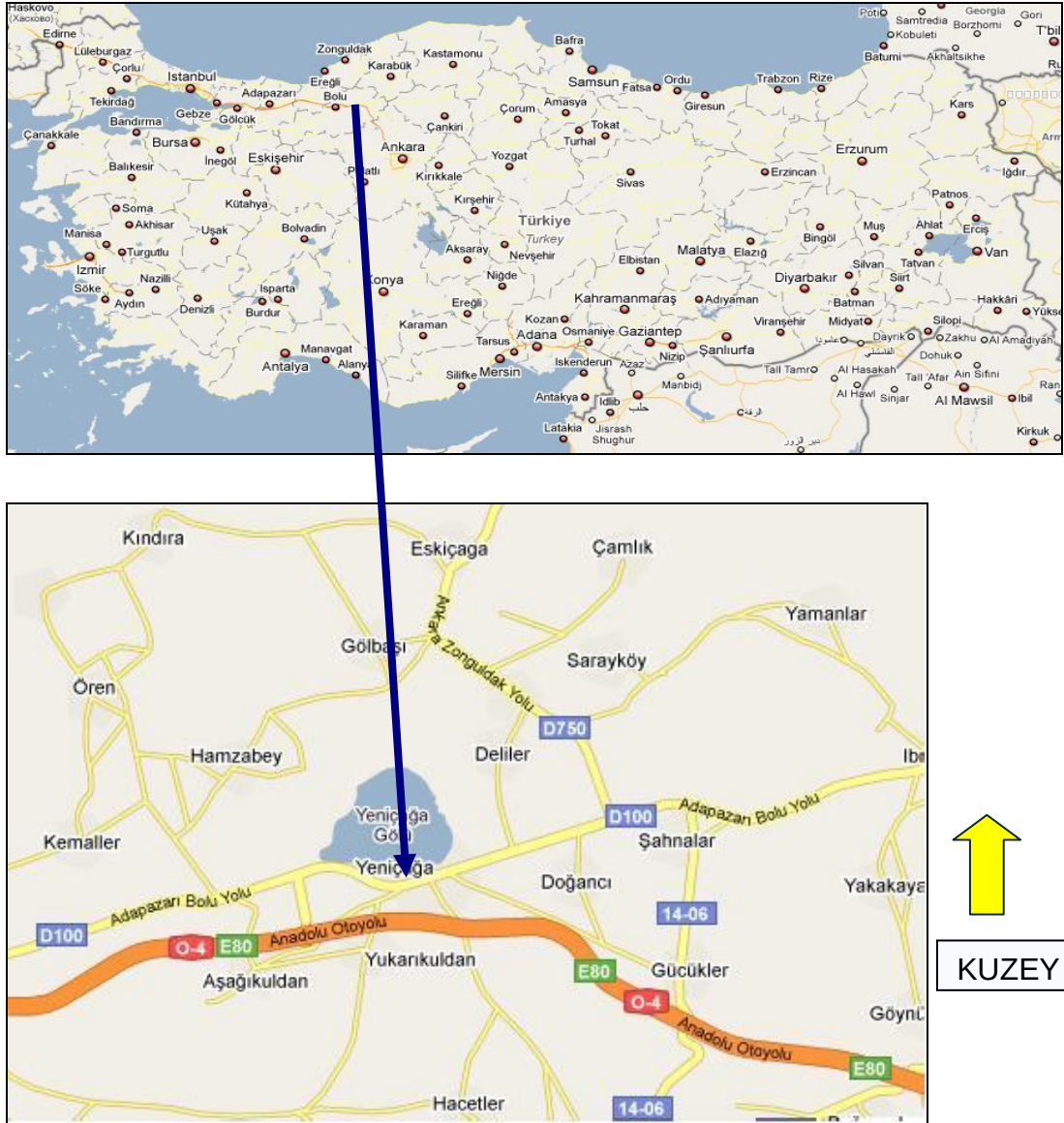
Güngör [37], Bursa yöresi şişebilen kil zeminlerin yol dolgularında kullanılması amacıyla uçucu kül ile ıslahını incelemiştir. %10 civarı uçucu kül katkısı ile optimum sıkıştırma elde etmiştir.

Öztürk [38], Gölbaşı (Ankara) yerleşim alanı killerin, şişme potansiyelinin belirlenmesine yönelik çalışma yapmıştır. İncelediği bölgeye özgü şişen killer için %7 oranında sönmüş kireç uygulanmasını tavsiye etmiştir.

5. İNCELEME ALANININ TANITILMASI

5.1. Genel Bilgiler

Bolu ili Yeniçağa ilçesi, İstanbul ve Ankara arasında yer alır. Yeniçağa, Türkiye'nin Batı Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Bolu ilinin ilçesidir. D100 Karayolu ilçe merkezinden, TEM Otoyolu güney bitişiğinden geçer. Batısında yer alan Bolu ili 37 km. mesafededir. Yeniçağa İlçesi, küçük bir ovanın içinde bulunan Yeniçağa Gölü ile yan yanadır [39].



Harita 5.1. Bolu ili Yeniçağa ilçesi inceleme alanı yer bulduru haritası

5.2. İnceleme Alanının Jeolojisi

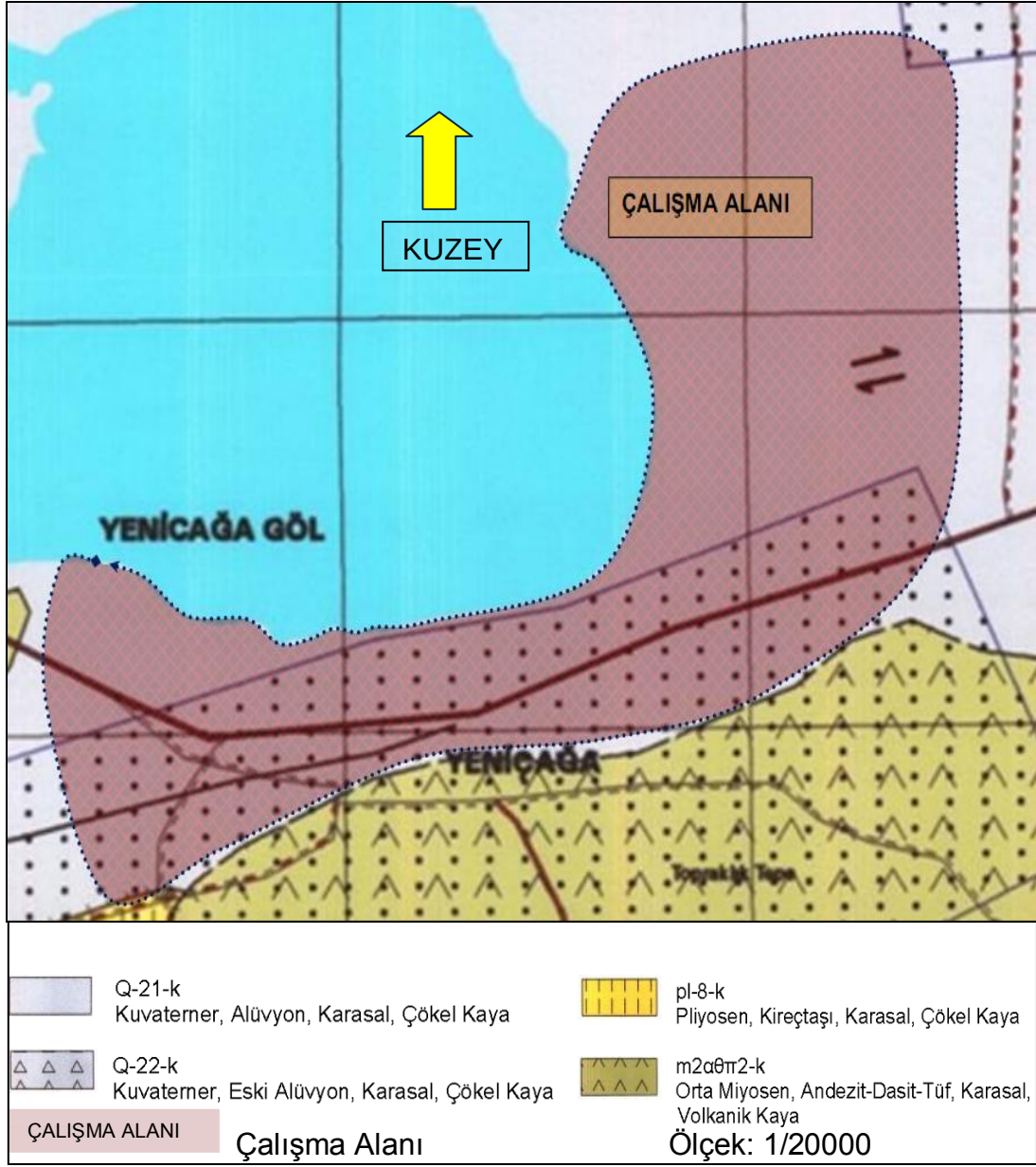
Yeniçağa gölü ve yerleşim alanı ile yakın çevresindeki toprak zeminlerin büyük bir bölümünü oluşturan Üst Kuvaterner Alüvyonları (Qal), Kuvaterner öncesinde oluşmuş çeşitli kayaçların aşındırma yüzeyinde uyumsuz olarak yer alan, kaba taneli yamaç döküntüleri ile havzanın orta kesimlerinde depolanan ince taneli tortullardan oluşmaktadır[40].

Yamaç kenarındaki tortullar, akarsuların enerjilerinin azaldığı ya da iri taneli alüvyal yelpazeleri içermektedir. Farklı büyüklüklerdeki alüvyal yelpaze serisinin havzayı sınırlandıran faylara yakın bir konumda geliştiği gözlenmektedir. Ayrıca alüvyal yelpazelerin eğimlerinde de havzayı sınırlandıran fayların güncel aktivitesine bağlı olarak ani değişimler meydana geldiği de belirlenmiştir [40].

Havzanın orta kesimlerinde depolanan tortullar ise havza tabanı boyunca geniş bir alanda yayılım gösterirken, gevşek, ince taneli, organik maddece zengin silt, turba, kil, çamur, kum ve çakıllardan oluşmaktadır. Bu malzeme çoğunlukla menderesli akarsu ve bataklık çökelleridir [40].

Üst Kuvaterner çökeltilerinin içinde yer alan ve genellikle koyu gri ve siyahımsı bir renkte olan turba ile ilgili çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalara göre turbanın zirai açıdan son derece elverişli özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir.

Serdaroğlu [41] araştırmasında, Yeniçağa gölünün kuzey ve batı kısımlarında geniş bir alanda yayılım gösteren bu turbalığın kalınlığının, 0-15 metre arasında değiştiğini, gölün doğu kısımlarında ise bu kalınlığın daha da arttığını belirtmektedir [41](Harita 5.2).



Harita 5.2. Yeniçağa İlçesi ve çevresi jeoloji haritası, MTA yayınları [45]

5.3. Depremsellik

Kuzeyde Asya-Avrupa levhası ile güneyde Anadolu levhacığını birbirinden ayıran Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ), yaklaşık uzunluğu 1200 km. olan doğrultu atımlı bir fay sistemi olup ülkemizin en önemli tektonik yapılarından biridir. Bolu ve Yeniçağa havzaları bu fay üzerinde bulunmaktadır [42].

6. ARAZİ VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Bolu ili Yeniçağa ilçesinde ve yakın çevresinde şişen killerin yapılarla vereceği zararları önlemek için alınacak tedbirlerin tespitine yönelik bu çalışma kapsamında bölgenin muhtelif yerlerinden örnekler alınıp, çevrede oluşmuş mevcut şişme hasarları tespit edilerek incelenmiştir.

6.1. Arazi Çalışmaları

Yeniçağa ilçesinin kuzeyindeki yerleşim alanından inceleme alanını temsil edecek en iyi noktaları seçerek muhtelif noktalardan, laboratuvar deneyleri yapılmak üzere, örselenmiş (D) zemin numuneleri alınmıştır. Çalışma alanında ayrıca, hafif yapılardaki (yol, kaldırım, bahçe duvarı, az katlı binalar vb.) mevcut hasarlara ilişkin incelemelerde bulunulmuş ve zeminin şişme özelliğinin bu duruma etkisi incelenmiştir.

6.1.1 Zemin numunelerinin alınması

Resim 6.1.'de görülen 5 ayrı lokasyondan, JCB ile araştırma çukurları açılmıştır. Açılan bu çukurlardan (Resim 6.2.), birimi temsil eden numuneler alınmıştır. İnce cidarlı silindirik shelby tüpleri (86 mm çapında) ile örselenmemiş numuneler alınmıştır. Shelby tüpleri, zemini örselemeyecek şekilde hidrolik baskı yoluyla zemin içerisine itilmiştir. Numune tüpün içine tamamen dolduktan sonra kepçenin, tüpün içinde bulunduğu zemin kütlesini tek seferde çukurdan çıkarmasıyla numune alımı gerçekleştirilmiştir. Tüplerin her iki ağzı da parafinlenip çift kat poşet ile sarılmasıyla korunmaya alınmıştır. Shelby tüplerinin zemin içerisinden alınması esnasında, kepçe kolu ile beraberinde çıkartılan tüpün çevresindeki aynı zemin malzemesinden de yaklaşık 30 kg örselenmiş zemin numunesi alınmıştır.

İnceleme alanında, temel betonu yeni dökülmüş inşaat halindeki binaların temel derinliği incelenmiş ve temel alt kotlarının genelde çok derinde

olmadığı tespiti yapılmıştır. Binalarda bodrum kat yapılmamıştır. Bu nedenle, zemin üst yüzeyinden itibaren 2,0 – 2,5 m. derinlikten numune alınmaya özen gösterilmiştir. Yer altı suyuna 3,0 metrede rastlanılmıştır.



Resim 6.1. İnceleme alanı ve araştırma çukurlarının yerleri



Resim 6.2. AÇ-3 Araştırma çukurunun açılması

Çizelge 6.1. Araştırma çukurlarının koordinatları

Araştırma Çukuru No (Numune Adı)	N (y) Koordinatı	E (x) Koordinatı
AÇ-1	4514194	418679
AÇ-2	4514952	418592
AÇ-3	4514034	416910
AÇ-4	4514291	419585
AÇ-5	4514581	418664

6.1.2. Mevcut yapılarda gözlenen hasarlar

Bölgede yapılan incelemelerimizde şişme olayı kendisini, binalarda çatlaklar olarak gösterirken, yol ve parklarda yarık ve kırıklar şeklinde göstermektedir.

İnceleme alanındaki hasarların çoğu, bina duvarlarında ve pencere kenarlarında gözlenmektedir. Pencere kenarları ve duvar üzerlerinde diyagonal şekilde görülen çatlaklar, şişme hareketinden dolayı oluşan yenilmenin tipik ve önemli bir göstergesidir. Bazı yapılarda çatlaklar sadece bir iki duvarda ya da yapının tam ortasında gözlenmiştir. Bu olay bölgede farklı kabarmaların olduğunu göstermektedir. Ayrıca bahçe sulama, tarım faaliyetleri, hayvancılık, su ve kanalizasyon hatlarındaki kaçaklar ve bölgenin (göl tarafı) yatay bir yüzeyde oluşunun su akımını engellemesinden dolayı suyun belirli yerlerde birikmesi ve zeminin doygun hale gelerek farklı şişmeye sebep olduğu gözlenmiştir.

6.2. Laboratuvar Çalışmaları

İnceleme alanından alınan zemin numuneleri, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Uygulamalı Jeoloji ve Kaya Mekaniği laboratuvarına getirilerek tanımlama ve şişme potansiyeli deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyleri iki ayrı grupta toplayabiliriz.

6.2.1. Yeniçağa kilinin indeks zellikleri

Yeniçağa kilinin indeks zellikleri ASTM D 4546-03 standardına uygun olarak incelenmiştir [31].

Elde edilen deney sonuçları ve değerlendirmeler Bölüm 7, Bölüm 8 ve Bölüm 9’ da verilmiştir.

6.2.2. Yeniçağa kilinin şişme yüzdesi, basıncı ve serbest basınç dayanımları

Yeniçağa kilinin şişme yüzdesi ve basıncı, konsolidasyon (odömetre) deneyleri ile incelenmiştir. Standart proktor deneyi ile elde edilen optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığında numune hazırlanarak, %1, %3, %5, %7 ve %9 oranlarında sönmüş kireç ile %5 ve %10 oranlarında uçucu kül katılarak proktor ve odömetre deneyleri yapılmıştır. Hazırlanan yeni numunelerin dayanımlarındaki değişiklik için serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Kireç katkı maddesi serbest basınç dayanımı deneyi için %5 ve %10 oranlarında hazırlanmıştır.

Yapılan deneyler:

- Zeminde kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası bağıntısının 2,5 kg tokmakla elde edilmesi (standart proktor deneyi).
- şişme potansiyelini belirlemeye yönelik, konsolidasyon (odömetre) deney düzeneği kullanılarak yapılan deneyler.
- Serbest basınç deneyleri: 1. Gün, 14. Gün ve 28. Gün

7. YENİÇAĞA KİLİNİN ŞİŞME YÜZDESİ VE BASINCININ BULUNARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

7.1.Mineralojik Değerlendirmeler

Yeniçağa kilinin şişme potansiyeli üzerinde araştırma yapan Uran [33], killerin mineralojisini incelemiştir. Bu amaçla bölgeden aldığı numunelere M.T. A. Genel Müdürlüğü Laboratuvarında RİGAKU GEİGERFLEX marka X-ray cihazı kullanılarak, X ışınları kırınım analizleri yaptırmıştır. Örnekleri değerlendirmesinde ASTM index kartlarını kullanmıştır. Örneklerin içerdiği mineralleri, Smektit (montmorillonit), Kuvars, Kalsit, Feldispat, Kristobalit-Tridimit ve Kaolinit olarak vermiştir [33].

Uran [33] tarafından yapılan mineralojik analizler sonucunda ortaya çıkan kil mineralleri ile diğer mineraller dikkate alındığında, kaynak kayanın volkanik kökenli olduğu görülmüştür.

Yeniçağa ilçesinin içinden geçen Ankara-İstanbul D100 karayolunun güneyinde kalan yerleşim alanından alınan örneklerde, önemli oranda smektit “montmorillonit” ve karışık tabakalı kil mineralleri yer almaktadır [33]. Buna rağmen Uran [33], kaolinit mineralinin söz konusu alanda az oranda yer almasını, bu alanda killeşmenin henüz tamamlanmamış olduğu şeklinde yorumlamıştır [33].

7.2. Yeniçağa Kilinin Şişme Potansiyelinin Sınıflandırılması

Şişme potansiyeli üzerinde yapılan çalışmalarda, Atterberg limitleri, şişme basıncı, şişme yüzdesi ve kil tanelerinin boyutu önem kazanmaktadır.

Bölüm 4’te anlatılan şişen killerin tanımlanması ve sınıflandırılması konusu incelendiğinde, birçok araştırmacının çeşitli yöntemler geliştirdiği görülecektir. Çalışmamızda, bu yöntemlerin tümünü dikkate alarak numunelere, gerekli

verileri elde edeceğimiz deneyleri uyguladık. Bu deneylerin sonuçları Çizelge 7.1' de verilmiştir.

Geoteknik araştırmacılarının geliştirdiği yöntemlere göre Yeniçağa kilinin şişme yüzdesi ve şişme basıncının çizelge 7.1 kullanılarak tanımlanması ve sınıflandırılması aşağıda sunulmuştur.

Skempton, killeri aktivite sayılarına göre, inaktif ($A < 0.75$), normal aktif ($0.75 < A < 1.25$) ve aktif ($A > 1.25$) olmak üzere üç gruba ayırmayı önermiştir. Bu sınıflandırmada aktif killer en yüksek şişme potansiyeline sahiptirler [6]. İnceleme alanındaki killerin tamamı normal aktif kil grubuna girmektedir.

Çizelge 4.1' de Chen tarafından önerilen korelasyona göre, inceleme alanındaki killerin 200 nolu elekten geçen malzeme oranı (% 95,78) ve likit limit değerleri ($LL = \% 78,64$) dikkate alındığında, muhtemel şişmenin %10'dan ve şişme basıncının 1000 kPa'dan büyük, şişme potansiyelinin “*çok yüksek*” olduğu görülmektedir [2].

Çizelge 4.2' de Chen[2] tarafından önerilen korelasyona göre, inceleme alanındaki killerin ortalama plastisite indisi değeri ($PI = \% 52,46 > 35$) dikkate alındığında, şişme potansiyelinin “*çok yüksek*” olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.3' de Wayne ve Osman tarafından önerilen korelasyona göre, inceleme alanındaki killerin ortalama şişme yüzdesi değeri (%10) dikkate alındığında, şişme potansiyelinin “*yüksek*” olduğu görülmektedir [22].

Çizelge 4.4' de Altmeyer tarafından önerilen korelasyona göre, inceleme alanındaki killerin ortalama büzülme limiti (%8,72) dikkate alındığında, şişme derecesinin “*kritik*” olduğu görülmektedir [23].

Çizelge 7.1. Yeniçağa kilinin indeks özellikleri

Araştırma Çukuru	Derinlik (m)	w_n (%)	γ_n (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	G_s	Elek Analizi (%)		Kolloid (%) (<0,001mm)	Kil (%)	Kıvam Limitleri (%)			Aktivite	Zemin Sınıfı
						# 4 kalan	# 200 geçen			LL	PL	PI		
AÇ-1	2,0-2,5	24,18	1,721	1,286	2,725	0,04	99,23	66,15	76,18	94,2	29,1	65,1	0,85	CH
AÇ-2	2,0-2,5	21,46	1,728	1,293	2,751	0,72	94,04	55,26	60,37	74,8	26,1	48,7	0,81	CH
AÇ-3	2,0-2,5	25,08	1,857	1,454	2,731	0,24	94,76	50,71	57,11	76,1	28,2	47,9	0,84	CH
AÇ-4	2,0-2,5	26,70	1,781	1,385	2,733	0,24	92,91	50,70	57,09	68,7	23,8	44,9	0,79	CH
AÇ-5	2,0-2,5	27,93	1,852	1,455	2,710	0	97,94	56,47	62,62	79,4	23,7	55,7	0,89	CH

Çizelge 4.5' de Holtz ve Gibbs tarafından önerilen korelasyona göre, inceleme alanındaki killerin kolloid içeriği ($55,86 > 28$) ve plastisite indisi ($PI = \% 52,46$) dikkate alındığında, muhtemel şişme yüzdesinin $\%30$ 'dan fazla olacağı ve şişme derecesinin “çok yüksek” olduğu görülmektedir [25].

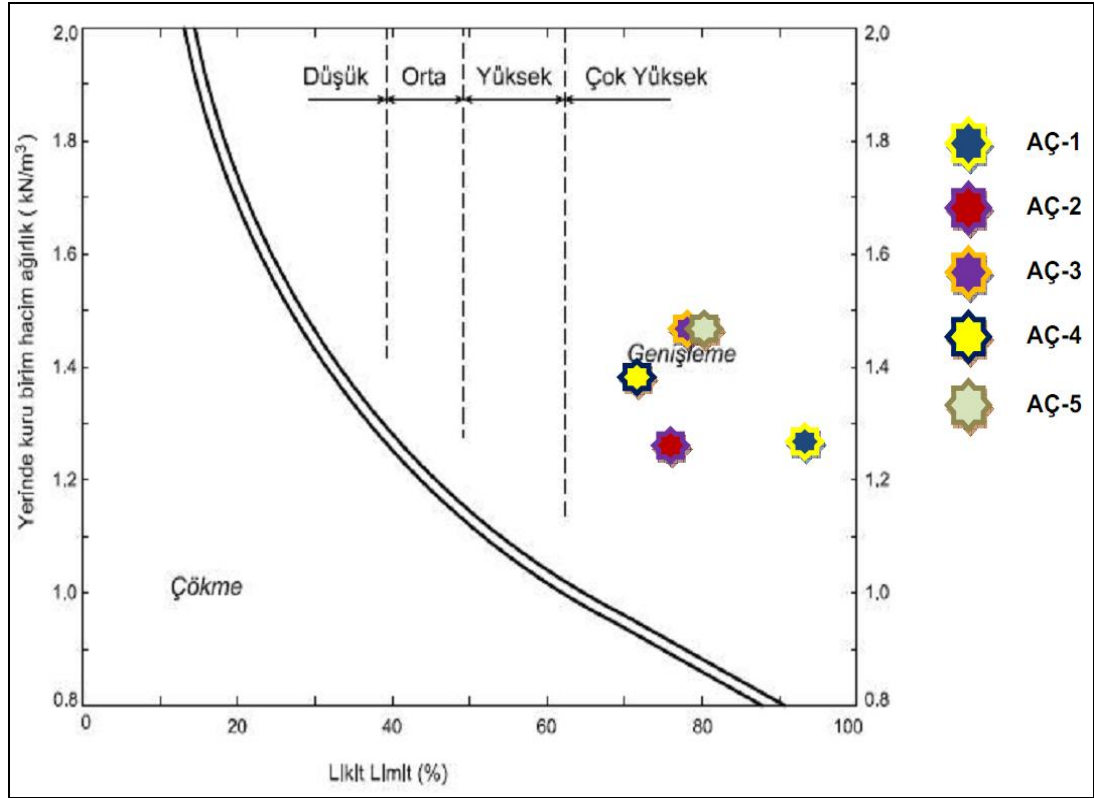
Çizelge 4.6' da Skempton tarafından önerilen korelasyona göre, inceleme alanındaki killerin likit limit ($LL = \%78,64$) ve plastisite indisi ($PI = \%52,46$) dikkate alındığında, potansiyel şişme yüzdesinin $\% 1,5$ 'ten fazla olacağı ve şişme derecesinin “yüksek” olduğu görülmektedir [6].

Şekil 4.1' de Holtz ve Gibbs tarafından önerilen abağa göre, inceleme alanındaki killerin büzülme limiti ($SL = \%8,72$), plastisite indisi ($PI = \%52,46$) ve kolloid içeriği ($55,86$) dikkate alındığında, şişme potansiyelinin “çok yüksek” olduğu görülmektedir [25].

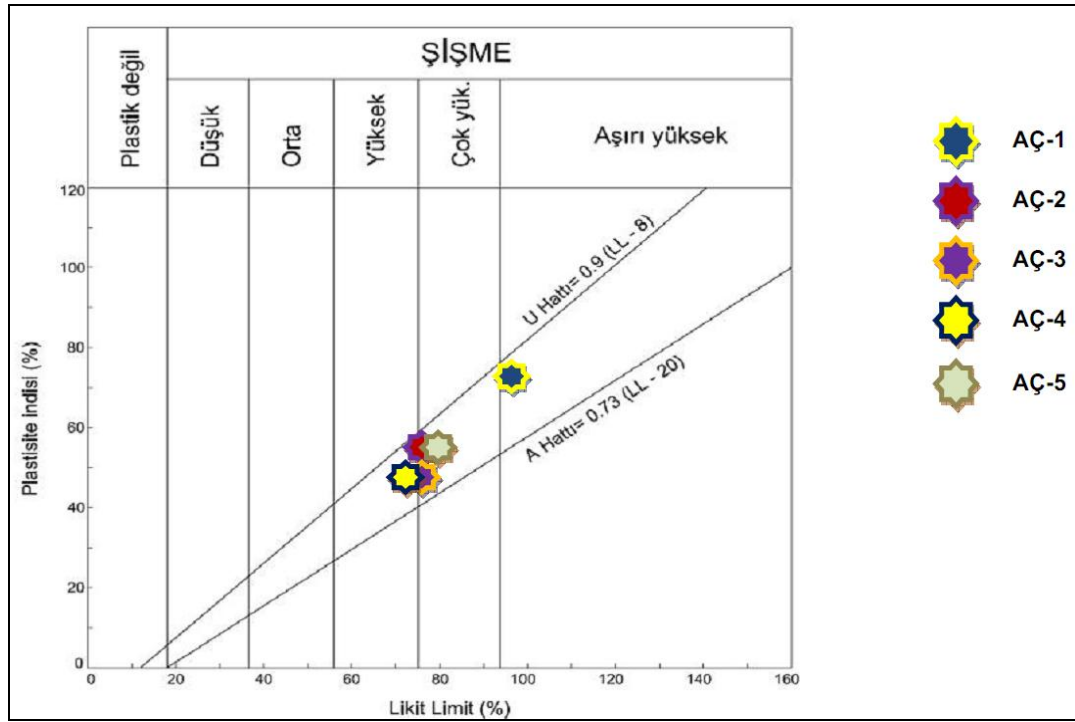
Şekil 4.2' de Vijayvergiya ve Ghazzaly tarafından önerilen abağa göre, inceleme alanındaki killerin likit limit ($LL = \%78,64$), yerinde kuru birim hacim ağırlık ($\gamma_d = 13,74 \text{ kN/m}^3$) ve doğal su muhtevası ($W_n = \%25$) değerleri dikkate alındığında, şişme yüzdesinin yaklaşık olarak $\%10$ olduğu görülmektedir [24].

Şekil 4.4' de Holtz ve Gibbs tarafından önerilen abağa göre, inceleme alanındaki killerin likit limit ($LL = \%78,64$) ve yerinde kuru birim hacim ağırlık ($\gamma_d = 13,74 \text{ kN/m}^3$) değerleri dikkate alındığında, inceleme alanı killерinin “çok yüksek” oranda şişebilen zeminler sınıfına girdiği görülmektedir [25]. (Şekil 7.1)

Şekil 4.5.' da Dakshanamurthy ve Raman (1973) tarafından önerilen abağa göre, inceleme alanındaki killerin likit limit ($LL = \%78,64$) ve plastisite indisi ($PI = \%52,46$) değerleri dikkate alındığında, inceleme alanı killерinin “çok yüksek” oranda şişebilen zeminler sınıfına girdiği görülmektedir [26]. (Şekil 7.2)

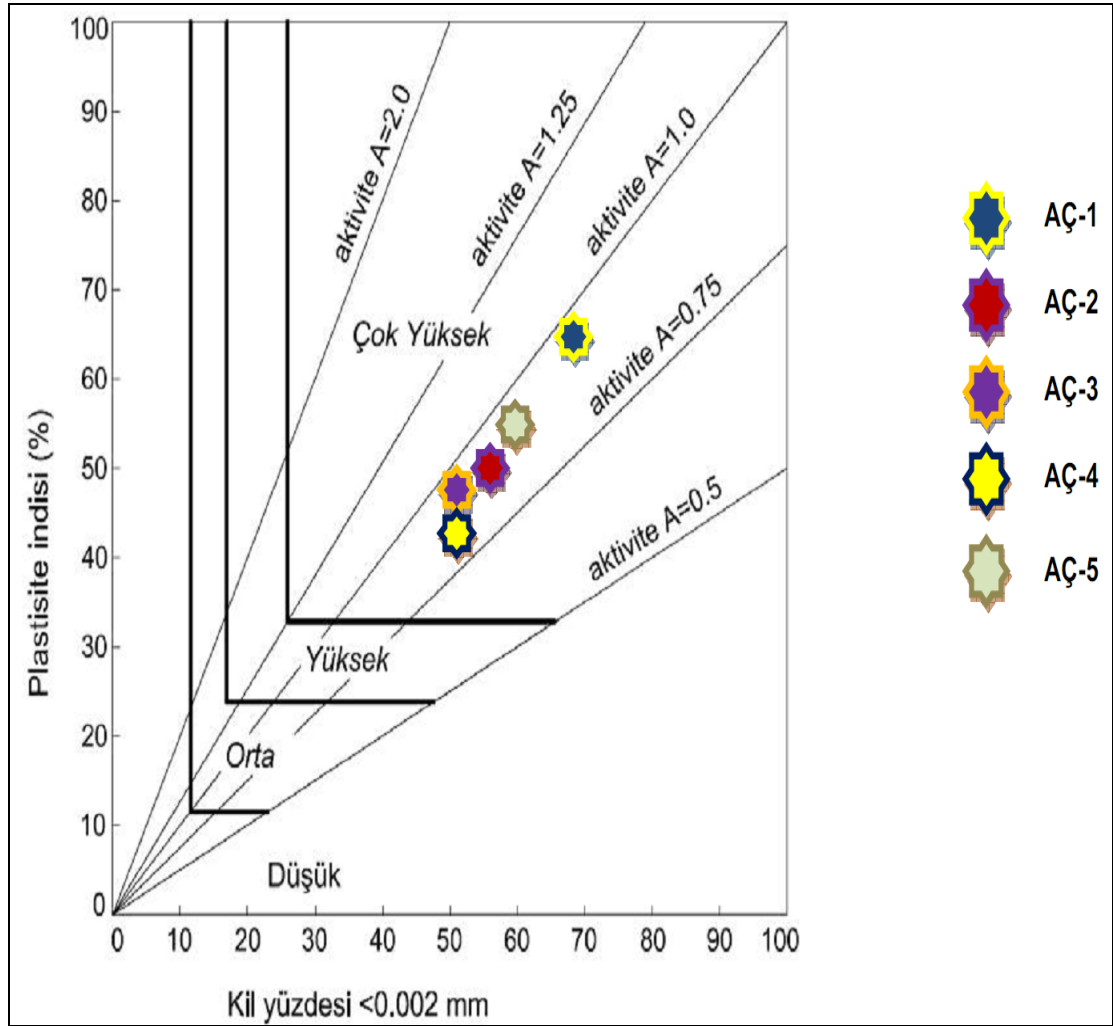


Şekil 7.1. Holtz ve Gibbs tarafından önerilen abak



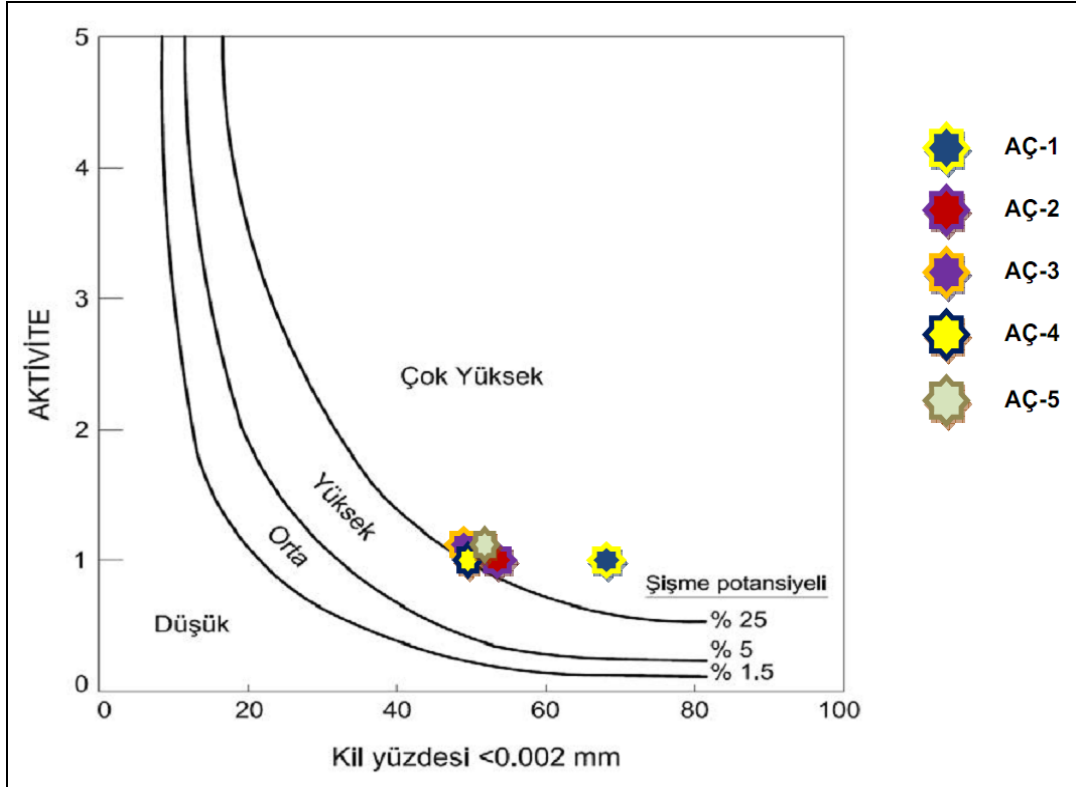
Şekil 7.2. Dakshanamurthy ve Raman (1973) tarafından önerilen abak

Şekil 4.6' de Van Der Merwe tarafından önerilen abağa göre, inceleme alanındaki killerin aktivite, plastisite indisi ve kil içeriği dikkate alındığında, şişme potansiyelinin “çok yüksek” olduğu görülmektedir [27]. (Şekil 7.3)



Şekil 7.3 Van Der Merwe (1964) tarafından önerilen abak

Şekil 4.7' de Seed, Woodward ve Lungreen (1962) tarafından önerilen abağa göre, inceleme alanındaki killerin aktivite ve kil içeriği dikkate alındığında, şişme potansiyelinin “çok yüksek” ile gösterilen sınırlar içerisinde kaldığı görülmektedir [13]. (Şekil 7.4)



Şekil 7.4 Seed, Woodward ve Lungreen (1962) tarafından önerilen abak

7.3. Şişme Yüzdesi ve Şişme Basıncının Sayısal Hesaplamaları

Eş. 4.2' de Seed ve Chan [12] tarafından verilen formülasyona göre hesap edilecek olursa, Yeniçağa kilinin şişme yüzdesi %35,36 olarak bulunmaktadır.

Eş. 4.3' de Seed, Woodward ve Lungreen [13] tarafından verilen formülasyona göre hesap edilecek olursa, Yeniçağa kilinin şişme yüzdesi %33,95 olarak bulunmaktadır.

Eş. 4.4' de Chen [2] tarafından verilen formülasyonda, yerinde kuru birim hacim ağırlık ve doğal su muhtevasının gerekli aralıklarda olmayışı nedeniyle kullanılamamıştır.

Eş. 4.5' de Vijayvergiya ve Ghazzaly [24] tarafından verilen formülasyona göre hesap edilecek olursa, Yeniçağa kilinin şişme yüzdesi %17,89 olarak hesaplanmaktadır.

Eş. 4.6' da Nayak ve Christensen [29] tarafından verilen formülasyona göre hesap edilecek olursa, Yeniçağa kilinin şişme yüzdesi %24,23 olarak hesaplanmaktadır.

Eş. 4.7' de Snethen tarafından verilen formülasyona göre hesap edilecek olursa, Yeniçağa kilinin doğal zeminler için şişme basıncı $54,28 \text{ kN/m}^2$ olarak hesaplanmaktadır [10].

Eş. 4.8' de Nayak ve Christensen [29] tarafından verilen formülasyona göre hesap edilecek olursa, Yeniçağa kilinin sıkıştırılmış olması durumu için şişme basıncı, $156,41 \text{ kN/m}^2$ olarak hesaplanmaktadır [29].

7.4. Deneysel Yöntemlerle Şişme Yüzdesi ve Basıncı

Yeniçağa kilinin şişme yüzdesi ve basınç değerlerini elde etmek için *ASTM D 4546 - Metot A* standardına uygun konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Şişme deneylerini yapabilmek için, hidrolik krikoyardıımıyla, standart çap ve yükseklikteki konsolidasyon ringleri içerisine örselemeden deney numunesi alınmıştır. Bu işlem sırasında, parafinleri açılan numuneler deneye tabii tutulmuştur. Deneyler için sıra beklemesi gereken numunelerin, deneye tabii olanlarla beraber, gerekli ölçümleri yapılarak desikatörde korumaya alınmıştır. Böylelikle, bu numuneler doğal su içeriklerinde ve doğal birim hacim ağırlıklarında değişim olmadan, konsolidasyon deneyine hazır hale getirilmiştir. Deneylere başlarken, numunelere 1 kPa başlangıç sürşarj yükü uygulanmış ve standart şişme deneyleri yapılmıştır.

İnceleme alanından alınan tüm numuneler için şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerleri çizelge 7.2' de verilmiştir.

Çizelge 7.2. Yeniçağa kiline ait zemin sınıfı ve şişme parametreleri

Numune Adı	Şişme Yüzdesi (%)	Şişme Basıncı (kN/m ²)
AÇ-1	11,2	164,91
AÇ-2	10,0	234,96
AÇ-3	9,3	130,78
AÇ-4	10,8	113,98
AÇ-5	8,7	145,28

8. YENİÇAĞA KİLİNİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNE KİREÇ VE UÇUCU KÜLÜN ETKİSİ

Yeniçağa kilinin şişme potansiyelinin azaltılmasına yönelik olan bu çalışmada, katkı maddesi olarak, kireç ve uçucu kül kullanılmıştır. Farklı oranlarda kireç ile uçucu kül maddeleri katılarak, killerin geoteknik özelliklerindeki (şişme basıncı, şişme yüzdesi ve serbest basınç değerlerindeki), değişim miktarı incelenmiştir.

Kireç, doğada rahat bulunabilmesi, hemen her yerde bolca temin edilebilmesi ve diğer katkı maddelerine oranla daha ucuz olması nedeniyle tercih edilmektedir [44].

Uçucu kül, puzzolonik özellikleri nedeniyle birçok alanda kullanım sahası bulan bir termik santral fabrika atığıdır. Hidrate kireç ile reaksiyona girerek çimentolama etkisi gösterdiği bilinmektedir [46].

8.1. Sönmüş Kirecin Katkı Maddesi Olarak Kullanılması

Yeniçağa kilinin şişme potansiyelini önlemeye yönelik olarak bölgeden alınan numunelere çeşitli oranlarda kireç katılmıştır. Kireç karıştırılmış deney numunelerine, standart proktor, odömetre ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler ve elde edilen sonuçlar alt başlıklar halinde sunulmuştur [31].

8.1.1. Standart proktor deneyleri ve sonuçları

İnceleme alanından alınan zemin numuneleri, etüvde kurutulduktan sonra %1, %3, %5, %7 ve %9 oranlarında sönmüş kireç katılarak gerekli karşılımlar hazırlanmıştır. Her bir deney için 3 kg numune hazırlanmıştır. Örnek olarak %5 kireç katkılı zemin numunesinin karışımında, 3000 g kuru kil numunesine 158 g kireç katılarak 3158 gr homojen karışım elde edilmiştir.

İnceleme alanından alınan her numune için saf kil olarak proktor değerleri bulunup, karışımli numunelerin proktor değerleri ile karşılaştırılmıştır. Tüm bu standart proktor deneyleri ASTM D 4546-03 standardına [31] göre yapılmıştır. Etüvde kurutulan zemin malzemeleri, numune hazırlama tepsilerinde ufalanıp saf numune olarak ve çizelge 8.1'de gösterilen oranlarda kireç katılıp deneye hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan deney numunelerine değişik oranlarda su katılarak, homojen olarak karıştırılıp proktor kalıplarında sıkıştırılmıştır. Her bir deney numunesine ait $\gamma_d - w_{opt}$ (maksimum kuru birim hacim ağırlık - optimum su muhtevası) grafikleri Ek-2' de ve çizelge 8.2' de verilmiştir.

Çizelge 8.1 Standart proktor deneyi için numune hazırlanması

Standart Proktor Deneyi için Malzeme Karışım Miktarları					
Hedeflenen kireç yüzdeleri (%)	%1	%3	%5	%7	%9
Kil miktarı (g)	3000	3000	3000	3000	3000
Kireç miktarı (g)	30,3	92,7	158	225,7	296,6
Toplam miktar (g)	3030,3	3092,7	3158	3225,7	3296,6
Gerçekleşen kireç yüzdesi (%) (kontrol)	%1,0	%3,0	%5,0	%7,0	%9,0

Karışımlardan oluşan deney numunelerine, standart proktor deneyi uygulanarak her karışım oranındaki optimum su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlıkları bulunmuştur. Elde edilen bu sonuçlar, daha sonra yapılacak olan şişme yüzdesi, basıncı ve serbest basınç deneylerine temel oluşturacak numunelerin hazırlanmasında kullanılacaktır.

Çizelge 8.2. Standart proktor deney sonuçları

		AÇ1		AÇ2		AÇ3		AÇ4		AÇ5	
Katkı Maddesi	Katkı Oranı	γ_d (kN/m ³)	w_{opt} (%)	γ_d (kN/m ³)	w_{opt} (%)	γ_d (kN/m ³)	w_{opt} (%)	γ_d (kN/m ³)	w_{opt} (%)	γ_d (kN/m ³)	w_{opt} (%)
UÇK %	10	13,01	31,73	13,17	31,75	14,70	25,97	14,01	26,79	14,73	25,59
	5	12,95	32,78	13,04	32,65	14,65	26,87	13,95	27,67	14,65	26,43
Saf Numune	0	12,86	33,83	12,93	33,68	14,54	27,69	13,85	28,56	14,55	27,28
Kireç %	1	12,85	35,21	12,9	33,31	14,51	27,51	13,72	28,71	14,53	27,82
	3	12,79	36,14	12,74	34,61	14,37	28,93	13,62	30,58	14,31	28,3
	5	12,24	38,57	12,31	38,39	13,78	30,74	13,19	32,55	13,85	31,1
	7	11,84	41,33	11,95	41,27	13,34	33,68	12,81	34,55	13,63	34,22
	9	11,45	43,65	11,51	43,46	12,48	38,91	12,33	36,84	12,95	35,19

w_{opt} (%): Optimum su muhtevası

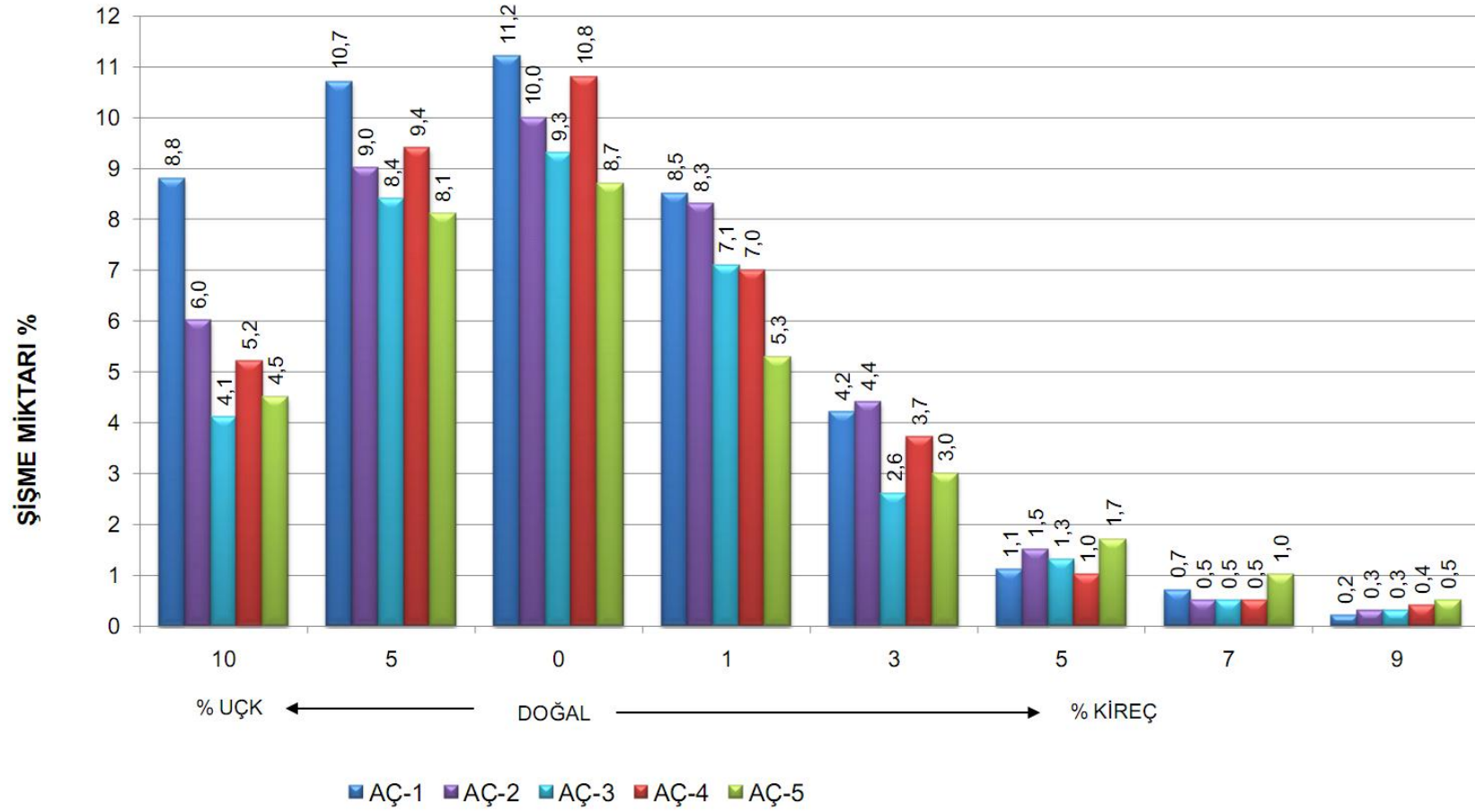
γ_d (kN/m³): Maksimum kuru birim hacim ağırlık

8.1.2.Şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleri ve sonuçları

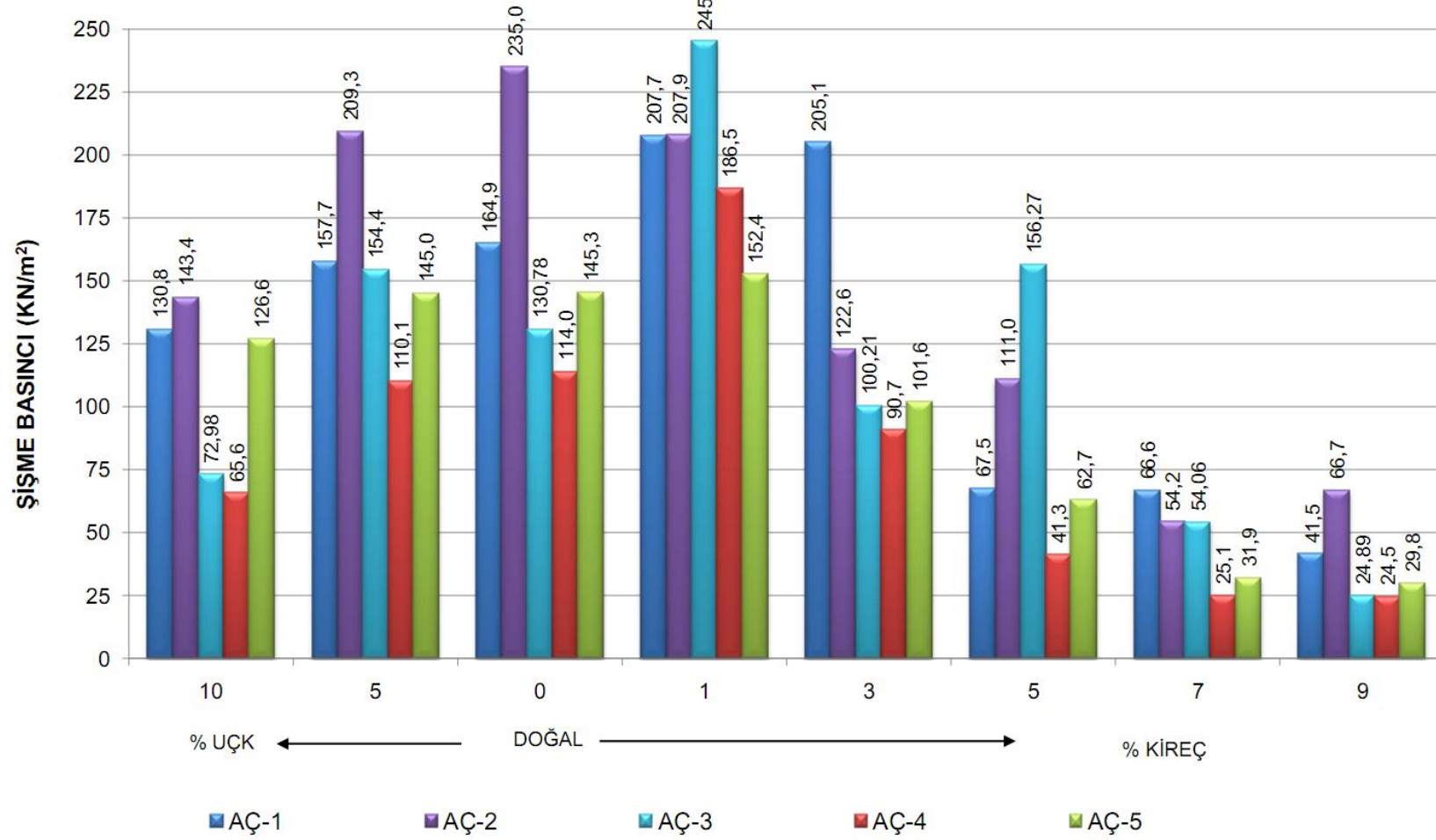
Standart proktor deneylerinden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri esas alınarak şişme yüzdesi ve şişme basıncı deney numuneleri odömetre ringleri içerisinde hazırlanmıştır. Her bir karışım oranı için, ilgili standart proktor deneyinde elde edilen optimum su muhtevasını ve maksimum kuru birim hacim ağırlığını verecek değerler hesaplanmıştır.

Hazırlanan deney numunelerine, şişme yüzdelerinin ve şişme basınçlarının belirlenmesi amacıyla bir boyutlu odömetre deneyleri yapılmıştır [31].

Her bir deney numunesine ait şişme yüzdesi değerleri şekil 8.1. ve şişme basıncı değerleri şekil 8.2.' de verilmektedir. Yeniçağa killерinin, kireç ile yapılacak zemin iyileştirmesinde en iyi sonuç, kireç yüzdesinin %7 veya %9 alınması ile elde edilebilmektedir.



Şekil 8.1 Şişme yüzdeleri değişim grafiği



Şekil 8.2 Şişme basınçları değişim grafiği

8.1.3. Serbest basınç deneyleri ve deney sonuçları

Yeniçağa killerin özelliğlerinin iyileştirilmesine yönelik bu çalışmada, kirecin zemin mukavemetine etkisini ölçmek üzere serbest basınç deneyi yapılmıştır. Serbest basınç deneyi için şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneylerine benzer şekilde standart proktor deney parametrelerinden yararlanılarak %5 ve %10 oranlarında kireç katılarak deney numuneleri hazırlanmıştır.

Belirlenen sürelerde kürde bekletilen numuneler zamanı geldiğinde serbest basınç cihazında yükleme hızında deneye tabii tutulmuştur. Deviatör gerilme ve eksenel birim deformasyon grafikleri Ek3' te sunulmuştur. Serbest basınç değerlerindeki değişimler şekil 8.3.a. ve şekil8.3.b.' de verilmiştir.

Yeniçağa ilçesi yerleşim alanı killerin serbest basınç deneyinden elde edilen sonuçlarına göre numunelerin tamamındaki serbest basınç dayanım değerleri, kireç malzemesi %10 olarak katıldığında yüksek dayanımlar elde edilmektedir.



Resim 8.1. Değişik kireç oranlarında hazırlanan serbest basınç dayanım deney numuneleri



Resim 8.2. Beklemesi biten numunelerin serbest basınç dayanım deneyi



Resim 8.3. Serbest basınç dayanım deneyi sonunda kırılan numune

8.2. Uçucu Külün Katkı Maddesi Olarak Kullanılması

Uçucu kül, yakıt olarak kömür ve linyit kullanılan termik santrallerde, kömür kullanarak demir, çelik ve diğer metal üretimi yapan ısı ve kazan tesislerinde atık veya yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Yan ürün olarak kullanılabilen bu atıkların büyük miktarlara ulaşması ile ekonomik ve çevresel etkilerden dolayı büyük sorunlar oluşturmaktadır.

Atıkların yan ürün ve dolgu malzemesi olarak inşaat sektöründe kullanılması; kil ve diğer doğal malzemenin kullanımının azaltılması nedeniyle doğanın korunmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca, kullanılabilir atıkların değerlendirilmesi ile depolama ve diğer nedenlerden oluşan çevre kirliliğinin azaltılması, farklı mühendislik uygulamalarına ekonomik çözüm olanağı sağlaması ve hammadde olarak kullanılması faydalar sağlayacaktır.

Uçucu kül ile ilgili çalışmalar incelendiğinde konunun çok geniş bir bilim alanını ilgilendirdiği görülmüştür. Konu farklı araştırmacılar tarafından aşağıdaki alt başlıklarda incelenmiştir [46].

- Uçucu külün oluşturduğu çevresel etki,
- Uçucu külün fiziksel ve kimyasal yapısı,
- Uçucu külün çimento üretimi ve yapı malzemesi olarak kullanılması,
- Uçucu külün zemin iyileştirme malzemesi olarak kullanılması.

8.2.1 Standart proktor deneyleri ve sonuçları

İnceleme alanından alınan zemin numuneleri, etüvde kurutulduktan sonra %5 ve %10 oranlarında uçucu kül katılarak, deney yapılması için gerekli karışımlar hazırlanmıştır. %5 uçucu kül katkılı zemin numunesi karışımı için 3000 g kuru kil numunesine 158 g uçucu kül katılırken, %10 uçucu kül katkılı zemin numunesi karışımı için 3000 g kuru kil numunesine 333,50 g uçucu kül katılmıştır. Böylece toplamda %5 katkı oranı için 3158 g, %10 katkı oranı için

3333,5 g olmak üzere iki adet numune elde edilmiştir. Hazırlanan bu numune miktarları, standart proktor deneyinde kullanılmak için yeterli miktardır.

İnceleme alanından alınan her numune için saf kil olarak proktor değerleri bulunup, karışımli numunelerin proktor değerleri ile karşılaştırılmıştır. Standart proktor deneyleri ASTM D 4546-03 standardına [31] göre yapılmıştır. Her bir deney numunesine ait $\gamma_d - W_{opt}$ (maksimum kuru birim hacim ağırlık - optimum su muhtevası) grafikleri Ek-2' de ve çizelge 8.2' de verilmiştir.

8.2.2. Şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleri ve sonuçları

Yeniçağa ilçesi inceleme alanı zeminleri için, %5 ve %10 oranlarında uçucu kül karıştırılmış deney numuneleri hazırlanmıştır. Bu numuneler hazırlanırken standart proktor deneylerinden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ve optimum su muhtevası değerleri esas alınmıştır. Şişme basıncı ve şişme yüzdeleri bulunacak deney numuneleri, odömetre ringleri içerisinde hazırlanmıştır. Her bir karışım oranı için, ilgili standart proktor deneyinde elde edilen optimum su muhtevasını ve maksimum kuru birim hacim ağırlığını verecek değerler hesaplanmıştır.

Deney numunelerine, şişme yüzdelerinin ve şişme basınçlarının belirlenmesi amacıyla bir boyutlu odömetre deneyleri yapılmıştır [31].

Her bir deney numunesine ait şişme yüzdesi, şişme basıncı değerleri şekil 8.1 ile şekil 8.2'de verilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde, tüm deney numuneleri için uçucu kül yüzdesinin %10 olduğu durumlarda şişme yüzdesinin ve şişme basıncının çoğu numunede düşmeye başladığı görülmektedir.

%10 uçucu kül katılarak yapılan konsolidasyon deneylerinde numunelerin şişme basıncı ortalama olarak %32 oranında azalmıştır. Şişme yüzdelerinde ise çok farklı sonuçlara ulaşılmıştır. Yeniçağa killeri, %10 oranında uçucu kül katılarak yapılan deneylerde, bazı numunelerin şişme yüzdesinde %50'ye varan azalmalar dikkati çekmiştir.

Uçucu kül ile yapılacak şişme potansiyeline yönelik iyileştirmelerde katkı maddesi olarak kullanılacak uçucu kül yüzdesi, inceleme alanı killeri için yapılan deneylerin ışığında %10 olarak belirlenmiştir.

8.2.3. Serbest basınç deneyleri ve sonuçları

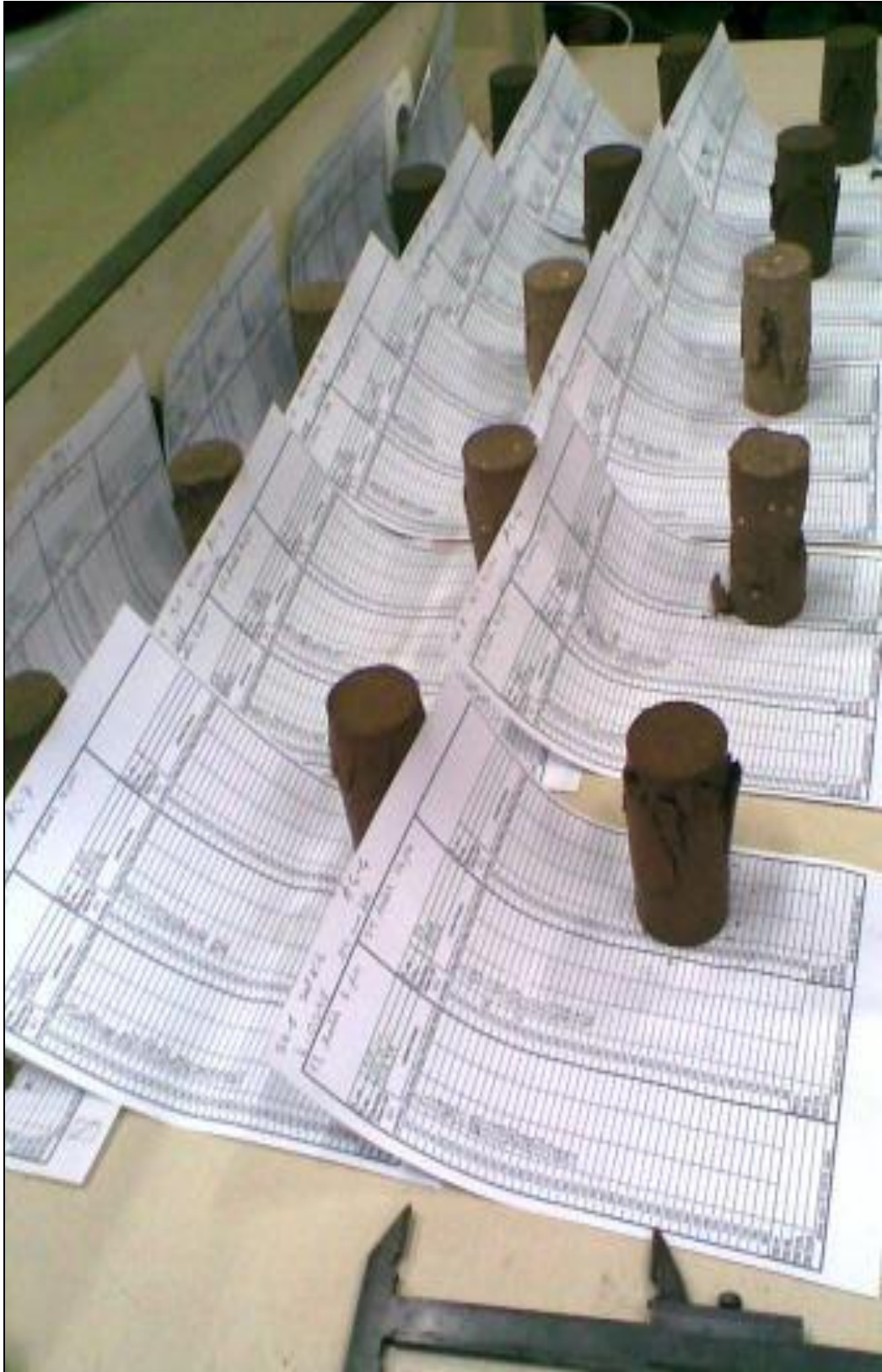
Yeniçağa ilçesi yerleşim alanındaki şişen killerin zemin özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik bu çalışmada, zemin numunelerine katılan uçucu külün zemin mukavemet parametrelerindeki etkisini ölçmek için serbest basınç deneyi yapılmıştır. Serbest basınç deneyi için şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneylerine benzer şekilde standart proktor deney parametrelerinden yararlanılmıştır.

Serbest basınç deneyi her bir numuneye üç adet uygulanmıştır. Hazırlanan karışım oranından üç adet deney numunesi hazırlanıp desikatörlerde korumaya alınmıştır. Bu numunelerden biri birinci gün, yani 24 saat desikatörde bekletildikten sonra serbest basınca tabii tutulmuştur. Diğer bir numune 14, geri kalan üçüncü numune ise 28 gün desikatörde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Böylece uzun vadede oluşacak değişimlerin saptanması hedeflenmiştir.

Belirlenen sürelerde bekletilen numuneler zamanı geldiğinde serbest basınç cihazında kırılmıştır. Tüm okumalar bilgisayar ortamında değerlendirilerek numunelerin serbest basınç değerleri ve kohezyon değerleri elde edilmiştir. Detaylı serbest basınç deney sonuçları şekil 8.3, şekil 8.4, şekil 8.5, şekil

8.6, ve Şekil 8.7' de grafik olarak sunulmuştur. Deviatör gerilme ve eksenel birim deformasyon grafikleri Ek 3' te verilmiştir.

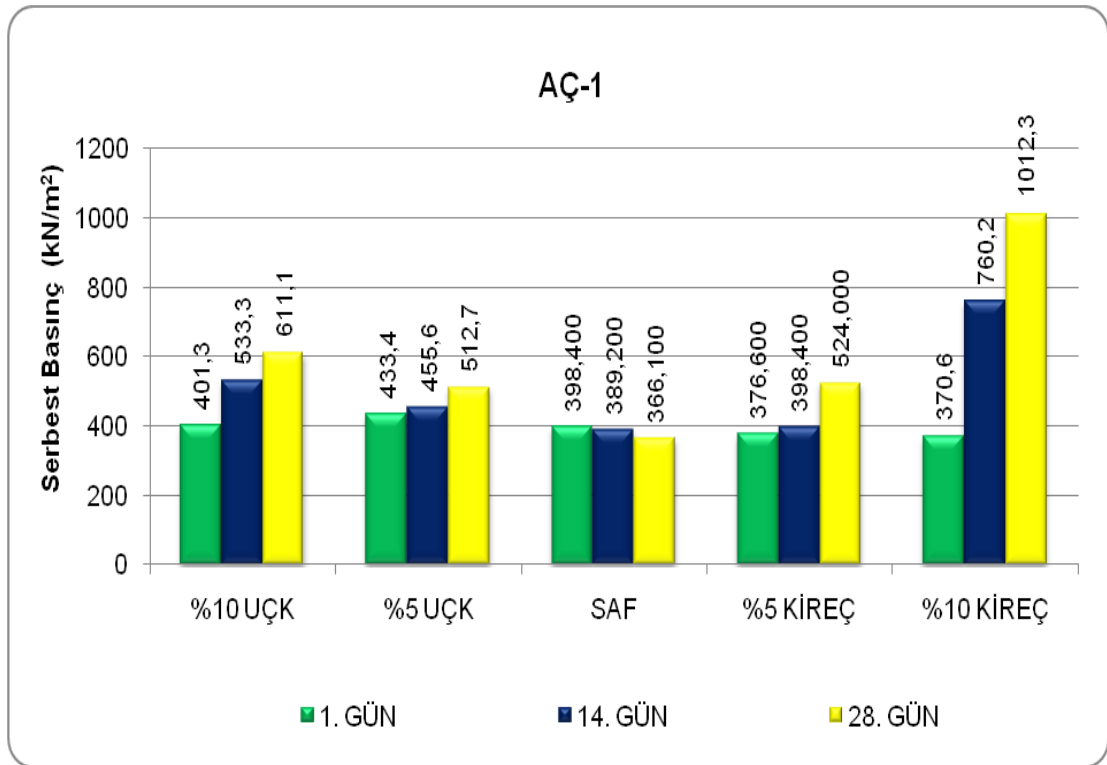
Yeniçağa ilçesi yerleşim alanı killerinin serbest basınç deneyinden elde edilen sonuçlarına göre numunelerin tamamındaki serbest basınç dayanım değerleri, kireç malzemesinde olduğu gibi uçucu külde de %10 olarak katıldığında sonuç vermektedir. %5 uçucu kül katılması durumunda mukavemet parametrelerinde ancak uzun vadede yüksek dayanımlar elde edilmektedir.



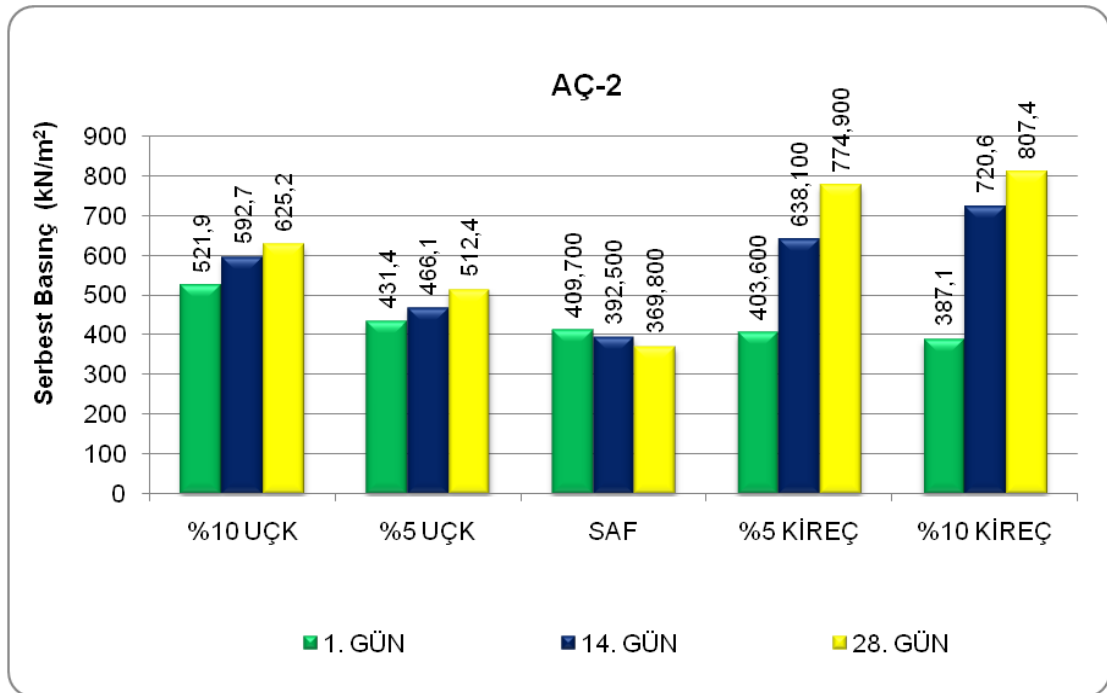
Resim 8.4. 14 gününü dolduran numunelerin serbest basınç dayanım deneyi sonrası



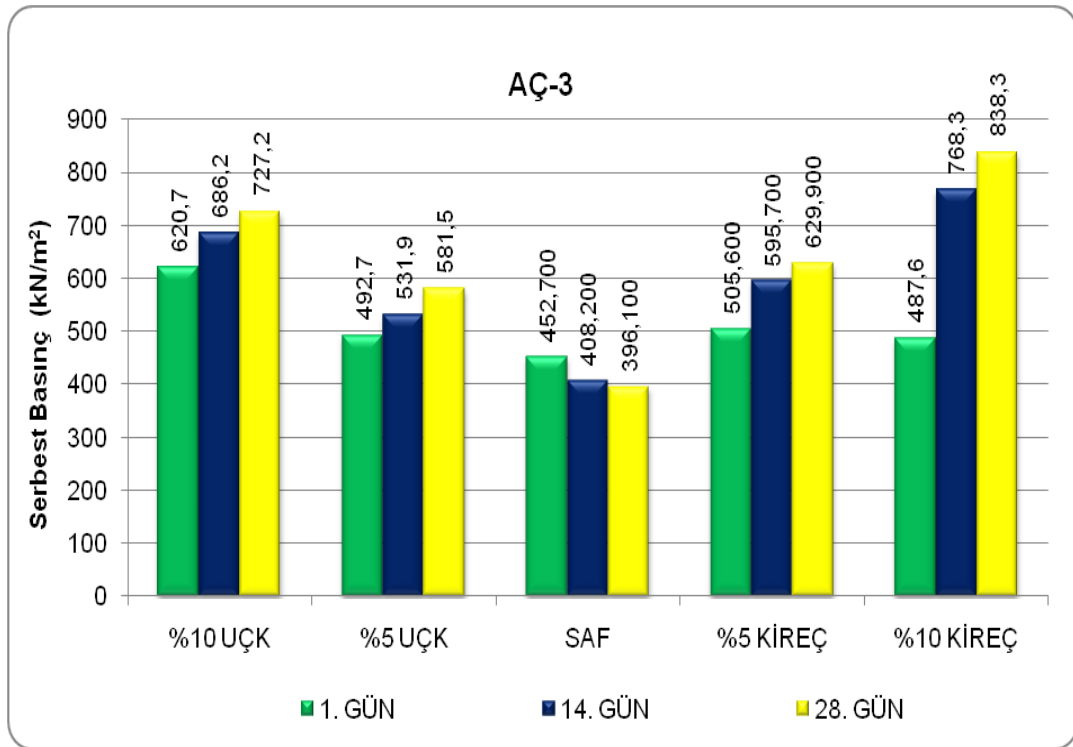
Resim 8.5. Serbest basınç dayanım deneyi sonunda kırılan numune



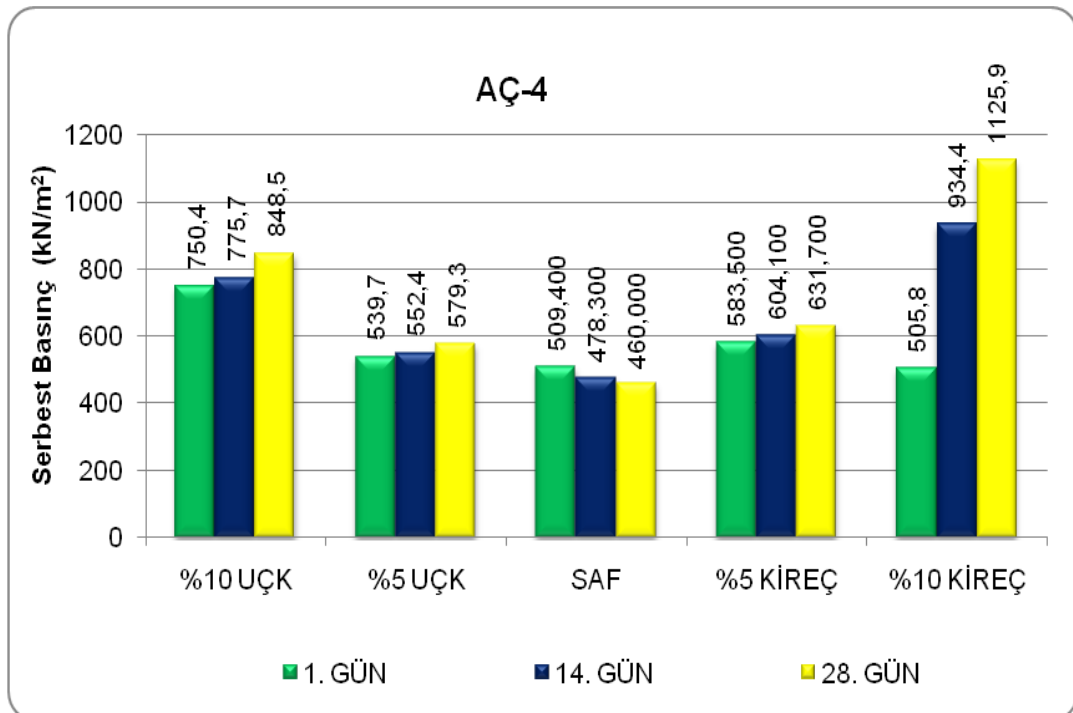
Şekil 8.3. AÇ-1 Serbest basınç dayanımı değişim grafikleri



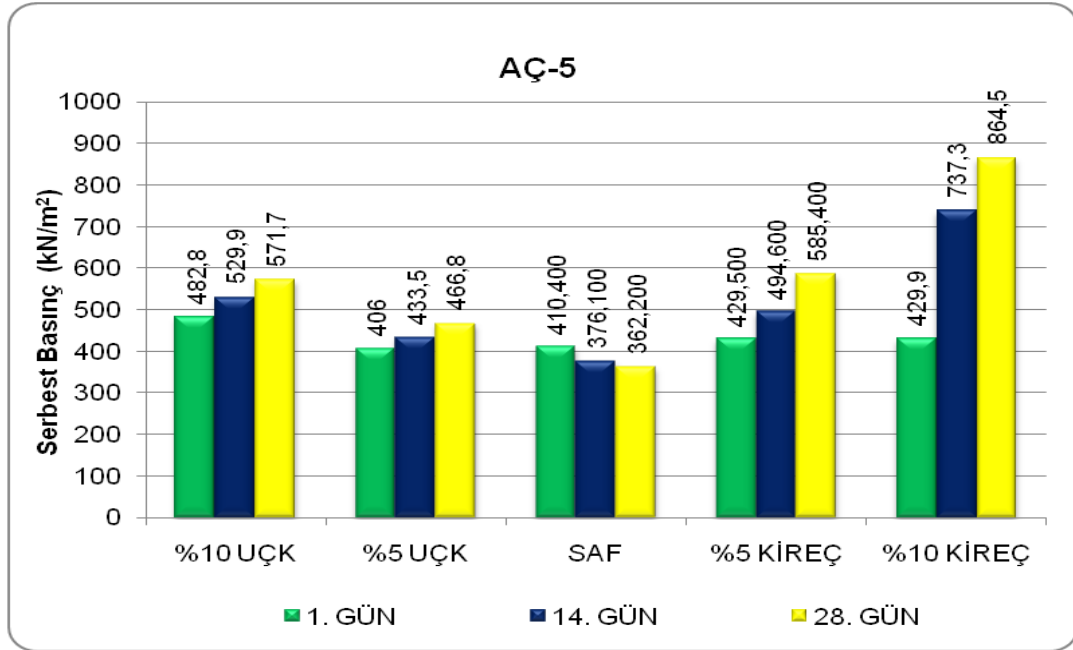
Şekil 8.4. AÇ-2 Serbest basınç dayanımı değişim grafikleri



Şekil 8.5. AÇ-3 Serbest basınç dayanımı değişim grafikleri



Şekil 8.6. AÇ-4 Serbest basınç dayanımı değişim grafikleri



Şekil 8.7. AÇ-5 Serbest basınç dayanımı değişim grafikleri

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bölgedeki şişme probleminin çözümü için, bölgenin muhtelif yerlerinden alınan örselenmiş ve örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde indeks özelliklerini, mineralojik bileşimini ve şişme potansiyeli verileri şişme potansiyelinin hesaplanmasına yönelik çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilmiş abak ve eşitlikler ile elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Bölüm 7’ de bölge killерinin şişme potansiyeli yorumlanmıştır. Sınıflama sonuçlarına göre Yeniçağa killeri, “*çok yüksek seviyede şişme potansiyeline*” sahiptir.

%10 oranında katılan uçucu kül, Yeniçağa kilinin şişme basıncını ortalama %32 ve şişme yüzdesini %43 oranında azaltmıştır. %10 oranında katılan uçucu kül kilin serbest basınç dayanımını artırmaktadır. Geçen süre dayanımı olumlu yönde etkilemektedir. Bu nedenle Yeniçağa killерinin iyileştirilmesinde Çayırhan uçucu külünün %10 oranında kullanılması tavsiye edilmektedir.

%1 ile %9 arasında değişen oranlarda sönmüş kireç ile yapılan iyileştirme çalışmalarında, %7 ve %9 oranlarında en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Yeniçağa killерinin şişme potansiyelinde, %7 ve %9 oranlarında katılan sönmüş kireç sayesinde zamana bağlı olarak azalmalar görülmüştür.

Yeniçağa killерinin şişme potansiyelini iyileştirerek, üstündeki hafif yapılara olumsuz etkilerini azaltmak amacı ile temel elemanlarının altında sönmüş kireç veya Çayırhan uçucu külü standartlara uygun karıştırılıp sıkıştırıldığında olumlu sonuçlar verebilecektir.

KAYNAKLAR

1. Özeydin, K., "Zemin Mekaniği", **Birsen Yayınevi**, İstanbul, 1-260 (1999).
2. Chen F.H., "Foundations on expansive soils", **Elsevier Scientific Publishing Company**, Amsterdam – Oxford – New York, 1-45 (1975).
3. Jones, D.E. and Holtz, W.G., "Expansive soils – the hidden disaster", Civil Engineering, **ASCE**, 49-51 (1973).
4. Ünsal, N., "İnşaat mühendisliği için jeoloji", **Alp Yayınevi**, Ankara, 48-50 (2006).
5. Mitchell, J.K., "Fundamentals of soil behaviour", **John Wiley & Sons, Inc.**, New York, 422 (1976).
6. Nelson, J.D. and Miller, D., "Expansive soils problems and practice in foundation and pavement", **John Wiley & Sons, Inc.**, New York, 8-15, 40-57 (1992).
7. Angın, Z., "Şişen Killerin Mineralojik Yapılarının Hacim Değiştirme Etkilerinin İncelenmesi," Türkiye İnşaat Mühendisliği 16. Teknik Kongresi, **TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası**, İstanbul, 13-21 (2001)
8. Kjellander, R., Marcelja, S., Quirk, J. P., "Attractive doublelayer interactions between calcium clay particles", **Journal of Colloid Interface Science**, 126:194-200 (1988).
9. Di Maio, C., "Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effects", **Geotechnique**, 46 (4): 695–707 (1996).
10. Snethen, D.R., "A review of engineering experiences with expansive soils in highway subgrades", **U.S Army Eng. Waterways Exp. Sta.**, Report No. FHWA-RD-75-48, 32-69 (1975).
11. Uzundurukan, S., "Zeminlerin şişme özelliklerine etkiyen temel parametrelerin belirlenmesi ve modellenmesi", Doktora Tezi, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Isparta, 12-84 (2006).
12. Seed, H.B., Chan, C.K., "Structure and strength characteristics of compacted clays", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division **ASCE**, 85: 87-128 (1959).
13. Seed H. B., Woodward R. J., Lungreen R., "Predicting of swelling potential of compacted clays", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division **ASCE**, 88: 53-87 (1962).

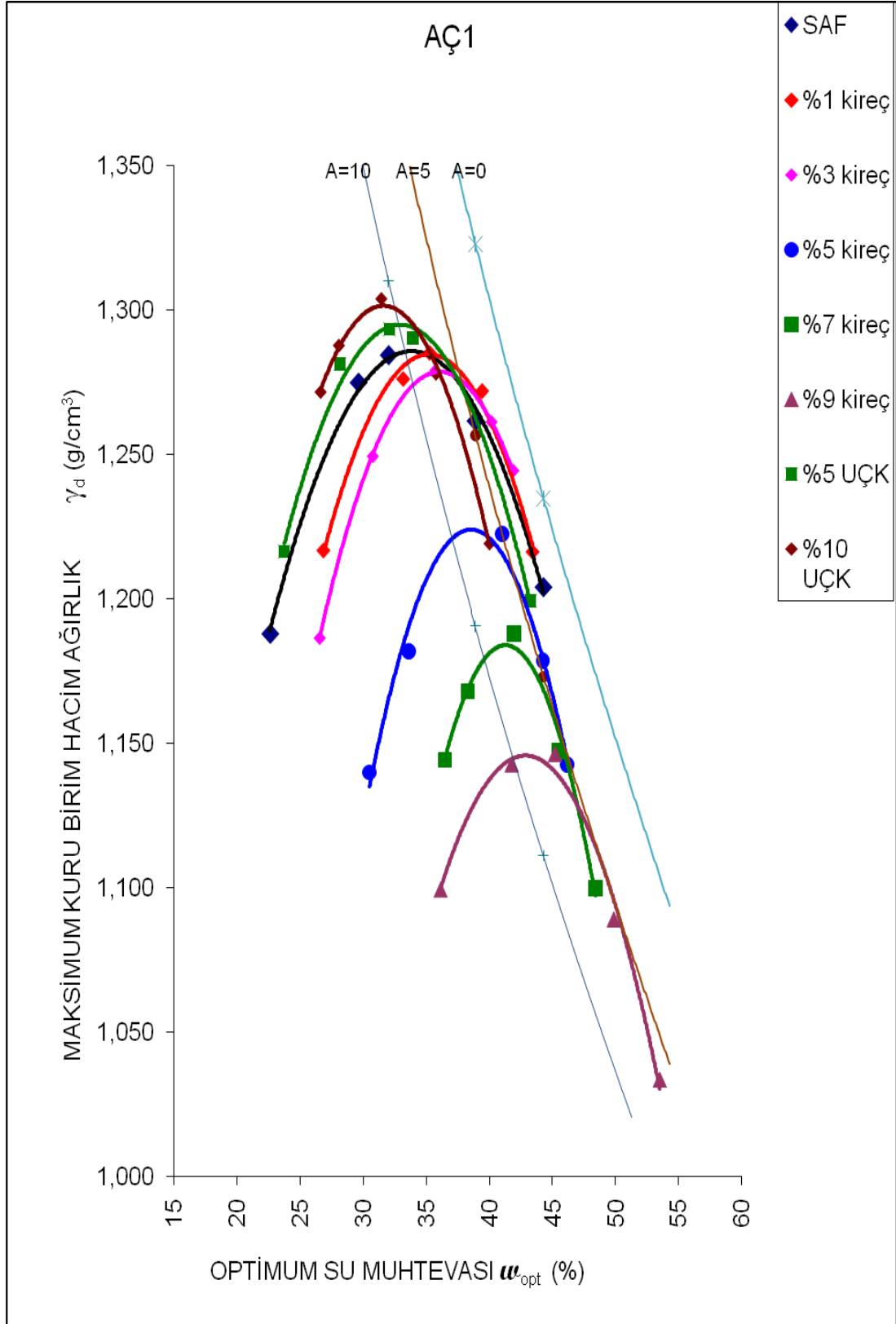
14. Ohri, M.L., "Swelling pressure of clays and its control", **International Conference on Problematic Soils**, Nottingham, 427-433 (2003).
15. Dif, A. E., Bluemel, W. F., "Expansive soils under cyclic drying and wetting", **Geotechnical Testing Journal**, 14: 96-102 (1991).
16. Gromko, G.J., "Review of expansive soils", Journal of the Geotechnical Engineering Division, **ASCE**, 100: 667-687 (1974).
17. Holtz, W. G., Gibbs, H. J., "Engineering Properties of Expansive Clays", **ASCE Transactions**, 121: 641-663 (1956).
18. Snethen, D.R., "Evaluation of expedient methods, for identification and classification of potentially expansive soils", Proceedings, **5th International Conference on Expansive Soils**, Adelaide, 22-26 (1984).
19. Coduto, D.P., "Foundation design principles and practices", **Prentice Hall**, New Jersey, 655-700 (1994).
20. Sridharan, A., Choudhury, D., "Swelling pressure of sodium montmorillonites", **Geotechnique**, 52: 459-462 (2002).
21. Murthy, V.N.S., "Geotechnical engineering – Principles and practices of soil mechanics and foundation engineering", **Marcel Dekker Inc.**, 800-816 (2002).
22. Wayne A.C., Osman M.A. and Elfatih M.A., "Construction on expansive soils in Sudan", Journal of Construction Engineering and Management, **ASCE**, 110: 359-379 (1984).
23. Altmeyer, W. T., "Discussion of Engineering Properties of Expansive Clays", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, **ASTM**, 81: 17-19 (1955).
24. Vijayvergiya, V. N., Ghazzaly, O.I., "Prediction of swelling potential for natural clays", **3rd International Conference on Expansive Soils**, Haifa, 227-236 (1973).
25. Holtz, R.D., Kovacs, W.D., "An introduction to geotechnical engineering", **Prentice Hall**, New Jersey, 186-190 (1981).
26. Dakshanamurthy, V., Raman, V., "A simple method of identifying expansive soil", **Soils and Foundations**, 13: 97-104 (1973).
27. Van Der Merwe, D.H., "The prediction of heave from the plasticity index and percentage clay fraction of soils", **Civil Engineers in South Africa**, 6: 103-107 (1964).

28. Skempton, A. W., "The Colloidal Activity of Clay", ***Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering***, 57-61 (1953).
29. Nayak, N. V., Christensen, R. W., "Swelling characteristic of compacted expansive soils", ***Clays and Clay Minerals***, 19: 251-261 (1974).
30. Komornik, A. and David, D., "Prediction of swelling pressure of clays", Journal of SMFE Div., ***ASCE***, 95: 209-225 (1969).
31. ASTM D 4546-03, "Standard Test Method for One-Dimensional Swell or Settlement Percent of Cohesive Soils", ***Annual Book of ASTM Standards***, 1-7 (1993).
32. Köylü, B., "Killerde şişme potansiyelini belirleyen öğeler ve Yenikent (Ankara) yerleşim alanı killlerinin şişme potansiyelinin belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 1-56 (2003).
33. Uran, Ş.B., "Yeniçağa (Bolu) killlerinin şişme potansiyellerinin irdelenerek çevresel etkilerinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 1-105 (2005)
34. Durgunoglu, H.,T., vd., "Yüksek Plastisiteli Taban Zemini Killlerinin Projelendirme Kriterleri", Araştırma, IX. ***Pan Amerikan Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Konferansı***, 12 (26-30 Ağustos 1991).
35. Taşkiran, T., "Diyarbakır ili, Kayapınar-Yeniköy-Bağcılar yöresi kilinin şişme potansiyelinin irdelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 1-107 (2000)
36. Gökçe, A., "Ankara kili parametrelerinin yerel değişimi ve şişme potansiyeli yorumu", Yüksek Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 1-120 (2001)
37. Güngör, A., G., "Bursa Yöresi Şişebilen Kil Zeminlerin Yol Dolgularında Kullanılması Amacıyla uçucu Kül ile Islahı", Yüksek Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 1-78 (2002)
38. Öztürk, Y.,Z., "Gölbaşı (Ankara) yerleşim alanı killlerinin, şişme potansiyelinin belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 1-82 (2009)
39. İntenet, Yeniçağa Kaymakamlığı, "İlçemizin Yer altı Zenginlikleri", http://www.yenicaga.gov.tr/default_B1.aspx?content=1046, (2010)
40. Arca M. S., "Yeniçağa havzasının neotekniği ve oluşumu, Bolu-Türkiye", Yüksek Lisans Tezi, ***Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 105 (2004)

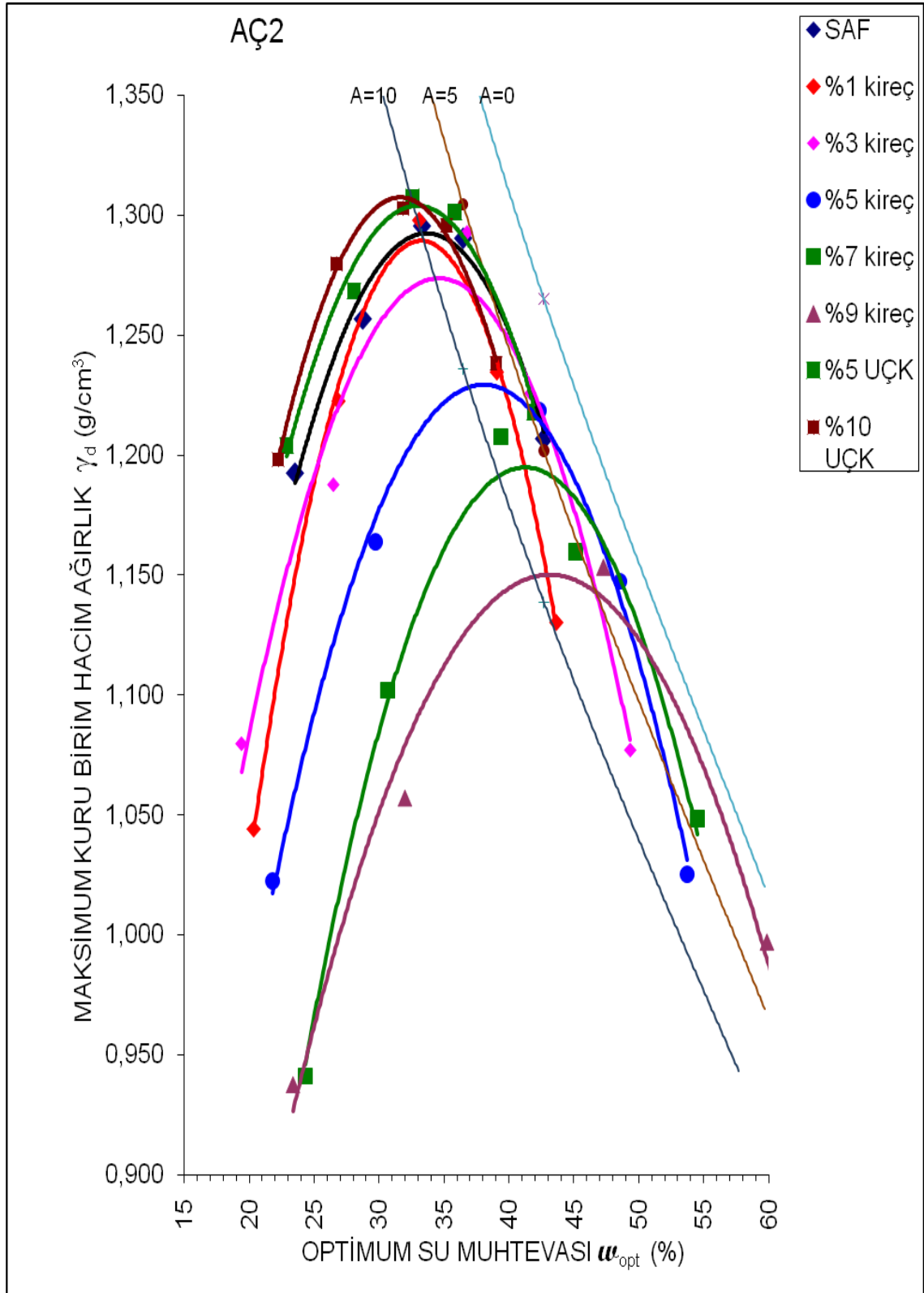
41. Serdaroğlu, A., "Bolu-Yeniçağ turbalığının bazı inorganik elementlerinin jeokimyası", Yüksek Lisans Tezi, **Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 133 (1998)
42. Özmen, B., "Düzce-Bolu Bölgesinin Jeolojisi, Diri Fayları ve Hasar Yapan Depremleri", 12 Kasım 1999 Düzce Depremi Raporu, **Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi**, Ankara, 14 (2000)
43. İnternet: Afet İşleri Gen. Müd. Deprem Arş. Dairesi "Türkiye deprem bölgeleri haritası-Bolu", <http://www.deprem.gov.tr/linkhart.htm> (1996)
44. TS EN 459-1, "Yapı kireci - Bölüm 1: Tarifler, özellikler ve uygunluk kriterleri ", **Türk Standartları Enstitüsü**, 1-6 (2005).
45. "Yeniçağa İlçesi ve çevresi jeoloji haritası", **MTA yayınları**, 1 (2007).
46. Erdoğan, T.Y., "Atık Hammaddelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu", **Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu**, Ankara, 1-8 (1993).

EKLER

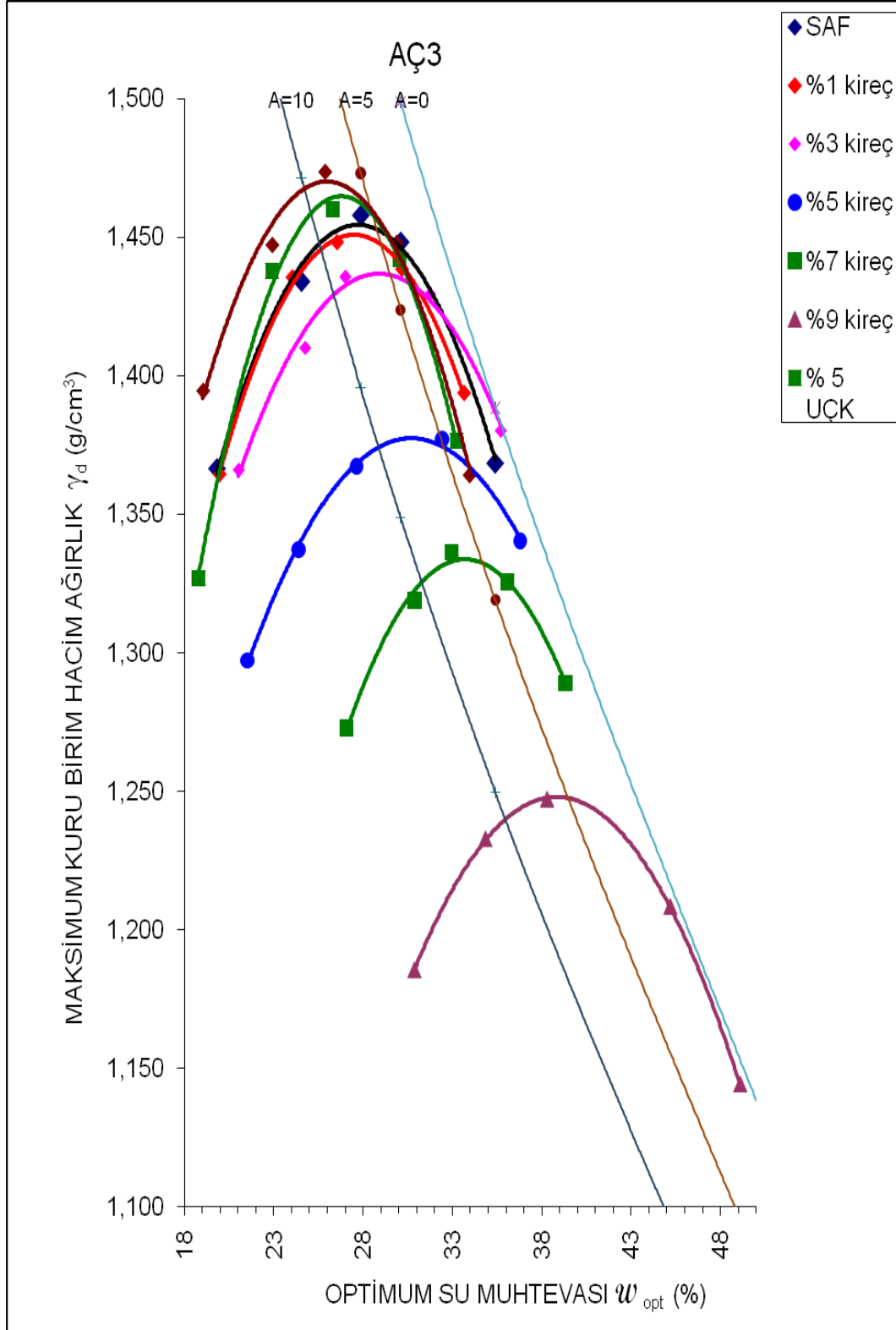
EK-2. Standart proktor deney sonuçları AÇ-1



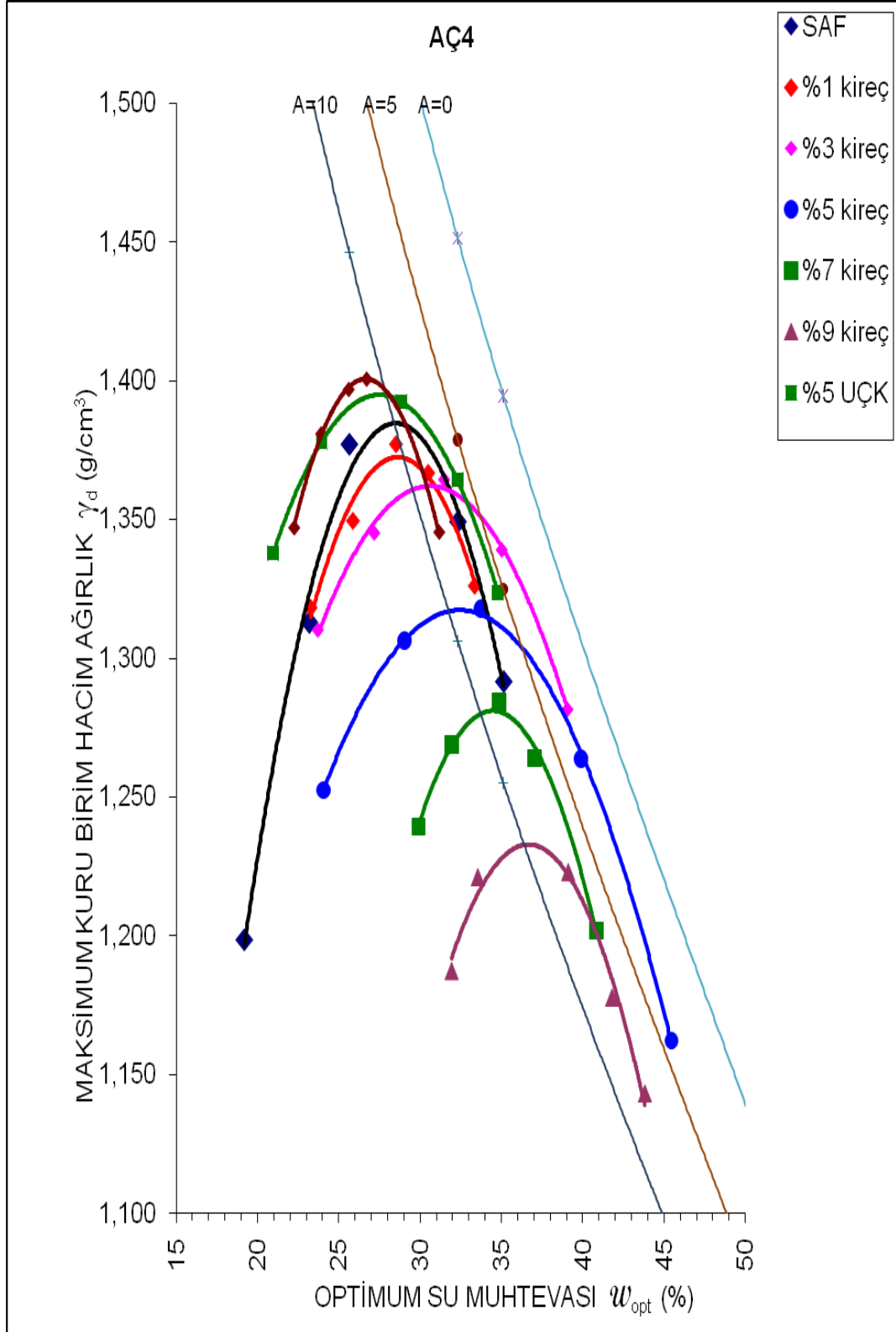
EK-2. (Devam) Standart proktor deney sonuçları AÇ-2



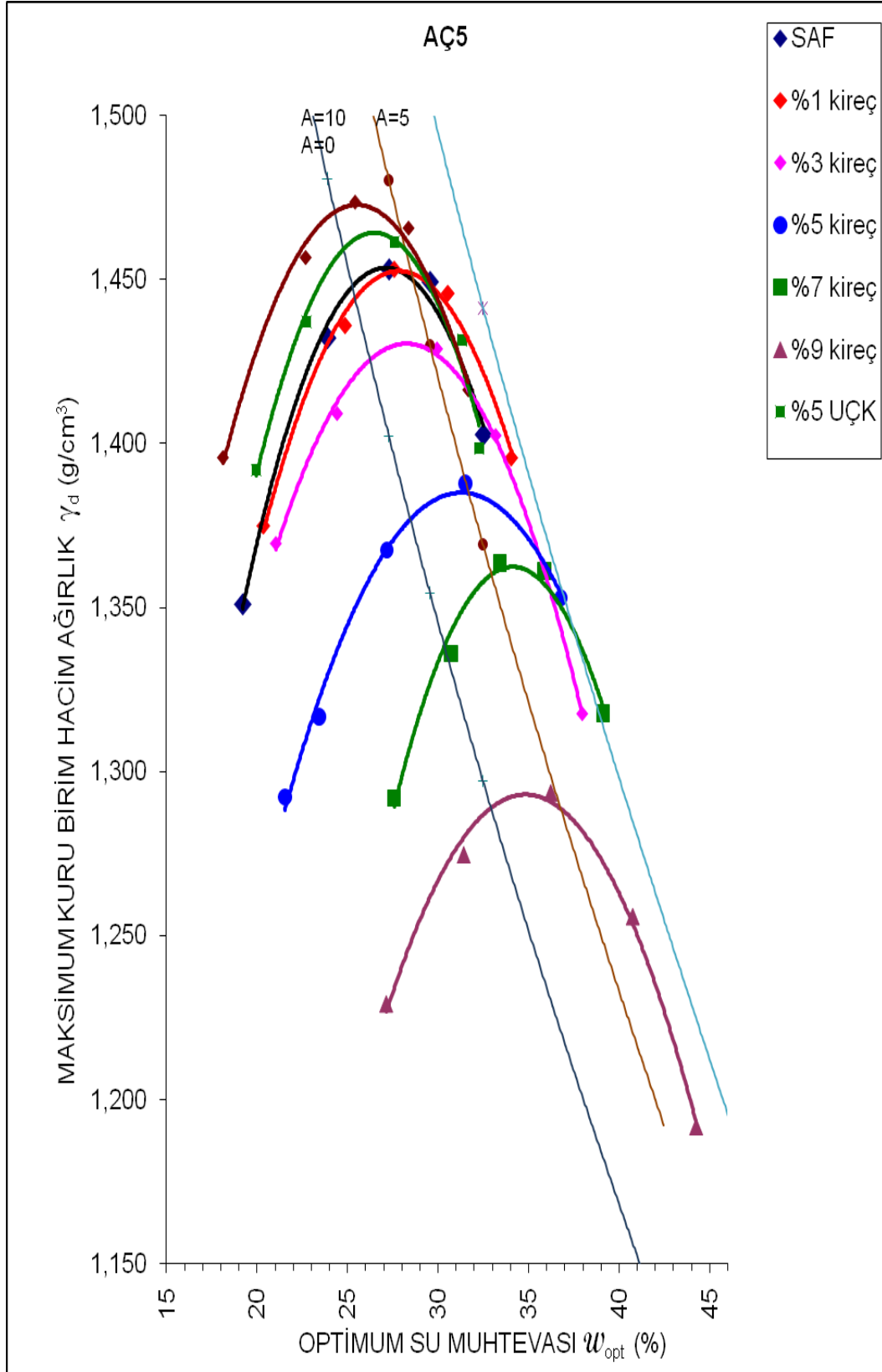
EK-2. (Devam) Standart proktor deney sonuçları AÇ-3



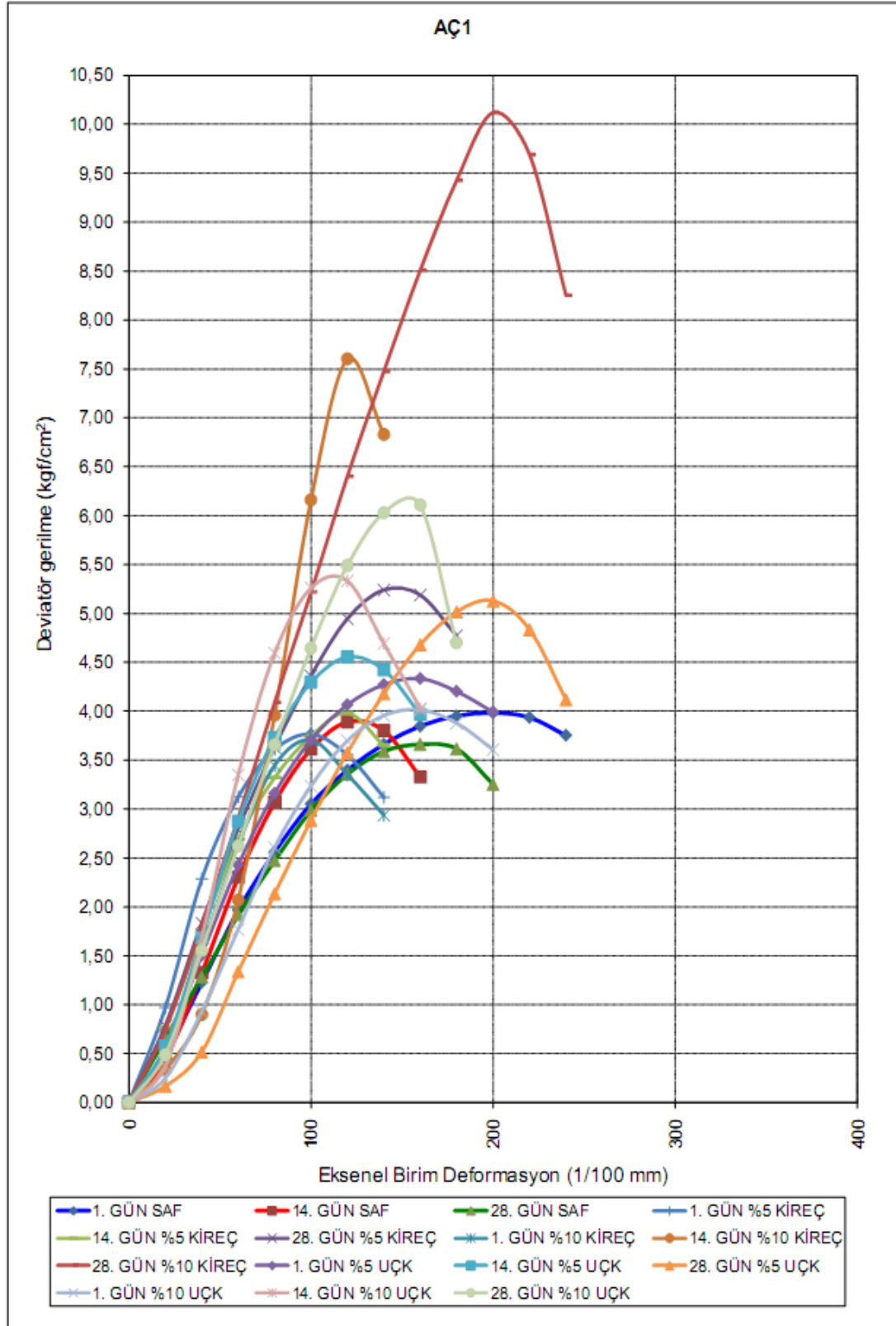
EK-2. (Devam) Standart proktor deney sonuçları AÇ-4



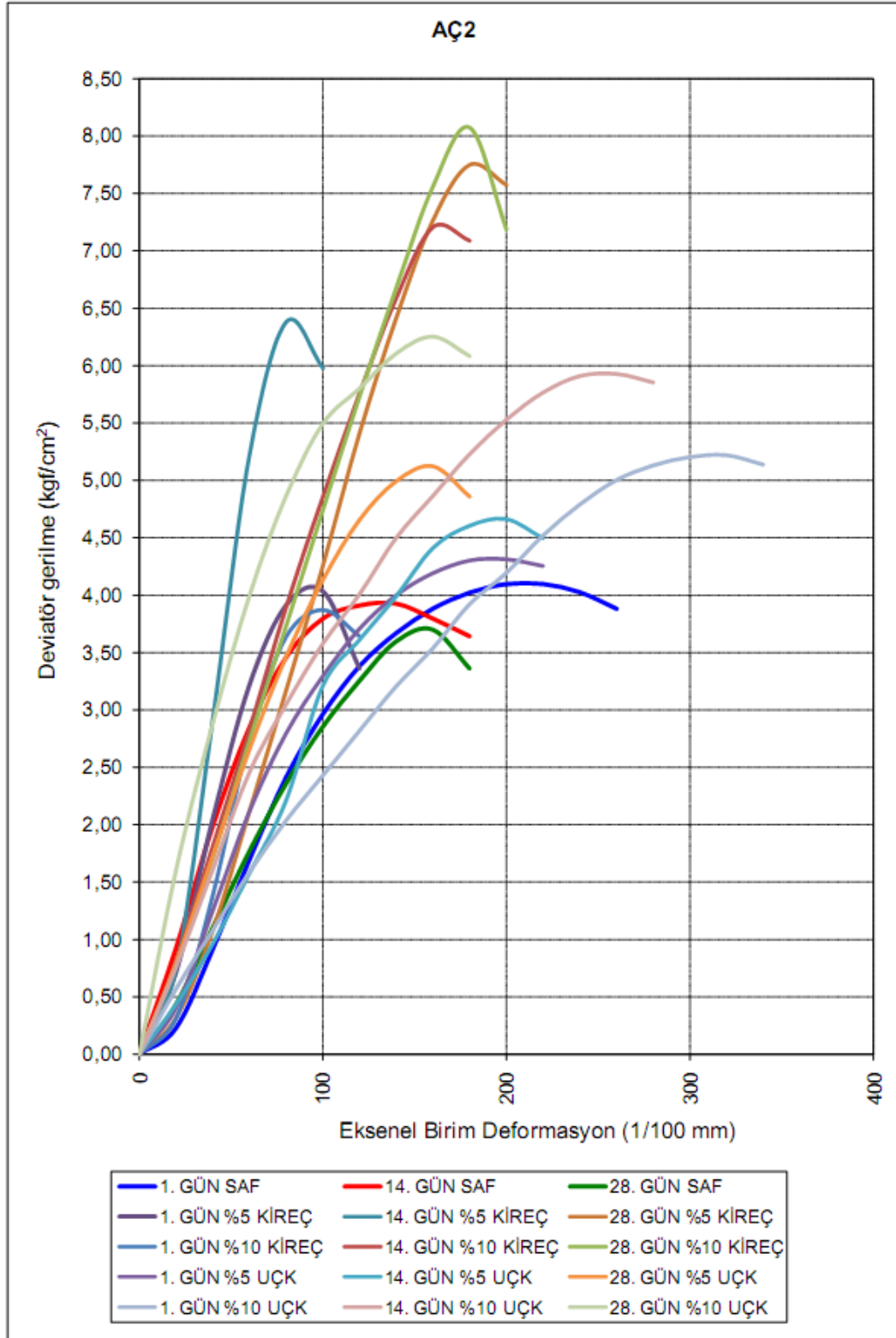
EK-2. (Devam) Standart proktor deney sonuçları AÇ-5



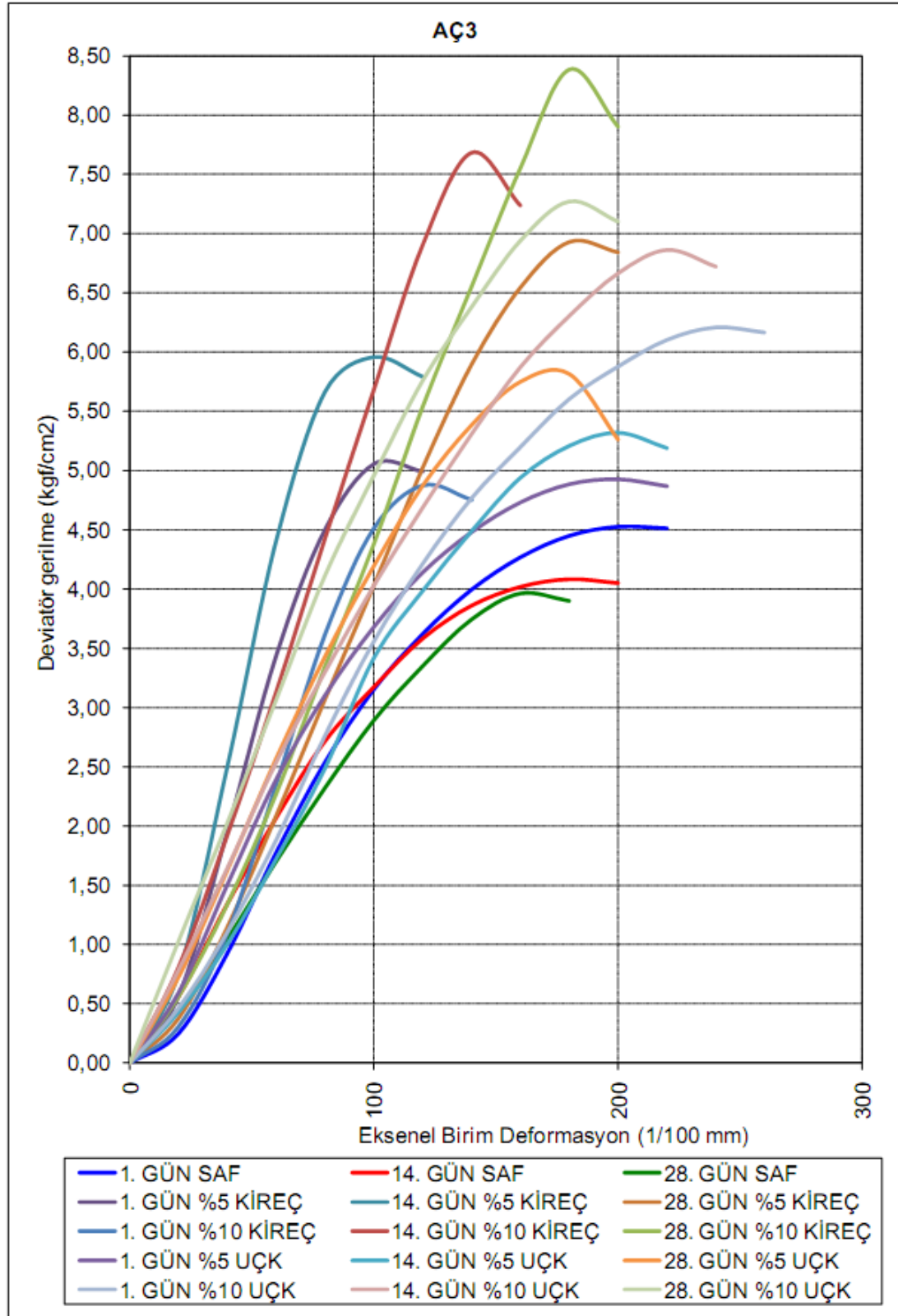
EK-3. Eksenel birim deformasyon - deviator gerilme ilişkileri AÇ-1



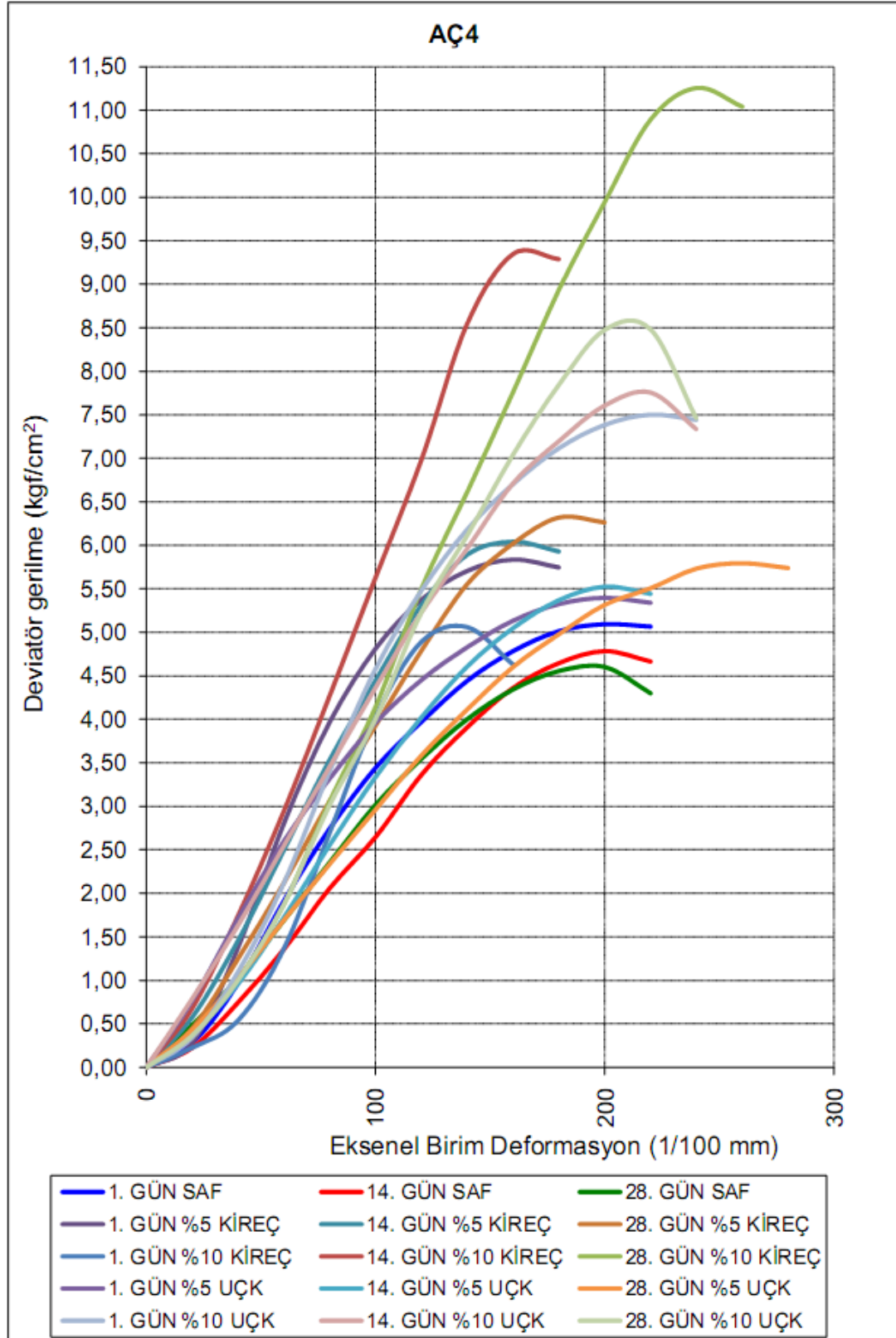
EK-3. (Devam) Eksenel birim deformasyon - deviator gerilme ilişkileri AÇ-2



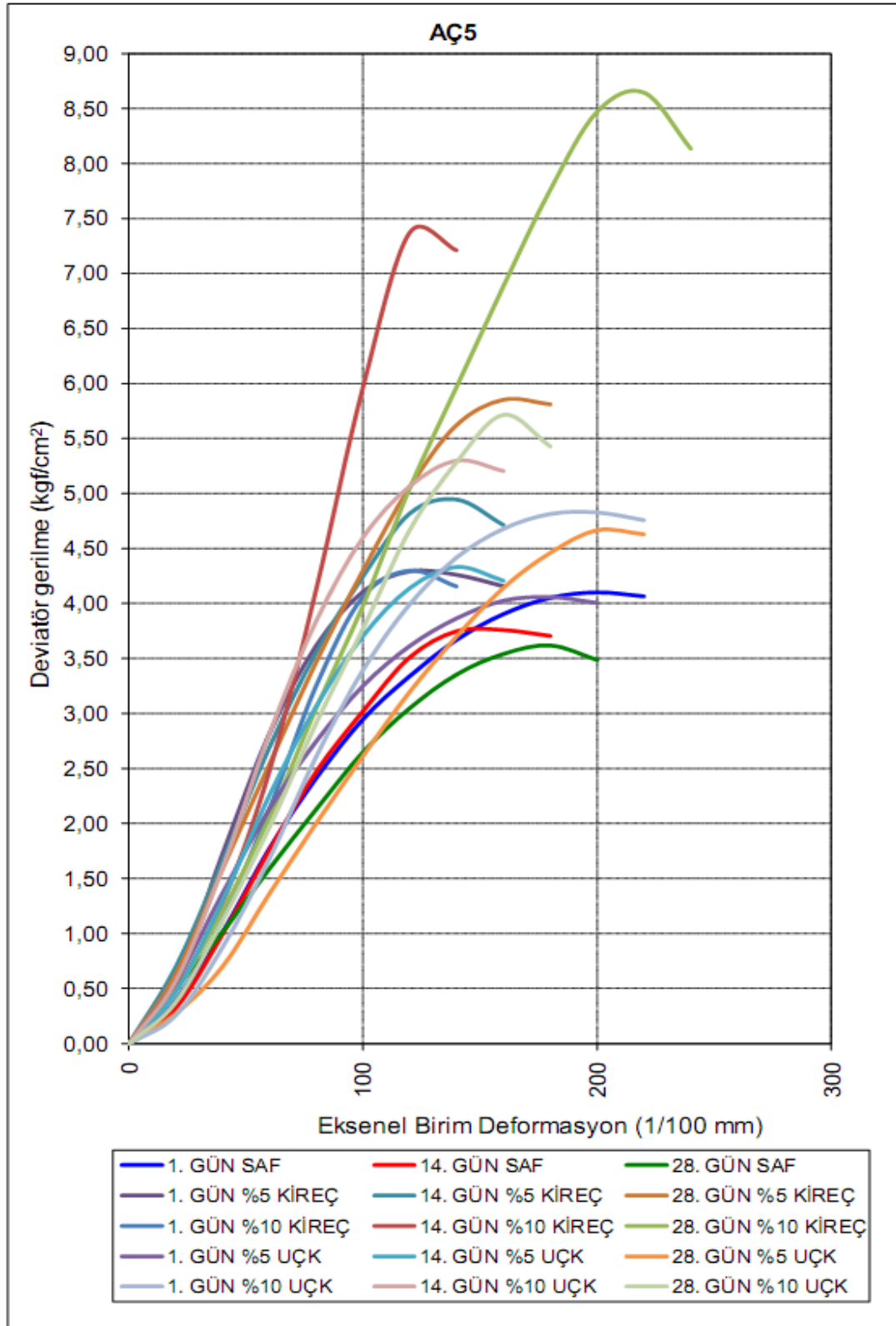
EK-3. (Devam) Eksenel birim deformasyon - deviator gerilme ilişkileri AÇ-3



EK-3. (Devam) Eksenel birim deformasyon - deviator gerilme ilişkileri AÇ-4



EK-3. (Devam) Eksenel birim deformasyon - deviator gerilme ilişkileri AÇ-5



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ORHAN, Halil
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 10.11.1970 Ankara
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 473 72 36
 Faks : 0 (312) 473 72 37
 e-mail : halil@sormuhendislik.com

Eğitim Derece

Eğitim Birimi

Mezuniyet tarihi

Yüksek lisans	Gazi Üni./İnşaat Müh. Bölümü	2010
Lisans	Uludağ Üni./İnşaat Müh. Bölümü	1996
Lise	Ankara İ.H. Lisesi	1991

İş Deneyimi Yıl

Yer

Görev

1997-2010	Sor Mühendislik Ltd. Şti.	Genel Müdür
-----------	---------------------------	-------------

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Orhan, H., “Yeniçağa Kilinin Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesinde Kireç ve Uçucu Külün Kullanılabilirliği”, Yüksek Lisans Tezi, 88, 2010.

Hobiler

Kitap, Müzik, Bilgisayar teknolojileri, Basketbol