

**ULUBEY T1 TÜNEL GÜZERGÂHINDAKİ YOL ÜSTYAPI TABANINDA
YERALAN BENTONİT KİLLERİNİN ÇEŞİTLİ KATKI MALZEMELERİYLE
İYİLEŞTİRİLMESİ**

Şenda SARIALİOĞLU (BOZKURT)

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2010
ANKARA**

Şenda SARIALİOĞLU (BOZKURT) tarafından hazırlanan “ULUBEY T1 TÜNEL GÜZERGÂHINDAKİ YOL ÜSTYAPI TABANINDA YERALAN BENTONİT KİLLERİNİN ÇEŞİTLİ KATKI MALZEMELERİYLE İYİLEŞTİRİLMESİ” adlı bu tezin Yüksek lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL

.....

Tez Danışmanı, Geoteknik Anabilim Dalı

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

Prof. Dr. Nail ÜNSAL

.....

Geoteknik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Y. Doç. Dr. Oğuzhan AKBAŞ

.....

Geoteknik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Y. Doç. Dr. Nihat IŞIK

.....

Geoteknik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tarih :...../...../.....

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

Prof. Dr. Bilal TOKLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki tüm 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.

Şenda SARIALIOĞLU (BOZKURT)

**ULUBEY T1 TÜNEL GÜZERGÂHINDAKİ YOL ÜSTYAPI TABANINDA
YERALAN BENTONİT KİLLERİNİN ÇEŞİTLİ KATKI MALZEMELERİYLE
İYİLEŞTİRİLMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Şenda SARIALİOĞLU (BOZKURT)

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ocak 2010**

ÖZET

Yüksek plastisiteye ve yüksek şişme potansiyeline sahip killer üzerine inşa edilecek olan karayolları gibi hafif ve esnek mühendislik yapılarında, su muhtevastaki değişimler nedeniyle deformasyon ve taşıma gücü sorunları oluşmaktadır. Bu tip zeminlerin mühendislik özelliklerinin geliştirilmesi sayesinde, bu olumsuz durumların yol üstyapısına zarar vermesi önlenabilir.

Bu çalışmada, (Ordu-Ulubey) Ayrımı - Topçam Yolunun Km:6+015-6+405 arasındaki üstyapı tabanının, birleştirilmiş zemin sınıfı CH, şişme potansiyeli yüksek, kil aktivitesi normal ve Ca-Na smektit grubu suya doymun bentonitik killi bir zemin olduğu belirlenmiştir. Bu tez kapsamında zeminin stabilizasyonu için, üç farklı oranda yüksek kalsiyumlu kireç ve Consolid444+Solidry (C+S) katkısı kullanılarak deneysel bir çalışma yürütölmüştür.

Sonuç olarak yapılan şişme deneyleri değerlendirildiğinde, (C+S) ve yüksek kalsiyumlu kireç katkılarının, şişme davranışını önemli ölçüde değiştirdiği belirlenmiştir. Kireç katkısının büzölme davranışı üzerinde daha etkili olduğu görölmüştür. CBR değerleri açısından her iki katkı da

oldukça iyi artış oranlarına ulaşırken, (C+S) katkısı daha yüksek sonuçlar vermiştir. Karayolları Teknik Şartnamesi'ne uygun bir üstyapı tabanı malzemesi oluşturması açısından, %7 oranında kireç katkısı yeterli olmuştur. %2 oranında (C+S) katkısının da LL, PI ve γ_{dmax} kriterleri dışında, stabilizasyon şartlarını sağladığı belirlenmiştir. Her iki katkının artan oranlarıyla kür edilen zeminin serbest basınç dayanımlarında artış gözlenmiştir. Üç eksenli basınç (UU) deney sonuçlarına göre, kohezyon değerlerinin benzer mertebelerde azaldığı ve içsel sürtünme açısı değerlerinin de arttığı görülmüştür. Her iki katkı, üstyapı tasarımında alttemel ve seçme malzeme gereksinimini ortadan kaldırmıştır. Ancak (C+S) katkısı plentmiks temel tabakasının 5 cm arttırılmasını gerektirmiştir. Bu çalışmada yapılan birim fiyat analizi ile kireç katkısının daha ucuz bir stabilizasyon yöntemi olduğu ortaya konulmuştur.

Bilim Kodu : 911.1.50
Anahtar Kelimeler : Şişen Zeminler, stabilizasyon, şişme potansiyeli
Sayfa Adedi : 146
Tez Yönetici : Prof. Dr. Nail ÜNSAL

**STABILIZATION OF BENTONITE CLAYS IN PAVEMENT SUBGRADE ON
ULUBEY T1 TUNNEL ALIGNMENT WITH SEVERAL ADDITIVES**

(M.Sc. Thesis)

Şenda SARIALIOĞLU (BOZKURT)

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

January 2010

ABSTRACT

Variations in moisture content of clays with high plasticity and high swelling potential, result in deformations and bearing capacity problems in light and flexible engineering structures such as highways. By improvement of engineering properties of soil, damages in highway pavement can be prevented.

Subgrade of pavement on (Ordu-Ulubey) Intersection - Topçam Highway Km: 6+015-6+405 consist of saturated bentonite clay (CH) belonging to Ca-Na smectite group with normal clay activity. In this study experimental works have been carried out for stabilization of bentonite clay with high swelling potential using high calcium lime and Consolid444+Solidry (C+S) at three different ratios.

Evaluation of swelling tests results showed that (C+S) and high-calcium lime change the swelling behavior considerably. Lime additive influences shrinkage behavior more effectively. Both additives improve CBR strength value of soil with higher increase in case with (C+S) additive. 7% lime additive is required to stabilize pavement subgrade according to technical specification of highways whereas 2% of (C+S) provide stabilization except LL, PI and γ_{dmax} criteria. It is observed that,

increase of percentages in both additives result in increase of unconfined compression strength of soil depending on curing time. According to the triaxial (UU) test results, there is a similar decrease in cohesion clay and a similar increase in internal friction angle for both additives. Both of the additives eliminated the requirement for subbase and superior materials in pavement design. However, the additive of (C+S) required that plant mix base layer was increased by 5 cm. In this study, according to the cost analysis, it was seen that using lime additive for stabilization was a cheaper method.

Science Code : 911.1.50
Key Words : Expansive soils, swelling potential, stabilization
Page Number : 146
Adviser : Prof. Dr. Nail Ünsal

TEŞEKKÜR

Çalışma danışmanım, değerli hocam Prof. Dr. Nail ÜNSAL'a verdiği destek için çok teşekkür ederim.

Çalışmamı destekleyen Karayolları Genel Müdürlüğü'ne, yardımlarını esirgemeyen desteğini hep yanımda hissettiğim Üst Yapı Şubesi Müdürü A. Gürkan GÜNGÖR'e, Zemin Mekaniği Şubesi Müdürü Engin MISIRLI'ya ve Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı'na çok teşekkür ederim.

Arkadaşlarım Müdür Yardımcım Sina KİZİROĞLU ve Malzeme Etütleri Şefi Yavuz ERGİNTAV'a, numunelerin alınması ve kaynak temini konusundaki eşsiz performansları için, dostlarım Tülin SOLAK ve Ebru AKIŞ'a sıkışık anlarımı ferahlattıkları için, ayrıca birlikte çalışma şansı yakaladığım ve deneyimlerinden her zaman yararlandığım, zemin mekaniği, toprak ve stabilizasyon, kimya, betonlu karışımlar laboratuvarları personellerine ve numunelerin alınması ile ilgili olarak PLANSON firmasına gösterdikleri özen ve ayırdıkları her an için teşekkür ederim.

Değerli annem babam ve kız kardeşlerim; manevi desteğiniz benim için çok kıymetliydi, saygılarımı sunuyorum.

Sevgili eşim Bülent SARIALIOĞLU, beni yüreklendirdi, özendi ve çok mesai harcadı. Onun titiz çalışma disiplini, bitmek bilmeyen enerjisi ve sonsuz desteği, dar boğazlardan ustalıkla kurtarabilme yeteneği bu çalışmanın lokomotif oldu ve anlamını yüceltti ve kızım Pelin SARIALIOĞLU kitaplarım ve hesap makineme çizdiği tüm işaretler yol göstericiydi. Sabrınıza ve sevginize layık olması umuduyla...

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xvi
HARİTALARIN LİSTESİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xviii
1. GİRİŞ	1
2. PROBLEMLİ ZEMİNLER	4
2.1. Göçen Zeminler.....	4
2.2. Dağınık Yapılı Killer.....	5
2.3. Donmaya Duyarlı Zeminler.....	5
2.4. Şişen Zeminler	6
2.4.1. Killerin yapısı	13
2.4.2. Kil minerallerinin sınıflandırılması.....	15
2.4.3. Bentonit	17
3. ZEMİN STABİLİZASYONU	19
3.1. Giriş.....	19
3.2. Zemin Stabilizasyonunun Prensipleri	19
3.3. Zemin Stabilizasyonunun Uygulanması	20

Sayfa

3.4. Zemin Stabilizasyonu Yöntemleri	22
3.4.1 Granüler stabilizasyon	22
3.4.2. Kimyasal stabilizasyon	22
3.4.3. Termal stabilizasyon.....	25
3.4.4. Elektro-kinetik stabilizasyon.	26
3.5. Kireç Stabilizasyonu	26
3.5.1. Zemin-kireç reaksiyonları	27
3.5.2. Kireç iyileştirmesinin etkinliği.....	29
4. PROJE ALANININ TANITILMASI.....	36
4.1. Jeoloji ve Stratigrafi	36
4.1.1. Üstkretase:andezit-bazalt-aglomera dasit tuf.....	37
4.1.2. Üstkretase-paleosen: kumtaşı- silttaşı-kiltaşı- marn-tuf	37
4.2. İklim.....	39
4.3. Yapısal Jeoloji ve tektonik	39
5. STABİLİZASYON MALZEMELERİ	42
5.1. Consolid	42
5.1.1. Consolid kimyasal katkılarının oluşturulma süreci	42
5.1.2. Consolid sistemin uygulama şekli.....	43
5.1.3. C+S katkısının kimyasal ve fiziksel yapısı	43
5.1.4. Consolid sistemin çevre ile etkileşimi	45
5.1.5. C+S katkısı ile deney yöntemi	45
5.2. Kireç.....	46
5.3. Stabilizasyon Kriterleri.....	47

Sayfa

5.3.1. Optimum kireç yüzdesinin belirlenmesi için yapılan ön deneyler	48
6. DENEYSEL ÇALIŞMA	51
6.1. X-Ray ve Kimyasal Analizleri	51
6.2. Zemin Sınıflandırma Deneylerinin Değerlendirilmesi	53
6.2.1. Laboratuvar çalışması	54
7. ÜST YAPI TABAKA KALINLIKLARININ TESPİTİ VE MALİYET KARŞILAŞTIRMASI	96
7.1. Üstyapı Tabakası Kalınlıklarının Belirlenmesi	96
7.2. Stabilizasyonda Kullanılan Kireç ve C+S Katkılarının Maliyet Karşılaştırması	102
8. SONUÇLAR	106
9. KAYNAKLAR.....	111
EKLER	114
EK-1 X Ray sonuçları	115
EK-2 Sondaj logu	120
EK-3 Hidrometre analizi sonucu.....	123
EK-4 PH deney sonucu	124
EK-5 Katkısız ve kireç katkılı malzemelerin üç eksenli basınç numuneleri resimleri.....	126
EK-6 C+S katkılı malzemelerin üç eksenli basınç numuneleri resimleri	128
EK-7 Kürsüz serbest basınç dayanım deney numuneleri resimleri	129
EK-8 7 gün kürlü serbest basınç dayanım deney numuneleri resimleri.....	130
EK-9 7+5 gün kürlü serbest basınç dayanım deney numuneleri resimleri..	131
EK-10 28 gün kürlü serbest basınç dayanım deney numuneleri resimleri..	132
EK-11 Elastisite modülü (tanjant modülü) örnek gösterimi.....	133
EK-12 Üç eksenli basınç (CU) deney sonuçları	134
EK-13 Esneklik modülü deney sonuçları	136
EK-14 Esnek üstyapı projelendirme programı çıktısı	143
EK-15 Üstyapı kalınlık tespit abağı	144
EK-16 Yol ve tünel üstyapı tip enkesiti	145
ÖZGEÇMİŞ	146

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Don hassasiyeti	5
Çizelge 2.2. Değişik minerallerin aktiviteleri	8
Çizelge 2.3. Şişme potansiyelini etkileyen zemin özellikleri	9
Çizelge 2.4. Şişme/büzülme potansiyeline etki eden çevresel faktörler	10
Çizelge 2.5. Şişen zeminlerin sınıflandırılması	11
Çizelge 2.6. Kil minerallerinin x ışını analizi	14
Çizelge 5.1. Araştırma çalışmalarında ulaşılan deney sonuçları	44
Çizelge 5.2. Stabilizasyonda kullanılan kirecin kimyasal fiziksel özellikleri ..	46
Çizelge 5.3. Kireçle stabilizasyonda uygunluk şartları	48
Çizelge 5.4. Stabilizasyon şartları	50
Çizelge 6.1. Bentonitik kil numunesi deney sonuçları	52
Çizelge 6.2. Atterberg limitleri ve doğal su muhtevası deney sonuçları	55
Çizelge 6.3. Tek eksenli büzülme ve özgül ağırlık deney sonuç tablosu	58
Çizelge 6.4. Elek analizi ve hidrometre deney sonuçları	60
Çizelge 6.5. PH deney sonuçları	61
Çizelge 6.6. Standart proktor deney sonuçları	62
Çizelge 6.7. CBR deney sonuçları	66
Çizelge 6.8. Kürsüz serbest basınç deney sonuçları	69
Çizelge 6.9. 7+5 gün ± 20 °C kürlü serbest basınç deney sonuçları	70
Çizelge 6.10. 7 gün kürlü serbest basınç deney sonuçları	71
Çizelge 6.11. 28 gün kürlü serbest basınç deney sonuçları	72
Çizelge 6.12. Serbest basınç deney sonuçları	73
Çizelge 6.13. Üç eksenli basınç (CU) deney sonucu	75
Çizelge 6.14. Üç eksenli basınç (UU) deney sonuçları	76
Çizelge 6.15. Şişme basıncı deney sonuçları	82
Çizelge 6.16. Farklı şişme yüzdesi deney sonuçları	83
Çizelge 6.17. Katkısız numune konsolidasyon deney sonuçları	85
Çizelge 6.18. %1 C+S katkılı numune konsolidasyon deney sonuçları	85

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.19. %2 C+S katkılı numune konsolidasyon deney sonuçları	85
Çizelge 6.20. %3 C+S katkılı numune konsolidasyon deney sonuçları	86
Çizelge 6.21. %5 kireç katkılı numune konsolidasyon deney sonuçları	86
Çizelge 6.22. %7 kireç katkılı numune konsolidasyon deney sonuçları	86
Çizelge 6.23. %10 kireç katkılı numune konsolidasyon deney sonuçları	87
Çizelge 6.24. Tip-2 numunelere ait yükleme tablosu.....	91
Çizelge 6.25. MR deney sonuçları	94
Çizelge 7.1. Yıllık ortalama günlük trafik hacimleri	98
Çizelge 7.2. Yol sınıfına göre güvenilirlik ve standart sapma değerleri	99
Çizelge 7.3. taşıt eşdeğerlik faktörleri	99
Çizelge 7.4. Servis kabiliyetinin seçimi (Pt)	100
Çizelge 7.5. Zayıf zeminler üzerine çekilecek koruyucu tabaka kalınlıkları	101
Çizelge 7.6. Üstyapı kalınlıkları	101
Çizelge 7.7. Stabilize edilecek hacim ve miktar.....	102
Çizelge 7.8. Kireç birim fiyatı.....	103
Çizelge 7.9. Kireç maliyeti	103
Çizelge 7.10. C+S birim fiyatı	104
Çizelge 7.11. C+S maliyeti	104

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Göçen zeminler	4
Şekil 2.2. Şişen zeminlerin PI ve LL e göre değerlendirilmesi	7
Şekil 2.3. Şişme potansiyelinin aktiviteye göre sınıflandırılması.....	8
Şekil 2.4. Kilin mineral yapısı	13
Şekil 2.5. Değişik kil minerallerinin yapısı	15
Şekil 2.6. Kil plakalarının dizilişi	16
Şekil 4.1. Stratigrafik sütun kesit	38
Şekil 4.2. Jeolojik plan.....	40
Şekil 4.3. Jeolojik profil.....	41
Şekil 6.1. AASHTO zemin sınıflandırma sistemi ile kilin değerlendirilmesi	53
Şekil 6.2. Zemin sınıflandırma sistemiyle bentonitik kilin değerlendirilmesi	53
Şekil 6.3. Katkısız,%1-2-3 C+S ve %5-7-10 kireç katkılı numunelerin Atterberg limitleri ve plastisite indisleri.....	56
Şekil 6.4. Yarı logaritmik elek analizi ve hidrometre grafiği	59
Şekil 6.5. Katkısız ve kireç katkılı numunelerin proktor deney sonuçları	63
Şekil 6.6. Katkısız ve C+S katkılı numunelerin proktor deney sonuçları.....	63
Şekil 6.7. Farklı zeminler için tipik proktor eğrileri	64
Şekil 6.8. Katkısız ve kireç katkılı numunelerin CBR deney sonuçları.....	65
Şekil 6.9. Katkısız ve C+S katkılı numunelerin CBR deney sonuçları	65
Şekil 6.10. Katkısız ve C+S katkılı numunelerin serbest basınç deney sonuçları	68
Şekil 6.11. Katkısız ve kireç katkılı numunelerin serbest basınç deney sonuçları.....	69
Şekil 6.12. C+S katkısı ile 7+5 ($\pm 20^{\circ}\text{C}$) gün kürlü deney sonuçları	69
Şekil 6.13. Kireç katkısı ile 7+5 ($\pm 20^{\circ}\text{C}$) gün kürlü deney sonuçları	70
Şekil 6.14. C+S katkısı ile 7 gün kürlü deney sonuçları.....	70
Şekil 6.15. Kireç katkısı ile 7 gün kürlü deney sonuçları	71
Şekil 6.16. C+S katkısı ile 28 gün kürlü deney sonuçları.....	71

Şekil	Sayfa
Şekil 6.17. Kireç katkısı ile 28 gün kürlü deney sonuçları	72
Şekil 6.18. Katkısız numune üç eksenli basınç deney sonucu	76
Şekil 6.19. %1 C+S katkılı numune üç eksenli basınç deney sonucu	77
Şekil 6.20. %2 C+S katkılı numune üç eksenli basınç deney sonucu	77
Şekil 6.21. %3 C+S katkılı numune üç eksenli basınç deney sonucu	78
Şekil 6.22. %5 Kireç katkılı numune üç eksenli basınç deney sonucu	78
Şekil 6.23. %7 Kireç katkılı numune üç eksenli basınç deney sonucu	79
Şekil 6.24. %10 Kireç katkılı numune üç eksenli basınç deney sonucu	79
Şekil 6.25. Şişme basıncı deney sonuçları.....	83
Şekil 6.26. Şişme yüzdesi deneyinde C+S katkısı etkisi	83
Şekil 6.27. Şişme yüzdesi deneyinde kireç katkısı etkisi.....	84
Şekil 6.28. Tekrarlı yükler altında oluşan elastik ve plastik deformasyonlar	88
Şekil 6.29. Katkısız numune esneklik modülü deney sonuçları	92
Şekil 6.30. %1 C+S katkılı numune esneklik modülü deney sonuçları	92
Şekil 6.31. %2 C+S katkılı numune esneklik modülü deney sonuçları	92
Şekil 6.32. %3 C+S katkılı numune esneklik modülü deney sonuçları	93
Şekil 6.33. %5 kireç katkılı numune esneklik modülü deney sonuçları.....	93
Şekil 6.34. %7 kireç katkılı numune esneklik modülü deney sonuçları.....	93
Şekil 6.35. %10 kireç katkılı numune esneklik modülü deney sonuçları.....	94
Şekil 7.1. Yol kesiti	102

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. C+S sisteminin uygulanışı.....	45
Resim 6.1. Atterberg ve büzülme limiti deneyleri	57
Resim 6.2. Proktor deneyi uygulanışı.....	62
Resim 6.3. CBR deneyi uygulanışı.....	67
Resim 6.4. Üç eksenli basınç deney düzeneği.....	75
Resim 6.5. CBR şişme deneyi düzeneği	80
Resim 6.6. Serbest şişme deneyi yapılışı	81
Resim 6.7. Odeometre cihazı	82
Resim 6.8. Esneklik modülü deney düzeneği.....	89
Resim 6.9. Esneklik modülü numunelerinin hazırlaması	90

HARİTALARIN LİSTESİ

Harita	Sayfa
Harita 4.1. Yer bulduru haritası	36
Harita 7.1. 2008 yılı trafik hacim haritası	98

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu tez çalışmasında kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A	Aktivite
e	Boşluk oranı
W_n	Doğal su içeriği
W_{opt}	Optimum su içeriği
γ_d	Kuru birim hacim ağırlık
γ_{dmax}	Maksimum kuru birim hacim ağırlık
γ_n	Doğal birim hacim ağırlık
γ_w	Suyun birim hacim kütlesi
c	Kohezyon
C	Kil oranı
$\emptyset$	İçsel sürtünme açısı
d	Numune alıcı çapı
h	Numune alıcı yüksekliği
G_s	Özgül ağırlık
L_s	Lineer büzülme
MR	Esneklik modülü
PR	Plastisite oranı
ξ	Eksenel birim şekil değiştirme
σ_3	Hücre basıncı
σ_1	Toplam gerilme

Kısaltmalar	Açıklama
BI	Büzülme indeksi

Kısaltmalar	Açıklama
LL	Likit limit
PE	Potansiyel şişme
PHD	Potansiyel hacim değiştirme
PI	Plastisite indeksi
PL	Plastik limit
SŞ	Serbest şişme
ŞB	Şişme basıncı
Na	Sodyum
C+S	Consolid444 + Solidry
Ca	Kalsiyum
Şi	Şişme indeksi
Ş%	Şişme yüzdesi
TADB	Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı
KTŞ	Karayolları Teknik Şartnamesi
CBR	California bearing ratio
FHWA	Federal Highway Administration
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
RL	Rötre limiti
ŞP	Şişme potansiyeli

1. GİRİŞ

Mühendislik yapılarının projelendirilmesinde taban zemininin öngörülen proje yükleri altında sağlaması gereken iki esas unsur deformasyon ve mukavemettir. Yüksek plastisiteli taban zeminine sahip karayolu yapıları gibi hafif mühendislik yapılarında bunların yanı sıra zeminin şişme özellikleri projelendirmenin en önemli kriteridir.

Karayolları güzergahlarında şişme potansiyeli yüksek oldukça kalın kil tabakaları ile sıklıkla karşılaşmakta olup, önemli yol yapılarının ve esnek yol üstyapısının tabanında yer alacak olan bu zeminlerin şişme potansiyeli ve taşıma gücü açısından değerlendirilerek ve gerekli ise stabilize edilerek istenilen şartları sağlayacak seviyeye getirilmesi gerekmektedir. Kimyasal stabilizasyon yöntemlerinin en eskisi ve en çok bilinen katkısı olan kireç ile farklı bir kimyasal stabilizasyon katkısı olan Consolid 444 + Solidry (C+S) katkısı yol yapılarının iyileştirilmesinde kullanılmaktadır. Kireç puzolanik reaksiyona girerek, C+S zemindeki suyu parçalayıp danelerden uzaklaştırarak daneler arasındaki gerçek kohezyonu ortaya çıkartmak suretiyle zayıf zeminlerin üstyapıya istenen niteliklerde taban olmasını sağlamaya çalışmaktadır.

Bu çalışma (Ordu–Ulubey) Ayrımı-Topçam Yolu projesi aşamasında Km:6+015-6+405 arasında yer alan, bentonitik yapıda, şişme potansiyeli yüksek ve taşıma gücü düşük kesimde açılacağı tespit edilen ve 260 m'lik kısmı tünel içinde geçecek, toplam 390 m'lik üstyapı tabanının geoteknik problemlerinin giderilmesine yönelik olarak, Öztüre firmasının Bartın fabrikasından temin edilen yüksek kalsiyumlu sönmüş kireç ve Consolid AG firmasının Türkiye distribütörü Ankara temsilciliğinden temin edilen C+S kimyasal katkısı ile bentonitik killi zemin üzerinde yapılan deneysel çalışmaları ortaya koymaktadır.

Öncelikle problemlı zayıf zeminler, şişme mekanizması, şişme potansiyeli ve bunu etkileyen etkenlerle ilgili geoteknik problemin sebeplerini ortaya koymaya yönelik olarak çeşitli kaynaklar ve yayınlar taranıp, teorik bilgiler derlenmeye çalışılmıştır. Bunu takip eden bölümde bu tip problemlerin çözümünde öngörülen stabilizasyon çalışmaları hakkında elde edilen bilgiler sunulmuştur. Ardından proje alanının jeolojik ve geoteknik özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Numunelerin alınması, yapılan deneylerin ve deney prosedürlerinin açıklanması ile ilgili bölümün sonrasında deney sonuçları değerlendirilerek varılan sonuçlar ortaya konulmuştur.

Laboratuvar çalışmaları sırasında öncelikle proje alanında yer alan kilin kimyasal, fiziksel, mineralojik özellikleri tespit edilmiştir. Kil malzemeye kimyasal analiz, pH tayini, elek analizi, hidrometre, Atterberg limitleri tayini, su muhtevası tayini, özgül ağırlık ve x-ray difraksiyon analizleri yapılmıştır.

Çalışmanın temelde bir yol projesi olması dolayısıyla deney seçimlerinde KTŞ (Karayolları Teknik Şartnamesi)' ye uygunluk temel prensip olarak benimsenmiştir. Bununla birlikte yapılan literatür çalışmalarında artık kireç stabilizasyonu konusunda netlik kazanmış bir prosedürün kabul gördüğü ve KTŞ'nin de bu standardı sağladığı anlaşılmıştır. Buna ilave olarak iki farklı malzemenin stabilizasyon performanslarını birbirine göre değerlendirmeye yönelik olarak bentonitik kil malzemenin mühendislik özelliklerindeki değişim değerlendirilmiştir.

Bentonitik kil malzemeye belirlenen oranlarda kireç ve Consolid A.G. firmasının önerdiği oranlarda C+S katkısı katılarak proktor deneyleri yapılmış ve maksimum kuru birim ağırlık ve optimum su içeriği değerleri tespit edilmiştir. Tespit edilen parametrelere göre her iki katkı grubunda ve farklı katkı oranlarında proktor kalıplarında hazırlanan numunelere CBR deneyi ile şişme yüzdesi tayini deneyleri yapılmıştır. Odeometre cihazında şişme basıncı, şişme yüzdesi ve konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Bunlara ilave olarak üç eksenli basınç, lineer büzülme, esneklik modülü ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Serbest basınç deneyleri yedi gün kür edilip tekrar edilmiş, buna ilaveten 7 gün kür edildikten sonra +20 santigrad derecede 24 saat -20 santigrad derecede 24 saat beş gün dönüşümlü kür edilerek deney tekrarlanmıştır. Deney 28 günlük kür sonrasında yeniden tekrar edilmiştir. Sonuçların mühendislik özellikleri üzerinde meydana getirmiş olduğu değişimler değerlendirilmiştir.

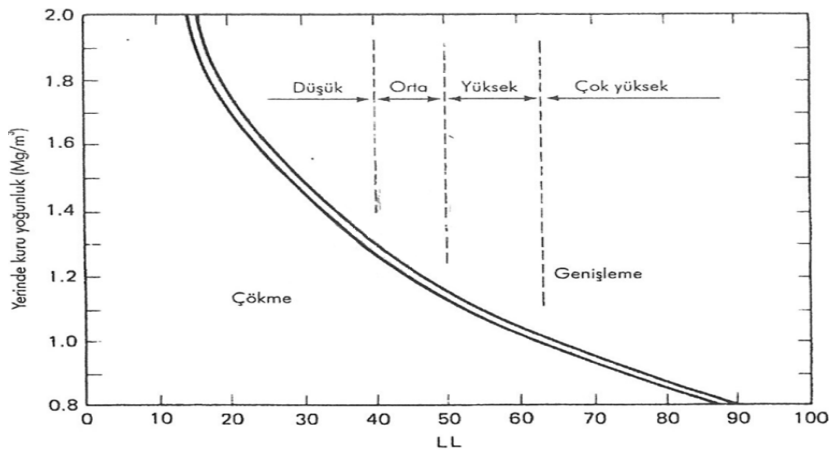
2. PROBLEMLİ ZEMİNLER

Proje alanında karşılaşılan problemli zemini tanımlayabilmek amacıyla incelenen kaynaklardan elde edilen sonuçlar bu bölümde özet olarak anlatılmıştır.

Bazı zeminler suyla karşılaştıklarında gösterdikleri yapısal değişiklikler nedeniyle diğerlerinden ayrılırlar. Plastisitesi yüksek zeminler, mineral yapıları, dane dizilimleri, doğal su muhtevaları, boşluk suyu özellikleri ve bulundukları ortamın çevre basıncına bağlı olarak aşırı hacim azalması veya artışı gibi olumsuz davranış gösterebilirler. Bu tip zeminlere problemli zeminler denilmektedir. Bu zeminler göçen zeminler, dağınık yapıli killer, donmaya duyarlı zeminler ve şişen zeminler olarak gruplandırılırlar [1].

2.1. Göçen Zeminler

Zeminler yük altında ve/veya bünyelerine su aldıklarında aniden önemli miktarda hacim kaybına uğrayabilirler. Bunun nedeni kurak iklim şartlarında oluşmuş ve daneleri kılcallık veya bir bağlayıcı ile tutturulmuş doymun olmayan zeminlerin ıslanma neticesinde bağlayan kuvvetlerin kaybolmasıyla boşluk oranlarında ani ve büyük azalmaların oluşumudur [1, 2].



Şekil 2.1. Göçen zeminler [2]

Şekil 2.1’de yerinde kuru birim ağırlık ve LL’e bağlı olarak zeminin göçme (çökme) sinin tespit edilmesine yönelik bir değerlendirme görülmektedir.

2.2. Dağınık Yapılı Killer

Bazı zeminler suyla karşılaştıklarında yağışla çok kolay erozyona uğrarken bazıları suyla sürekli bir arada olmalarına rağmen etkilenmezler. Dağınık yapılı zeminlerin özelliği boşluk suyunun içerdiği sodyum katyonlarının diğerlerine oranla yüksek olmasındandır. Dağınık (disperse) kil taneleri yüz yüze dokunmazlar. Bu tür zeminlerin kil içeriğinin %12’den fazla olması gerektiği belirlenmiştir [1].

2.3. Donmaya Duyarlı Zeminler

Zeminde donma bölgesine yakın yer altı su seviyesi olması veya uzakta ve hiç olmaması durumunda, zemin sıcaklığının en az -2 derece santigrada düştüğü zamanlarda, zeminin bünyesindeki suyun donması ile hacminde oluşan %9 luk artışının üstünde bir kabarma yapabileceği görülür [1]. Çizelge 2.1, dona en hassas zeminlerin silt ve iri kil oranının %15-25 olan zeminler olduğunu belirtmektedir.

Çizelge 2.1. Don hassasiyeti [2]

Grup	Don Hassasiyeti ve Tehlikesi	Zeminler
I	Yok	Çakıl Kum ve çakıllar
II	Orta	İnce kil ($C(2\mu m) \geq 40$) Kumlu Tiller %16 ince tane içeren killi tiler(0,06mm)
III	Yüksek	Silt, iri kil ($C(2\mu m)$ %15-25) Siltli tiller

2.4. Şişen Zeminler

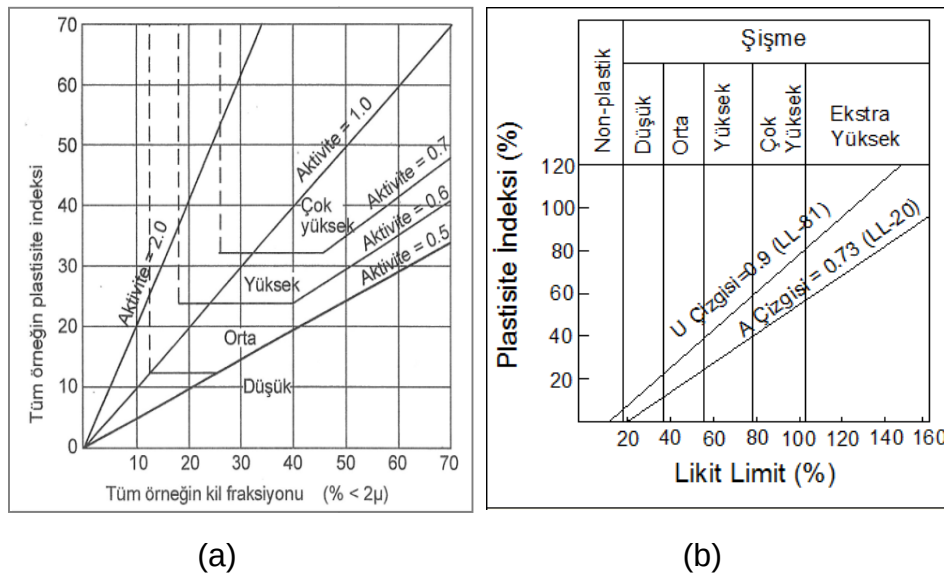
Su muhtevastaki artış ile birlikte yapılarında gözlenen hacim değışiklikleri, üzerlerine inşa edilen hafif mühendislik yapılarına zarar veren zeminlerdir. Bu tip zeminler yarı kurak ve kurak iklimlerde oluşmuş zeminlerdir. Yıl içindeki iklim farklılıklarına bağlı olarak oluşan tekrarlı şişme büzölme durumları yapılar altında destek azalması yaratarak yapılara çeşitli derecelerde zararlı olabilir. Yapılarına su aldıkça çöken zemin olmadıkları taktirde şişen zeminler bu suyu kaybettikçe hacimleri azalarak büzölme gösterirler. Bu tip etkiler daha çok CH CL sınıfı zeminlerde nadiren de ML-MH ve SC sınıfı zeminlerde gözlenebilir [1, 2]. Zeminin şişme potansiyeli pek çok faktör ile ilişkili olmasına rağmen temel olarak kil mineralojisi tarafından kontrol edilir [3]. Şişme özelliğinin kil mineral yapısı olarak montmorillonit ve illitlere özgü bir davranış olduğu söylenebilir. Yüksek plastisiteye sahip kaolinitler, yüksek plastisiteli montmorillonitlerden daha düşük şişme/büzölme gösterirler. Kendi hacminin yaklaşık 15 katı kadar şişebilen montmorillonit minerallerinin oluşumu ülkemizin de üzerinde bulunduğu yarı tropik ve yarı kurak iklim kuşağında görölmektedir [1, 3]. Hacim değıştirme son derece karmaşık bir özelliktir ve kil mineral yapısına bağlı olarak büyüklüğü değışebilir [2].

Şişen zeminlerde derinlerde hacimsel değışimlere sık rastlanmaz. Daha çok yüzeye yakın yaklaşık birkaç metrelik derinliklerde hacimsel değışimler gözlenir. Bu seviye aktif zon olarak belirlenir. Aktif zon boyunca su muhtevastının değışimi yaklaşık olarak aynıdır ve rutubet periyodik olarak değışir [3]. Bu zonun kalınlığı her yörede farklı olabilir genellikle 1-5 m arasında değışmekte olan bu bölgenin kalınlığı arttıkça şişme basınçları da artar. Bu zonun hacim değışimi 3-4 m kadar olabilir.

Killerdeki hacim değıştirme yatkınlığı, büzölme/şişme özelliğine veya miktarına bağlı olarak tanımlanır. Şişme özelliğine sahip ince daneli zeminler şişmeleri herhangi bir nedenle engellenecek olursa bu durumda yüksek şişme basıncı oluşturabilirler [1].

Doğal sistemlerde kil daneleri dağınık veya yumaklanmış (floklu) durumda ve gruplar halinde bulunurlar. Elektron mikroskobu ile gözlenebilen gruplar birleşip demetleri (cluster) meydana getirir ve demetler bir araya gelip gözle görülebilen topakları (ped) oluşturur. Topaklar arasındaki makro boşluklar bağlantılı olmakla birlikte demetler arasında bulunan mikro boşluklar ise bağlantılı değildir [1].

Şişen zeminleri laboratuarda tanımlamak için bazı sınıflandırma metotları geliştirilmiştir. Tipik olarak kullanılan metot Atterberg Limitleri ve/veya zeminin kil oranına göre ($2 \mu\text{m}$ 'den küçük), genel bir değerlendirme olup Şekil 2.2 a ve b'de gösterildiği şekildedir. C değeri hidrometre sonuçlarına göre belirlenir.



Şekil 2.2. Şişen zeminlerin PI ve LL'e göre değerlendirilmesi [3]
a) PI'a göre b) LL'e göre

Kil mineralleri doğal haldeyken hidratlıdır, yani her bir kil kristalini çevreleyen su tabakaları vardır. Eş. 2.1 ve Eş. 2.2'den hesaplanan kilin aktivite değeri dane boyutuna bağlıdır ve montmorillonitler kaolinitlerden daha aktiftirler (Çizelge 2.2). Skempton'a göre $A < 0,75$ ise aktif değil, $0,75 < A < 1,25$ ise normal aktif ve $A > 1,25$ ise aktif olarak yorumlanmaktadır. Aktivite arttıkça şişme potansiyeli de artmaktadır [1].

$$A=PI/C \text{ (Skempton 1953) [2].} \quad (2.1)$$

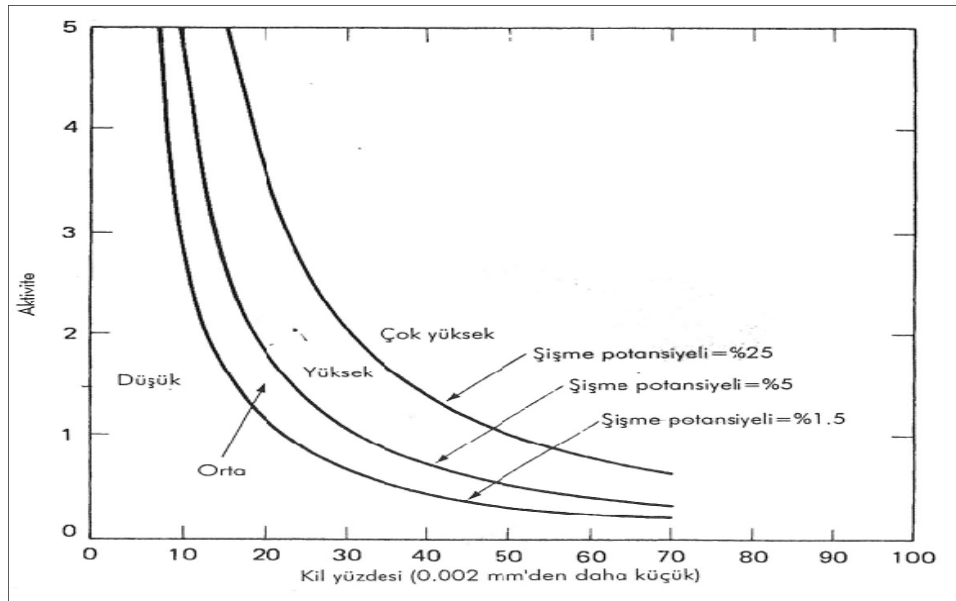
$$A=PI/(C-n) \text{ (Seed 1962) [2].} \quad (2.2)$$

Aktiviteye bağılı olarak şişme potansiyeli tahmini yapılabilmektedir (Şekil 2.3).

n: Katsayı (0 ila 9 arasında olup Skempton'a göre n=0) [1].

Çizelge 2.2. Değişik minerallerin aktiviteleri [1]

Mineral	Aktivite
Na Montmorillonit	4-7
Ca Montmorillonit	1,5
İllit	0,5-1,3
Kaolinit	0,3-0,5
Halloysit	0,5
Kalsit	0,2
Kuvars	0



Şekil 2.3. Şişme potansiyelinin aktiviteye göre sınıflandırılması [3]

Bu testlere ilave olarak şişme potansiyelini nitel olarak değerlendirebilmek için şişme yüzdesi, CBR, serbest şişme gibi deneyler yapılır. Bu testlerin sonuçları ile zeminin şişme potansiyelinin tahminine yönelik olarak Eş. 2.3 ve Eş. 2.4'tekine benzer olarak pek çok yarı ampirik korelasyon üretilmiştir [1].

$$\text{ŞP} = 3,6 \times 10^{-5} \times A^{2,44} \times C^{3,44} \quad (2.3)$$

$$\text{ŞP} = 2,16 \times 10^{-3} \times (PI)^{2,44} \quad (2.4)$$

Bu biçimde hesaplanacak şişme miktarına karşılık oluşacak şişme basıncını belirlemek gerekli olabilir [3]. Bu deney tek yönlü şişme potansiyeli deneyinin yapılabildiği odeometre cihazında yanal şekil değişimi engellenmiş biçimde belirlenebilir.

Çizelge 2.3. Şişme potansiyelini etkileyen zemin özellikleri [4]

Etken	Tanım	Araştırmacı
Kil Mineralojisi	Montmorillonit ve vermiculit mineralleri aşırı şişme, illit ve kaolinit mineralleri son derece az şişme gösterir. Aktif kil yüzdesi arttıkça şişme artmaktadır.	Grim(1968); Mitchell(1973,1976); Snethen et al.(1977)
Zemin ve Su Kimyası	Mg ⁺⁺ katyonları, Na ⁺ katyonlarına nazaran daha az şişme gösterir. Şişme artan katyon yoğunluğu ile artar	Mitchell(1976)
Zemin Su Emmesi	Zeminin su emmesi doymamış zeminlerde boşluksuyu basıncının kontrol ettiği efektif gerilmeyi etkileyen bir faktördür Zeminin su emmesi doygunluk, boşluk boyutu ve şekli, yüzeysel çekim, yerçekimi zemin danelerinin ve suyun elektrik ve kimyasal özelliklerine bağlıdır.	Snethen (1980); Fredlund ve Morgenstern (1977); Johnson (1973); Olsen and Langfelder(1965); Aitchison etal.(1965)
Plastisite	Wn ve LL büyüdükçe şişme/büzülme daha da artar. PI ve LL değerleri şişme potansiyeli için önemli bir göstergedir.	(Chen 1988)
Zemin Yapısı	Topaklanmış (flokül) yapı, dağılmış (dispersif) yapıdan daha çok şişme gösterir. Çimentolaşma şişmeyi azaltır. Yüksek su içeriğinde sıkıştırma ve örseleme ile zemin yapısı değişmektedir.	Johnson and Snethen (1978); Seed et al. (1962)
Kuru Yoğunluk	Yüksek kuru yoğunluktaki zeminler, genellikle daha fazla şişme potansiyeline sahiptir.	Chen(1973); Komornik and David (1969); Uppal (1965)

Şişme basıncı bazı zeminlerde oldukça yüksek olabilir. Böyle durumlarda hafif yapılarda ilave yüklemeler yapılmasını gerektirebilir. Ancak laboratuvar testleri yanal engellemeleri nedeniyle ve su durumunun yansıtılamaması nedeniyle araziye doğru modelleyememektedir [3].

Çizelge 2.4. Şişme/büzülme potansiyeline etki eden çevresel faktörler [4]

Faktör	Açıklama	Araştırmacı
1. Başlangıç Su içeriği ve kuru yoğunluk	Şişebilen zemin ne kadar kuru ise su emme o kadar fazla, ne kadar doygun ise su kaybı o kadar hızlı olur. Başlangıç kuru yoğunluk arttıkça daneler daha yakın olmakta, boşluk azalmakta ve şişme potansiyeli yüksek olmaktadır.	
2. Rutubet değişimi	Zeminin üst kısımlarındaki aktif bölgedeki rutubet değişimi, kabarma ile tanımlanır ve bu bölgede rutubet ve hacim değiştirmesi çok değişkendir.	Johnson(1969)
2.1. İklim	Yağış ve buharlaşmanın miktarı ve değişimi zeminin su içeriğine ve mevsimsel su emme derinliğine önemli ölçüde etki eder. En büyük kabarmalar yarı kurak iklimlerde kısa ıslak dönemlerde meydana gelir.	Holland ve Lawrence(1980)
2.2. Yeraltı Suyu	Siğ su tablası bir rutubet kaynağıdır ve değişen su tablası rutubet artışına katkıda bulunur. Yer altı su seviyesinin 5m'den daha az olması halinde zeminin suyu emmesi ve kabarması artar.	
2.3. Drenaj ve Su Kaynakları	Yüzeysel drenaj tedbirlerinin yetersizliği yüzeydeki su içeriğinin artmasına neden olur.	Krazynski(1980); Donaldson(1965)
2.4. Bitkilendirme	Ağaç, çalı ve çimen zeminden su emerek farklı su içeriğinde zemin yapısına ve rutubetin yoğunlaşmasına neden olur.	Buckley(1974)
2.5. Permeabilite	Yüksek permeabilite zeminler (fisürlü ve çatlaklı) suyun çabuk emilmesine neden olarak şişme hızını artırır.	Wise,Hudson(1971)De Bruijn(1965)
2.6. Isı	Isının artması kaplama veya bina altlarındaki daha soğuk alanlarda rutubetin artmasına neden olur.	Jhonson ve Stroman(1976); Hamilton (1969)
3. Gerilme Şartları 3.1. Gerilme Geçmişi	Aşırı konsolide olmuş zemin aynı boşluk oranındaki diğer tip zeminlerden daha fazla şişebilir. Şişme basınçları sıkıştırılmış kilin yaşı ile artabilir fakat düşük yükler altındaki şişme miktarı yaş ile ilgili değildir. Tekerrür eden ıslanma kuruma ile laboratuvar numunelerinin şişmesini azaltır, fakat belli bir sayıdan sonra şişme üzerine etkisi yoktur.	Mitchell(1976); Kassif ve Baker(1971)
3.2. Arazi Şartları	Zeminin başlangıç gerilme durumu tahmin edilerek daha sonraki gerilme durumu ve/veya rutubet değişimi göz önüne alınmalıdır. Başlangıç efektif gerilme numune alımı ve deneyle veya arazi ölçümleri ile saptanabilir.	
3.3. Yükleme	Sürşarj yükünün büyüklüğü hacim değiştirme miktarını belirler. Harici yükler daneler arası çekim kuvvetini dengeler ve şişmeyi azaltır.	Holtz(1959)
3.4. Zemin Profili	Potansiyel şişebilen tabaka kalınlığının ve profildeki konumunun potansiyel hacim değiştirme üzerinde belirli bir etkisi vardır. Maksimum hacim değiştirme aktif bölge altında yüzeyden derinlere doğru azalır. En küçük hacim değiştirme ise şişmeyen zeminler üzerindeki şişebilen zeminlerde veya siğ derinlikte kayalık zeminler üzerindeki zeminlerde görülür.	Holland ve Lawrence(1980)

Şişme potansiyelini etkileyen zemin özellikleri Çizelge 2.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 2.5. Şişen Zeminlerin Sınıflandırılması [4-6]

Referans	Kriter							Parametre
Chen (1983)	PI		LL		Şişme Potansiyeli			PI
	0-15 10-35 20-55 >55		<30 30-40 40-60 >60		Düşük Orta Yüksek Çok Yüksek			
Altmeyer (1955)	RL	SL	Olası Şişme (%)			Şişme Derecesi		RL: Rötire Limiti SL: Lineer Büzülme
	<10 10-12 >12	>8 5-8 0-5	>1,5 0,5-1,5 <0,5			Kritik Sınır Kritik Değil		
Chen (1965)	<No200	LL(%)		SPT	Olası Şişme (%)	Şişme Derecesi	Şişme basıncı (ksf)	LL: Likit Limit SPT: N Sayısı No:200'den Geçen malzeme miktarı
	<30 30-60 60-95 >95	<30 30-40 40-60 >60		<10 10-20 20-30 >30	<1 1-5 3-10 >10	Düşük Orta Yüksek Çok Yüksek	1 3-5 5-20 >10	
Sowers (1970)	RL	PI		Potansiyel Hacim Değiştirme				RL PI
	>12 10-12 <10	<15 15-30 >30		Muhtemelen Düşük Muhtemelen Orta Muhtemelen Yüksek				
Raman (67)ve(73)	PI	BI		Şişme Derecesi		LL		BI: Büzülme İndeksi PI BI=LL-RL
	<12 12-23 23-32 >32	<15 15-30 30-40 >40		Düşük Orta Yüksek Çok Yüksek		20-35 35-50 50-70 >70		
Ranganatham Satyanarayana (1965)	BI			Potansiyel Şişme Sınıflaması				BI: Büzülme İndeksi
	<20 20-30 30-60 >60			Düşük Orta Yüksek Çok Yüksek				
Saito – Miki (1975)	PR	Potansiyel Hacim Değiştirme (%)			Potansiyel Şişme			PR: Plastisite Oranı PR=PI/PL
	<0,6 0,6-1,0 1,0-2,0 >3,0	<3 3-10 10-50 >50			Düşük Orta Yüksek Çok Yüksek			
Seed, Woodward, Lundgren (1962)	Potansiyel Şişme (%)			Şişme Derecesi		PI		Odeometre test sonucu
	0-1,5 1,5-5,0 5,0-25,0 >25,0			Düşük Orta Yüksek Çok yüksek		<10 10-20 20-35 >35		
Vijayvergiya, Ghazzaly (1973)	W _n /LL		Olası Şişme Basıncı		Olası Şişme (%)			W _n : Doğal Su içeriği LL
	>0,5 0,37-0,50 0,25-0,37 <0,25		<3 t/m ² 3-12 12-30 >30		<1 1-4 4-10 >10			

Çizelge 2.5. (Devam) Şişen Zeminlerin Sınıflandırılması [4-6]

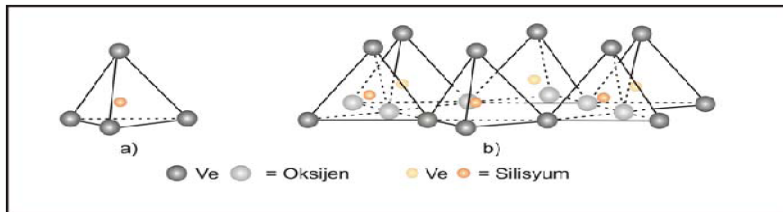
SBR (1959)	<1 µm(%)	PI	RL	Muhtemel Şişme (%)	Şişme	Şişme pot.	<1µm kolloid PI RL
	<15 13-23 20-31 >28	<18 15-28 25-41 >35	>15 10-26 7-12 <11	<10 10-20 20-30 >30	Düşük Orta Yüksek Çok Yüksek	<1.5 1,5-5 5-15 >25	
Holtz ve Gibbs (1956)	No.200 den geçen(%)		PI	RL	Şişme Potansiyeli	Muhtemel şişme % si	No:200' den geçen malzeme miktarı PI RL 1psi basınç altında
	<13 13-23 20-31 >28		<18 15-28 25-41 >35	<10 10-20 20-30 >30	Düşük Orta Yüksek Çok Yüksek	<10 10-30 20-30 >30	
UBC (Uniform Building Code) (1968)	Şi			Şişme Potansiyeli		Şi: Şişme İndeksi Şi:%Şişme x 100xNo.4'den geçen malzeme miktarı Odeometre testi	
	0-20 21-50 51-90 91-130 >130			Çok Düşük Düşük Orta Yüksek Çok Yüksek			
Snethen (1984)	LL	PI	ζ _{doğ} (ton/m ²)	Şişme Potansiyeli (%)	Şişme Derecesi	LL, PI ζ _{doğ} : Doğal su emmesi (negatif u)	
	<30 30-60 >60	<25 25-35 >35	<14,5 14,5-40 >40	<0,5 0,5-1,5 >1,5	Düşük Orta Yüksek		
FHWA (1977)	LL	PI	ζ _{doğ} (ton/m ²)	Şişme Potansiyeli (%)	Şişme Derecesi	LL, PI ζ _{doğ} : Doğal su emmesi (negatif u)	
	>60 50-60 <50	>35 25-35 <25	>40 15-40 <15	>1,5 0,5-1,5 <0,5	Yüksek Orta Düşük		
Louisiana Karayolları	LL		PI		Potansiyel Şişme		LL PI
	20-49 50-70 >70		15-24 25-46 >46		Düşük-Orta Yüksek Aşırı yüksek		
Kansas Karayolları (1974)	PI			Potansiyel Şişme		PI	
	<15 15-35 >35			Düşük Orta Yüksek			

Bunlara ilave olarak şişme büzülme potansiyeline etki eden çevresel faktörler Çizelge 2.4'te özet şekilde verilmekte ve Çizelge 2.5'te de şişen zeminlerin sınıflandırılmasına ait çeşitli yaklaşımlar derlenmiştir.

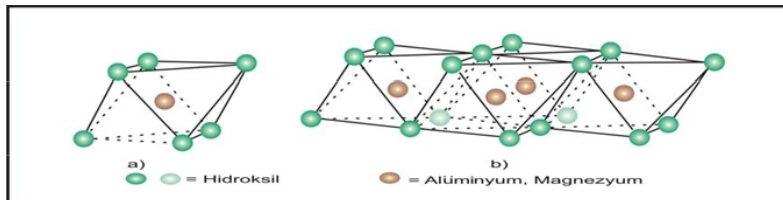
Sınıflandırma sayesinde şişme miktarı ve/veya basıncı belirlenerek yapılarda oluşacak ilave gerilmeler tespit edilebilir ve gerekli önlemlerin alınması mümkün olabilir.

2.4.1. Killerin yapısı

Geoteknikte zeminde bulunan kil türünün zeminin geçirimliliği, şişme-büzülme davranışı sıkışabilirlik ve kayma dayanımı gibi özelliklerini etkilemesinden ötürü önemi bulunmaktadır. Kilin karakterini kazanmasında, kayacın türü ortamın sıcaklık ve pH değeri vb rol almaktadır. Killer mineral yapıları oldukça karmaşık, hidratlı, alüminyum, magnezyum ve demir silikatlardan oluşmuş minerallerdir [1, 4]. Dane boyutları 2 μ 'dan küçük olan yapılardır. Kil mineralleri kayaçları oluşturan birincil minerallerin ayrışmasıyla oluştukları için ikincil silikatlar olarak adlandırılırlar. Kil mineralinin oluşumuna etki eden ilk unsur ana kayaç içinde olduğu ortamın iyon içeriği, sıcaklığı ve pH değeridir [1, 7]. Kilin iki esas yapısı vardır. Birincisi Silika tetrahedron (bir silika atomu etrafındaki dört oksijen atomuna bağlanarak oluşmaktadır (Şekil 2.4.a)) ve ikincisi Alimina oktahedron (alüminyum iyonu sekizgen bir koordinasyonla oksijen ve hidroksillere bağlıdır (Şekil 2.4.b)) yapılardır. Bir oksijen iki tetrahedron tarafından paylaşılıyorsa levha şeklini alır. Buna benzer olarak her alümina atomu iki oktahedron tarafından paylaşılıyorsa levhaya benzer bir yapı görünür [1].



(a)



(b)

Şekil 2.4. Kilin mineral yapısı a) Silika tetrahedron b) Alimina oktahedron [8]

Kil minerallerinin çoğunun atomik yapısında iki birim göze çarpar. Bu birimlerden bir tanesi oktahedral düzen şeklinde adlandırılan ve alüminyum, demir veya magnezyum atomları ile oksijen veya hidroksillerce doldurulan tabakalardan oluşur.

Şişen zeminlerde şişme potansiyeli kilin mineral yapısı ile açıklanır. X ışını analizleri, kimyasal analizler, farklı ısı analizleri ve elektron mikroskobu yöntemi gibi analizler ile kil minerali tanımlanabilir. X-ışını yöntemi Çizelge 2.6.'da özetlenmiştir.

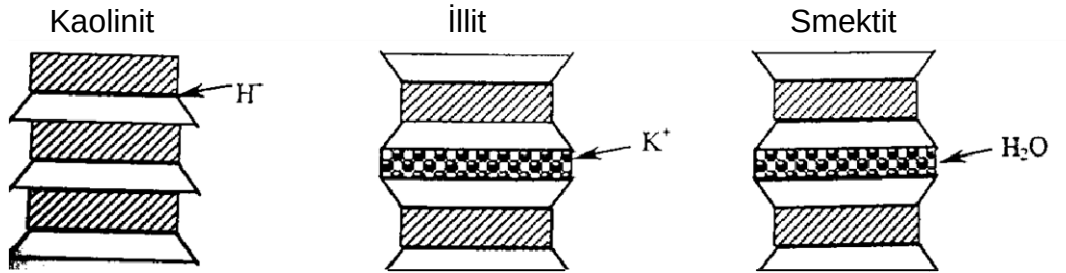
Çizelge 2.6. Kil minerallerinin X ışını analizi [1]

Kullanılan Teknik	Ulaşılan bilgi	
Toz örnekler >2µm ≤2µm	Kil olmayan mineraller Dioktahedral Kil Trioktahedral Kil	
Toz Örnek	14-15 A" mineraller 10 A" mineraller 7 A" mineraller	Smektit Vermiküllit Karışık Klorit İllit Sulu halloysit Kaolinit Metahalloysit Serpantin
Gliserolle işlem görmüş	17-18 A" mineraller 14 A" mineraller 10,5-11 A" mineraller	Smektit Şişen klorit Vermiküllit Halloysit
550° C - 600° C ye ısıtılmış	14 A" mineraller 10 A" mineraller 7A" mineraller	Klorit Smektit Vermiküllit Yansımalar kaybolur.

Smektit grubu killerin (montmorillonit) havada kurutulduğunda, tabaka aralığı 12-15 A" iken, etilen glikolde ön işlem görürse 17-18 A" ya yükselir. Etüvde kurutulursa, tabakalar arası su moleküllerinin çıkması sonucu 10 A" ya düştüğü gözlenir. 1A": Angöström ($1\text{mm} = 10^{-6} \mu\text{m} = 10^9 \text{A}''$)

2.4.2. Kil minerallerinin sınıflandırılması

Killerin sınıflandırılmasında esas alınan özellikler bir hücre veya tabaka kalınlığı, tabakanın di-tri oktahedral özelliği ile iyon içeriği ve tabakaların diziliş-diziliş düzenidir (Şekil 2.5). Tabakaların diziliş ve diziliş düzeni killeri benzer mühendislik özelliklerine göre ayırdığından kabul görmektedir [1].

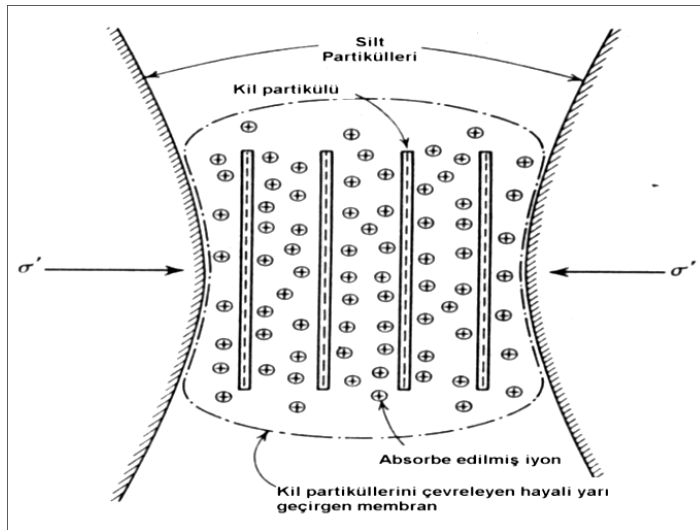


Şekil 2.5. Değişik kil minerallerinin yapısı [7]

Kaolinit mineralleri genel olarak şişme potansiyeline sahip değildir, illit minerali az veya çok şişme gösterse de, genellikle problem yaratmamaktadır. Montmorillonit minerali ise, aşırı şişme gösteren ve problem yaratan bir kil mineralidir. En büyük yüzey alanı ve buna bağlı olarak yüzeysel çekim kuvveti en fazla olan montmorillonit mineralidir ve oldukça fazla su absorbe edebilir [2].

Dane çapı küçüldükçe toplam yüzey alanı artar ve bunun sonucunda yüzeysel çekim kuvvetleri büyür. Kil mineralleri yapısal özelliklerine bağlı olarak anyon (negatif iyon) ve katyon (pozitif iyon) absorbe etme ve değiştirebilir durumda tutabilme özelliğine sahiptir. Kil minerali değişebilir iyonları, yapısı etrafında tutar. Kil minerallerinde en sık karşılaşılan katyonlar Ca⁺, Mg⁺, H⁺, K⁺, NH₄ ve Na⁺ olarak sayılabilir. Kilin solüsyondan iyon absorbe etme yeteneği katyonları anyonlara nazaran daha kolay absorbe etmesine neden olur. Fiziko kimyasal etkiler ile anyon katyon değişimi olabilir. Katyon değişim kapasitesi arttıkça şişme potansiyeli de artmaktadır. Doğal ortamlarında genellikle birden fazla kil minerali bir arada bulunur [1].

Zemin ortamında gerçekleşen kuruma büzölmelerle iç basınçlar artarken plak şeklindeki kil partikülleri eğilme, deforme olma ve bozulmalar ile elastik yapısal değişikliğe uğramaktadır. Islanma ile şişme sırasında ise, boşluk suyu basınçlarında azalma oluşarak gerilmeler düşmekte ve daneler arasında çekim kuvvetlerinin artışı ile suyun hacmi artmaktadır. Plaklar şeklindeki kil partiküllerinin yüzeyi negatif elektrik yüklü iken, kenarları ise pozitif elektrik yüklüdür. Negatif elektrik yükleri zemin/su fazındaki katyonlar ile dengelenmekte ve plakaların yüzeyinde elektrik kuvvetleri oluşmaktadır. Daneler arasındaki elektrik kuvvet alanı hem negatif elektrik yüklü hem de zemin/su yapısındaki elektro-kimyasal özelliklerin fonksiyonudur [7]. Kil plakalarının paralel dizilimi Fiziko kimyasal ve elektro-kimyasal etkiler ile açıklanmaktadır. Şekil 2.6'dan da görüleceği üzere, plakalar arasındaki su aracılığı ile çekim kuvvetleri dengelenmektedir [7].



Şekil 2.6. Kil plakalarının dizilişi (Krebs ve Walker, 1971) [5]

Kil daneleri arasında başlıca iki çekim kuvveti vardır. 1) Elektro statik kuvvetler 2) Van der Waals kuvveti. Silika levhalarının tepesini bağlayan Van der Waals kuvvetlerinin zayıf olması ve oktahedral levhada negatif yük boşluğu olmasından dolayı su ve değişebilir iyonlar katmanlar arasına girerek bunları ayırabilmektedir. Bu nedenle iki silika levhası ve bir alümina levhasından oluşan (2:1) en küçük boyutlu kil minerali olan montmorillonit

kristali, çok yüksek su çekim gücüne sahiptir. Montmorillonitlerde tabakalarda iyonik yer değiştirmeler negatif yük belirmesini sağlar ve su ve organik sıvıların araya girmesi ile hacimsel bir artış başlar bu önlendiğinde de yüksek şişme basınçları oluşur. Artan şişme basıncı hafif yapılara ve yol kaplamalarına zarar verebilmektedir [1].

2.4.3. Bentonit

Bu kısımda proje alanında tanımlanan bentonit-kil bölge ile ilgili olarak kısa bir bilgi verilmesi gereği duyulmuştur:

Alüminyumca zengin volkanik kül ile lavların ayrışmasından oluşan, ağırlıklı olarak simektit grubu kil minerallerinden meydana gelen ve diğer kil minerallerini de ihtiva eden killerin kalitelerini fazla bozmadan yer değiştirmiş olanlarına Bentonit, yer değiştirerek başka yabancı unsurlarla birlikte bir havzada tabakalar halinde çökelmiş olanlarına da Bentonitik Kil denir [8].

Mineralojik olarak; büyük oranda montmorillonit ($5Al_2O_3 \cdot 2MgO \cdot 24SiO_2 \cdot 6H_2O(Na_2O, CaO)$) içeren killeri "Bentonit" olarak tanımlanır. Montmorillonitin yanı sıra Beidellit ve Saponit de, bentonit türü killerde yer alan simektit grubu diğer kil mineralleridir. Bentonit kristal yapısında Na^+ , Ca^{++} veya Mg^{++} katyonları ile yer değiştirebilir. Zeolit grubu hariç diğer minerallerden çok daha fazla iyon değiştirme kapasitesine sahiptir. Bentonit dengesiz negatif yükünden dolayı su içinde birbirlerini iterek suda mükemmel dispersiyon özelliği gösterir. Simektit grubu kil mineralleri içinde tabakalar arasındaki katyonun türüne göre bentonitler üç farklı şekilde bulunurlar [8];

Na – Bentonit

Değişebilir katyon olarak Na bulunduran bu bentonitler yüksek şişme kapasitesine sahip olup, Wyoming bentoniti olarak da adlandırılmaktadır. Bu özelliği ile sondaj çamurunun en önemli malzemesidir.

Karışık Tip Bentonit

Bentonit Ca ve Na-simektitlerin karışımından meydana gelmektedir. Bu tür bentonitleri oluşturan simektitlerde 12,5 Å ve 15,5 Å değerinde 2 adet d(001) pik değeri gözlenmektedir.

Ca – Bentonit

Ca iyonlarının değişebilir katyon olarak bulunduğu bu bentonitler daha az şişme kapasitesine sahiptir.

Simektit kil grubu üyesi minerallerden olan bentonitlerin şişmesi ve dağılması 2:1 tabakaları arasındaki katyonların türü ve miktarı ile yakından ilgilidir. Simektitlerin 2:1 tabakaları arasında doğal olarak genellikle Na^+ ve Ca^{+2} katyonları bulunmaktadır. Na/Ca eşmolar oranı yükseldikçe simektitlerin şişmesi artmaktadır. Şişme daha çok Van der Waals kuvvetlerinden kaynaklanmakta olup bu kuvvetler yükselen sıcaklıkla azalmaktadır [9].

3. ZEMİN STABİLİZASYONU

3.1. Giriş

Zemin stabilizasyonu, kısmen veya tümünden, çimentolaşma ve zeminin yapı malzemesi olarak kullanıldığı durumlarda drenaj, sıkılaştırma ve güçlendirme kontrolü için, fiziksel ve kimyasal yöntemlerin bileşimidir.

Zemin stabilizasyonu, yapı temelinin veya temel zeminin taşıma gücü kapasitesini ve servis ömrü boyunca mühendislik yapılarının çevresindeki fiziksel ve kimyasal gerilmelere karşı direncini arttırmak için, zeminin katkılı veya katkısız biçimde düzenlenmesidir. Zeminin pek çok özelliği, örneğin dayanım, sertleşme, sıkışabilirlik, geçirgenlik, işlenebilirlik, şişme potansiyeli, don hassasiyeti, su hassasiyeti ve hacim değiştirme eğilimi, pek çok zemin stabilizasyon yöntemi kullanılarak değiştirilebilir. Bu yöntemler, toprak agrega karışımı veya karışık zemin hazırlanması ile zemin gradasyonunun düzenlenmesi ve basitçe sıkıştırmadan, katkıların uygulanması yanı sıra termal ve elektro kinetik yöntemlere kadar sıralanabilir. Stabilizasyondaki yeni teknikler arasında, zemini kirletici maddeden arındırma ve bozulmuş zeminlerin stabilizasyonu için kullanılan, camlaştırma ve elektro-ozmoz vardır [10].

3.2. Zemin Stabilizasyonunun Prensipleri

Zemin stabilizasyonu, herhangi bir fiziksel, kimyasal veya biyolojik yöntemin veya bu yöntemlerin herhangi bir bileşiminin, doğal zeminin belirlenmiş özelliklerini, tasarlanmış mühendislik uygulamasında yeterli olarak hizmet etmesi için geliştirmede kullanılan genel bir terimdir. Zemin stabilizasyonu terimi, yalnızca zeminin doğası, mühendislik gereksinimleri ve çevresel durumlar uygun şekilde tanımlandığında kesin bir anlama sahip olur [10].

Geoteknik mühendisliği uygulamalarında genel yaklaşım, zemin stabilizasyonu iki bölümde değerlendirmektedir:

1. Sığ temellerin inşaatı için, özellikle karayolları, havaalanları, park sahaları ve benzeri tesisler için, doğal zeminlerin iyileştirilmesi.
2. Derin temelli zeminlerin Mühendislik uygulamaları için veya büyük zemin kütlelerinin (örneğin barajların ve bentlerin inşaatında) erişimde zorluk, ebat veya kütle zeminin yeri nedeniyle, enjeksiyon işlemiyle iyileştirilmesi.

Yukarıdaki uygulamalarda, amaç sıklıkla dayanıklılık, mesnet oluşturmak ve doğal ve/veya insan yapımı çevresel bozucu güçlere karşı direnci artırmak, geçirimsizliği, hacim değişim eğilimini ve oturmayı azaltmak ve stabiliteyi arttırmak yoluyla temel zeminlerin veya toprak yapıların uzun dönem performansının sağlanmasıdır [10].

3.3. Zemin Stabilizasyonunun Uygulanması

Zemin stabilizasyonunda bir görüş, zeminin çevreyle dinamik etkileşimine dikkat çekmektedir. Zemin stabilizasyonu, kayma dayanımında ve kesme direncinde artıştan veya zeminin diğer fiziksel özelliklerini iyileştirmeden daha fazlasıdır. Tekrarlı dinamik yüklerle, günlük ve mevsimsel sıcaklık ve nem değişikliklerine, mikrobik ve diğer biyolojik aktivitelere ve doğal veya insan yapımı sebeplere, kimyasal dengesizliklere birleşmiş bir zemin sistemine karşı, bir koruma mekanizması sağlamalıdır. İnşaat esnasındaki çevresel durumlar, zaman içinde bu koşulların rastgele veya periyodik varyasyonları ve bu varyasyonların ilgili genlik sistemin bütünlüğünü anlamlı bir biçimde etkileyebilir. Bu koşulların bazıları; sıcaklık aşırılıkları, su baskını, güneş ışığına maruz kalma, çevrimsel donma/çözülme, doygunluk derecesi, temas suyunun tipi (tatlı veya tuzlu), çevrimsel nemlendirme/kuruma, süzülme veya drenaj, kimyasal ihlal, malzeme hazırlama ve yapım sıralaması. Örneğin bir zeminin stabilizasyon gereksinimleri, zemin yapısının sıcaklık ve nem

varyasyonlarının, en büyük genliği sergilediği kaplama yüzeyine yakınlığının artmasıyla artabilir. Benzer biçimde, aynı zemin tipinde ve aynı trafik yükü ve frekansı için inşa edilmiş bir karayolu temel tabakası için, şiddetli iklimde bulunan yerler, ılıman iklimdeki yerlerden daha fazla stabilizasyon gereksinimlerine sahiptir. Bundan dolayı mekanik dayanıklılık ve sürekliliğin ortaya konulması, yalnızca özel şartlar için ve saptandıkları iklimsel bölge dâhilinde anlamlıdır [10].

Zemin stabilizasyonu çalışmaları ve uygulaması arasında bir ayırım yapılmalıdır. Önemli olan gözlemler ve deneyimlerle toplanmış ampirik bir yaklaşım olan, mantıklı bilimsel yapının, sabit bilimsel prensipler ve yasalara uygun olarak koordine edilmesidir. Bu yapı, hem uygun yerleşim ve deneyimlerden yararlanmak için mantıksal bir sonuç ortaya koyar, hem de aynı zamanda henüz bilinmeyen bir bölge için bir ara değerin bulunmasını sağlamış olur, bu nedenle değerli bir tahmin aracı olarak hizmet eder. Sonuç olarak zemin stabilizasyonu çalışmaları, güncel deneyimin eksik olduğu ortamlara, zemine ve iklimsel sahalara, uygulamanın erişmesi için en önemli yoldur [10].

Stabilize edilmiş bir zemin, bir yapı malzemesi olarak, geleneksel inşa malzemelerinin temel mekanik ve kimyasal dayanım özelliklerine ve yapısına benzemelidir [10].

Zemin stabilizasyonu, (1) bir zeminin dayanıklılık özellikleri ve bu özelliklerin fiziksel, fizikokimyasal veya kimyasal anlamda tasarlanmış kullanımı için gerekli iyileşmeyi tanımlamalı, (2) iyileşme gereksinimlerinin uygun malzemelere ve işlemlere dönüştürerek, özel olan yöntem veya yöntemlerin ekonomiklik, fizibilite veya özel değerlendirmeler temelinde kullanılması kararını ortaya koymalı, (3) yapım sırasında, genellikle malzemenin hazırlanmasından oluşan (yerinde veya laboratuvarda), uygulama ve çalışmayı değerlendirmeli, (4) ve malzemelerin, inşaatın ve servis ömrü

boyunca yapının bakım maliyetleriyle ilgili ekonomik değerlendirmeleri kapsamalıdır.

3.4. Zemin Stabilizasyonu Yöntemleri

Zemin stabilizasyonu için pek çok teorik ve pratik olasılıklar arasında, aşağıdakiler pratik ve ekonomik çözümler olarak saptanmıştır [10].

3.4.1. Granüler stabilizasyon

Granüler destek iskeletli dolgu teşkili. Bu yöntem doğal ve dışarıdan gelen malzemelerle çimentolama (kil ve diğer betonlar ve harçlar) yoluyla modifiye edilerek, bazı dane boyutunda danelerin atılması veya ilavesi ile uygulanan fiziksel ve kimyasal stabilizasyon yöntemlerinin bir bileşimi olan, mekanik bir stabilizasyon yöntemidir. Bu konuda yapılan çalışmalardan örnekle, bentonit kil malzemeye doğal ağırlığının %5 ile %10'u arasında kum karıştırılarak geoteknik özelliklerinin değişimi incelenmiştir. Bentonit oranı azaldıkça LL değerinin azaldığı, %2 ve daha az bentonit oranlarında, karışımın kil davranışı sergilediği tespit edilmiştir [11]. Kil malzemeye kuru ağırlığının %20'si oranında boşluklu agrega ile kireç ve %20 kaya tozu ve kireç katıldığında kilin şişme basınçlarında önemli azalmalar olduğu belirlenmiştir [12]. Bir başka çalışmada, %85-90 gibi farklı sıkışma yüzdelerinde %30-70 arasında bentonitli kum karışımları için, şişme basıncı ve toplam emme davranışları değerlendirilmiştir. Şişme basıncının kuru birim ağırlık ve bentonit oranının bir fonksiyonu olduğu, buna ilave olarak toplam emmenin de karışımın su muhtevası ve bentonit oranının bir fonksiyonu olduğu sonucuna varılmıştır [13].

3.4.2. Kimyasal stabilizasyon

Bir veya daha fazla kimyasal bileşiğin zemine iyileştirme için katılması yöntemlerini kapsar. Bir kaç basit kimyasal eşitlikle açıklanabilecek bir

kimyasal reaksiyon serisi, katkılar ve zemin öğeleri arasında yer alır. Zeminle katkılar arasında oluşabilecek bazı reaksiyonlar; hidratasyon, iyon-değişimi, puzolanik reaksiyon (çimentolaşma), yumaklaşma, çökelme, polimerleşme, oksidasyon, ve karbonatlaşmadır. Değişik stabilizasyon amaçları için çok sayıda kimyasal ve katkı kullanılır. Şevleri korumak ve toprak erozyonunu önlemek için bitki örtüsü ve biyoteknik stabilizasyon konusu da kimyasal stabilizasyon konusu içinde göz önünde tutulabilir, zira kimyasalın yanı sıra biyolojik işlemler de stabilizasyon uygulamalarıyla ilişkilidir. Zaman zaman kimyasal stabilizasyon yöntemlerinin kullanılması, ekonomik ve çevre güvenliği söz konusu olduğunda engellenebilir. Bazı yaygın kullanımlar ve geliştirmekte olan sistemler şöyledir:

a) Zemin-Çimento (Portland çimentosu): Çimento katkısı, zeminin likit limitinin azalmasını ve plastik limitinin artmasını sağlayarak killerin işlenebilirliğini artırmaktadır. Killerin çimento ile stabilizasyonunda, No.200 elekten geçen miktarın %40'dan az, LL değerinin 45-50 arasında ve PI değerinin 25'den az olması durumunda etkin sonuçlar oluşturmaktadır. Stabilizasyonda kullanılacak çimento miktarı zeminin sınıfına göre %6-14 arasında değişmektedir. Yapılan bir çalışma kalsiyumlu killerin, sodyum ve hidrojen içerenlere nazaran çimento ile daha iyi reaksiyon gösterdiğini belirlemiştir [14]. Şiran kiline %4-8-12 çimento katılarak yapılan çalışmalarda artan katkı oranı ile taşıma gücünün arttığı belirlenmiştir [15]. Diğer bir çalışma bentonit kiline %3-6-9 oranlarında katılan çimentonun maksimum kuru yoğunluğu artırdığını ortaya koymaktadır. Buna ilaveten şişme basıncı değerinin de düştüğü tespit edilmiştir [16].

b) Zemin-Kireç: Kil zemine kireç katıldığında bünyesindeki kalsiyum iyonları artırılmış olur. Bu iyonlar kil bünyesinde bulunan sodyum ve potasyum iyonları ile yer değiştirme eğilimine girerler. Kireç ilavesi ile plastisite indisi düşer ve şişme potansiyeli azalır. Yapılan bir araştırmanın laboratuvar çalışmaları %1-3-5-8 kireç katılarak uygulanmış ve bu sonuçları doğrulamıştır. Aynı çalışmada çimento ile stabilizasyonu da düşünülen kilin

maliyet karşılaştırması yapılmıştır. Kirecin ucuz bir çözüm olduğu sonucuna varılmıştır [17]. Farklı bir araştırma ilave edilen kireç oranının %2, 3, 4, 6 şeklindeki artış ile pH değerini arttırmıştır. Karışımın CBR değerleri katkı oranıyla ve kür süresi ile doğru orantılı olarak yükselmiştir [18,19].

c) Zemin-Bitüm: Zemin bitüm karışımı ile modifiye granüler taşıma iskeleti oluşturulabilir. Kum-bitüm karışımı ile zemine eklenen kohezyon, su geçirmez granüler stabilizasyon yaratmış olur; (Asfalt Enstitüsü, 1974, 1982; Baker ve arkadaşları, 1975; Johnson, 1976)

d) Zemin-Reçine: Küçük miktarlarda reçineli su geçirmez kohezyonlu zeminler oluşturulabilir (zeminin kuru ağırlığının %2'sinden küçük). Su geçirmez ve çimentolu kohezyonlu veya kohezyonsuz zeminler, yapay veya doğal reçineler vasıtasıyla, örneğin çimento-reçine karışımları (polimer çimentolar) ile veya organik reçineler (epoksi, akrilik, poliakrilat, poliüretan, solvinize (solvinated) reçineler) ile oluşturulabilir. (Bell, 1975; WES, 1977; Kezdi, 1979; Mitchell, 1981).

e) Zemin-Enerji Santrali Atıkları: Kohezyonlu zeminlerin, uçucu kül, dip külü, BGD (Baca gazı desülfirizasyonu) ve çamurlaşmış tortu formunda bulunabilen volkanik mineral kömür tozu eklenerek yapılan stabilizasyondur. Bu silika artıklarının özellikleri, yakıt olarak kullanılan kömürün tipine bağlıdır. Puzolanik reaksiyonun oluşması için kireç eklenmesi gerekebilir. (Hecht ve Duvall, 1975; Meyers ve arkadaşları, 1976; Covey, 1980; Usmen ve arkadaşları, 1983; Pamukçu ve arkadaşları, 1987; ASCE, 1987) [10]. Literatürde silis dumanı, uçucu kül ve mikro cem katkıları ile stabilizasyon çalışmaları örneklerine rastlanmaktadır. %3, 5, 7, 10, 13 katkı oranlarında C tipi uçucu kül katıldığında, dispersif kilin likit limit değerleri artmış, plastik limitleri azalmış, özgül ağırlıkları azalmış ve optimum su içeriği artarak birim ağırlıkları azalmıştır [20]. Başka bir çalışma ise CBR değerinin, %10-20 arasında değişen C tipi uçucu kül oranlarında, %1'den %60'lara yükseldiğini belirlemiştir [21].

f) Diğerleri: Tuzlar (klor), asitler (fosforik asit), odun özü, saklama için termoplastik materyaller (katran, asfalt, polietilen), sodyum ve kalsiyum silikatlar, kalsiyum alüminatlar, sülfür, sülfatlar, potasyum, demir oksit, hidroksi-alüminyum, çimento temelli (kireç-alçı-alüminyum oksit), turbanın volkanik külü ve tarımsal atık (pirinç, yer fıstığı ve renkli fasulye kabuğu, şeker kamışı lifi), hidro-örtü malzemeleri (ağaç elyafı, atık kağıt, selüloz lapası) seramik atığı, maden atıkları stabilizatör olarak kullanılabilir (WES, 1977; Pojasek, 1982; Eggestad, 1983; Cincotto, 1984; Cook, 1984; Ghavami ve Fang, 1984; ASCE, 1987).

3.4.3. Termal stabilizasyon

Uzun veya kısa dönem için ısıtma veya soğutma yoluyla, zor zeminlerin özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılan fiziksel bir stabilizasyon yöntemidir [10].

a) Kızdırma: Zeminleri, fiziksel özelliklerinde kalıcı değişiklikler oluşturmak için yanma, elektrik, mikrodalga veya lazer ışını uygulaması gibi yöntemlerle, yüksek sıcaklıklara (tipik olarak 300 °C'nin üstüne) ısıtmak biçiminde tariflenebilir (Jurdanov, 1978; Eggestad, 1983). Isıtma yöntemleri iki gruba ayrılabilir. (1) Yol brülörleri kullanarak yerinde iyileştirme yapılarak veya zemine yerleştirilmiş elemanların ısıtılması şeklinde. (2) Geri dolgu zeminin, yapay bir malzeme üretmek için sabit fırınlarda iyileştirilmesi ile uygulanabilir. İnce daneli zeminler, özellikle kısmen doymuş siltler, killer ve lölser, ısıtma teknikleri kullanılarak stabilizasyona en uygun olanlardır (Timmerman, 1984).

b) Dondurma (soğutma): Geçici olarak zemin stabilitesini sağlamak amacıyla, yumuşak zeminlerdeki veya yer altı su seviyesi altındaki kazılarda yer altı suyunu kontrol etmek veya sıklıkla don oluşan bölgelerde çözülmenin önlenmesi gereken yerlerde kalıcı bir stabilite elde etmek için kullanılır (Shuster, 1972; Jessberger, 1982). Bu yöntem tüm zeminlere uygulanabilir. Bu sayede geçirimsizliğin azalması ve basınç dayanımı artışı sağlanabilir. Bu

özelliklerin geçici olarak iyileştirilmesi, zamana, sıcaklığa ve zeminin dane boyutu dağılımına bağlıdır.

3.4.4. Elektro-kinetik stabilizasyon

Elektro-kinetik stabilizasyon, zeminlerin elektrik alanı etkisi ile ince daneli zeminlerin konsolidasyonunu ve stabilizatör katkının yoğun zeminlere doğru hareketi ve akım bariyerleri sağlayarak doğal sızıntıyı saptırmayı kolaylaştırmak için kullanılmıştır (Winterkorn, 1947; WES, 1961; Bjerrum ve arkadaşları, 1967; Gray ve Mitchell, 1967; Karpoff, 1976; Esrig ve Henkel, 1968; chappel ve Burton, 1975; Olsen, 1984) [10] .

3.5. Kireç Stabilizasyonu

Kireç ile zeminlerin stabilizasyonu veya zemin özelliklerinin iyileştirilmesi çoğunlukla kullanılan bir katkıdır. Romalılar tarafından Appian Yolu inşaatında kullanılan, kimyasal stabilizasyonun bilinen en eski yöntemidir.

Çoğu zeminlerin silis ve alüminosilikat içermesinden dolayı, basitçe sönmemiş kirecin (CaO) veya sönmüş kirecin (Ca(OH)_2) ve suyun eklenmesi, istenen karışımı sağlamak için yeterli olmaktadır. Killi zeminlerin sönmemiş veya sönmüş kireçle ve suyla karışımının, makul bir zaman içinde çimentolaşmış ürünler oluşturduğu ve çok iyi bir iyileştirme sağlandığı belirlenmiştir.

Puzolanik killer ve kireç, su ile karıştırıldığında, üç temel kimyasal reaksiyon ortaya çıkar: (1) Katyon değişimi ve yumaklaşma-çimentolanma; (2) puzolanik reaksiyon; (3) karbonatlaşma [10].

3.5.1. Zemin-kireç reaksiyonları

Kasyon değişimi ve yumaklaşma-çimentolaşma reaksiyonları

Kasyon değişimi ve yumaklaşma-çimentolaşma, zemin ve kireç arasındaki başlangıç reaksiyonlarıdır ve zemin plastisitesinde, işlenebilirliğinde, kürsüz dayanımında ve yük deformasyon özelliklerinde derhal bir iyileştirmeye yol açmaktadır. Pozolanik reaksiyonlar veya çimentolaşma reaksiyonları zaman ve sıcaklığa bağlıdır. Bu reaksiyonlar yıllarca devam edebilir, 55 °C'nin altındaki sıcaklıklar reaksiyonu geciktirirken, 55 °C'nin üstündeki sıcaklıklar reaksiyonları hızlandırır. Karbonat tuzu arzu edilmeyen bir reaksiyon ve sonuçtur, göreceli olarak erimeyen karbonat, pozolanik zeminlerle tepkime yapmayacak ve zeminleri daha plastik kılacaktır [10].

Kasyon değişimi ve yumaklaşma-çimentolaşma reaksiyonları, zeminin tek değerli sodyum (Na^+) ve hidrojen (H^+) iyonlarının, kirecin iki değerli kalsiyum (Ca^{2+}) iyonlarıyla yer değiştirmesinin sonucudur. Reaksiyon kili bağlar, kil içeriğinin azalmasını sağlar ve bu nedenle plastisite oluşur. Killerin plastisitesini azaltmak ve sıkılaştırma, veya diğer kimyasallarla stabilizasyon için işlenebilir hale getirmede, hacimsel olarak %3'ten %18'e kadar kireç içeriği kullanılabilir. Bu, zeminlerin "kireç stabilizasyonu" olarak anılacaktır. Kireç stabilizasyonu ile, PI değeri 50 olan bir zeminin plastisitesini, 15'e düşürmek sıra dışı değildir. Reaksiyon genellikle 96 saat içinde gerçekleşir. Doygun zeminleri, hafif ekipmanla (örneğin hafif traktörlerle, çiftlik pullukları) veya elle sadece kabaca karıştırmak yeterli olmaktadır. Kirecin su için güçlü bir eğilimi vardır ve reaksiyonun sonucunda sertleşir. Reaksiyon, suyu kilden çekerek kil topaklarını koparır, böylece daha kuru bir malzeme yaratır.

Kirecin ve zeminin çimentolanma reaksiyon zamanı, bazı siltlerin göçebilen karakterini yıkmak için de kullanılır. Göçebilen siltle karıştırılan, yaklaşık hacimsel olarak %6-9 arası kireç, silt parçacıkları arasındaki kil desteklerini

kırar ve 72 saat sonra zemini kararlı hale getirir. Killerin şişme potansiyeli, hacimsel olarak %6-12 oranında kireçle stabilizasyonu durumunda oldukça azaltılabilir. Kireç stabilizasyonu, %7-8 arası şişme potansiyeli, %0,1-0,2 değerlerine düşürülebilir (Thompson, 1969) [10, 22].

Çimentolaşma veya puzolanik reaksiyonlar

SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 , kildeki uygun kalsiyum ile tepkimeye girdiğinde, çok stabil kalsiyum silikat ve aluminat üretirler öyle ki, Portland çimentosuna yakın doğal çimento gibi davranırlar. Plastisite indeksleri 37'ye kadar yüksek olan zeminler, hacimsel olarak %9-24 arası sönmüş kireç (Ca(OH)_2 , $\text{Ca(OH)}_2.\text{MgO}$) veya sönmemiş kireç (CaO , CaO.MgO) kullanılarak, tek bir uygulama ile stabilize edilebilirler. Daha yüksek plastisiteli zeminler, kirecin iki kere uygulanmasıyla stabilize edilebilirler. Böyle bir durumda kirecin ilk kullanımı plastisiteyi azaltırken, diğer kullanımı ise çimentolaşma ve böylece stabilizasyon elde etmek için doğruca ve homojence uygulanır. Çimentolaşma, zamana bağımlı yavaş bir tepkimedir. Doğal çimentoların üretimi puzolanik killerin yapısına bağlıdır. Zemin-çimento dayanımı ile mukayese edildiğinde, zemin türüne, kireç miktarına ve kür periyoduna bağlı olarak düşük dayanımlar (80-1100 psi arası) oluştururlar. Zemin-kireç karışımları, ayrıca kendi kendine iyileşme özelliklerine sahip olur. Puzolanik tepkime devam ettikçe, iyileşme yıllarca etkinliğini sürdürür [10].

Kireç, bazı organik zeminlerin stabilizasyonunda da kullanılabilir. Düşük çökeltelerde veya önceden çökelmiş pH faktörü 5,4'ten küçük mineral toprak karışımları ve çürümüş bitkilerden oluşan sahalarda bulunan asidik organik zeminlerde kullanılabilir. Eğer organik zeminde puzolanik killer uygunsa, eklenen kireç tepkimeye girerek organik zeminlerin dayanımını iyileştirmektedir (Arman ve Munfakh, 1972) [10].

Karbonatlaşma

Karbonatlaşma istenmeyen bir reaksiyondur. Zemine eklenen kirecin, zeminle tepkimeye girmeyip havadan CO₂ emdiğinde veya zemin CaCO₃ oluşturduğunda meydana gelir. Bu durum, zemin yeterli miktarda puzolanik kil içermediğinde veya zeminde kireç miktarı fazla ise meydana gelir. CaCO₃ plastik bir malzemedir, zeminin plastisitesini artırır ve kireci bağlar. Böylece kireç puzolanik malzemelerle tepkimeye giremez hale gelir. Bu yüzden, zemine aşırı kireç eklenmesi faydalı sonuçlar doğurmaz [10].

3.5.2. Kireç iyileştirmesinin etkinliği

Zeminlerin fiziksel özelliklerinde kireç stabilizasyonunun sebep olduğu değişiklikler, Ulusal Kireç Derneği tarafından “Kireç Stabilizasyon İnşaatı El Kitabı”nda (NLA,1985) özetlendiği şekilde aşağıda verilmiştir [10, 22, 23].

- 1) Zeminin plastisite indeksi, bazı örneklerde dörtte birine veya daha fazla oranda ani bir düşüş gösterir. Bu genellikle likit limit azalması ve plastik limit artması nedeniyledir.
- 2) Zemin bağlayıcılığı veya kil içeriği (no. 40 elekten küçük) oldukça azalarak zemin çimentolaşmıştır.
- 3) Kireç, su çekerek, karıştırma esnasında kil parçacıklarının kırılmasını hızlandırmıştır. Çimentolaşmanın ve ayrışmanın sonucu olarak zemin daha gevrek ve kolayca işlenebilir hale gelmiştir.
- 4) Kireç ıslak zeminlerin hızlıca kurummasına yardımcı olur, böylece sıkıştırmayı hızlandırır.
- 5) Zeminin büzülme ve şişme karakteristiği, belirgin biçimde azalmıştır.

6) Kürden sonra, serbest basınç dayanımı önemli ölçüde artar. Bu artış 40 kata kadar olabilir.

7) Pek çok testle (CBR, üç eksenli basınç, plaka yükleme vb.) ölçülen taşıma gücü değerleri oldukça artar.

8) Pek çok testle ölçülen çekme dayanımı veya eğilme dayanımı oldukça artar. Bu yüzden stabilize edilmiş tabakanın direnme gücü gelişir.

9) Kireç stabilizasyonlu zemin tabakası, yukarıdan suyun yerçekimi penetrasyonunu ve aşağıdan kılcal nemi engelleyen, su geçirmez bir bariyer oluşturur. Bu yüzden bu tabaka, yağmur suyunu kolayca dağıtan ve stabil kalan sağlam bir “tabla” olur [10].

Kireçle iyileştirme en çok (1) kaplamalar için temel görevi görecek kil çakıl malzemelerin stabilizasyonu olarak, Ca(OH)_2 'nin zemin ağırlığının %2-4'ü oranında kullanıldığında (2) kaplamalar için temel (kireç ağırlığının %5-10'u) veya alt temel (kireç ağırlığının %1-3'ü) olarak hizmet eden ağır kil zeminlerin stabilizasyonunda kullanıldığında efektif olur. Kireç stabilizasyonu siltli bitkisel topraklar için daha az efektif bulunmuştur. Hem hidrolik reaktif içerikler, hem de filler olarak zeminin tepkimesi ve gradasyonunu iyileştirmeye çalışan kil, uçucu kül veya diğer puzolanik bileşenlerin eklenmesi hariç kumlu zeminlerde önerilmez. Kireç stabilizasyonu (özellikle sönmemiş kireçle), şantiyelere bağlantı yollarının iyileştirilmesinde ve aşırı yağış nedeniyle çalışamaz durumdaysalar, şantiyelerin kendileri için de önemli bir yapım çaresi şeklinde hizmet verebilir. Sönmüş kireç, sönmemiş kirece göre daha az toz oluşturur. Yoğunluğu daha fazla olduğu için sönmemiş kireç, daha fazla reaksiyona girmeye uygun kireç içerir. Bu nedenle, depolama ve taşıma bakımından daha uygun olmasına rağmen, yakıcı ve tehlikeli olması sebebiyle tercih edilmemektedir [22, 24]. Zeminlerin kireçle stabilizasyonu şöyle dikkate alınmalıdır:

- 1) Kilin çimento veya bitümlü bağlayıcılar ve su yalıtımı yapan katkıları ile bir sonraki stabilizasyonu için hazırlayıcı önlem olarak,
- 2) Granüler zemin stabilizasyonunda, bağlayıcı malzemenin plastisitesini kontrol etme ve onun çimentolama gücünü artırma yoluyla, ilave geliştirme önlemi olarak,
- 3) Alt temellerin iyileştirilmesi için. Kireç stabilizasyonu taşıma gücünü arttırmanın yanı sıra, kılcal su hareketini kısıtlar, dolayısıyla üstyapı altında su hareketini önleyici olarak,
- 4) Tüm kaplanmış yüzeyler altına stabilize edilmiş temeller oluşturarak,
- 5) İkincil veya üçüncül yollardaki bağımsız kaplamalar olarak (böyle durumlarda bitümlü sathi kaplama da önerilir),

Kireçle stabilize edilmiş zeminlerin, aşağıda belirtilen özellik ve karakterlerinde gelişme gözlemlenir (TRB, 1987) [10, 14].

- 1) Sıkıştırma Karakteristiği: Kür işlemi boyunca, iyileştirilen malzemenin özellikleri değişmeye devam eder. İyileştirilen malzemenin max. yoğunluğu, kür süresi ve kireç içeriği arttıkça azalır. Bununla birlikte optimum su içeriği, kür süresi ve kireç içeriğiyle birlikte artar.
- 2) Plastisite ve işlenebilirlik: Plastik indekste önemli küçülme ve büzülme limitinde artış olur. Yüksek PI değerine sahip zeminler, başlangıçta daha yüksek miktarlarda kireç ilavesine gereksinim duyar. Plastisitenin küçülmesinde, kireç ilavesinin ilk artışları, çoğu kez daha sonraki ilavelerden daha yararlı olur. Kireçle iyileştirilmiş zeminler, işlenebilirlikte önemli bir gelişmeye yol açan siltli ve gevrek bir dokuya ulaşırlar.

3) Hacim değişimi: şişme potansiyeli ve şişme basıncı oldukça azalır. Bu, su ve hacimsel büyümeye direnen imentosal bir matrisin formu nedeniyle, kalsiyuma doymuş kilin azalmış eğilimine atfedilir. Kireçle iyileştirilmiş zeminlerin arazi su içerikleri, genellikle optimum etrafında stabilize olur ve su içeriği varyasyonu küçüktür. Bu yüzden, su kaybı nedeniyle oluşan bzlme çatlamaları, en aza indirgenir. Laboratuvar ve saha verileri göstermiştir ki, tipik saha koşulları için kireçle iyileştirilmiş zeminlerin büzülmesi kapsamlı değildir.

4) Dayanıklılık: Kireçle iyileştirilmiş zeminlerin dayanıklılığı, zeminin ve kirecin tipi, kireç yüzdesi, kr zamanı ve sıcaklık gibi pek çok değişkene bağlıdır. Kireçle iyileştirilmiş zeminlerin en yaygın dayanıklılık ölçüm yolları; serbest basınç deneyi ve CBR testidir. Başlangıç dayanımı veya krsz dayanım, kireç ile zemin arasındaki doğrudan tepkimelerin bir sonucudur (katyon değişimi, çimentolaşma ve yumaklaşma) ve gelişme %100'e kadar artabilir. Krl dayanım, çimentolaşma ve puzolanik tepkimelerin zaman içinde oluşmasıyla meydana gelir. Kireçle iyileştirilmiş zeminlerin 73 °F (22,8 °C)'de krlenmiş, 28 günlük serbest basınç dayanımları, sıklıkla 100 psi'dan fazla artış gösterir. Daha uzun kr sürelerinde, daha büyük artışlar bildirilmiştir. %5 kireçle iyileştirilmiş AASHTO Yol Deneme dolgu zemininin, 75 gün kürlü 120 °F (48,9 °C) serbest basınç dayanımı 1580 psi idi. Kireç, zeminin kohezyonunu oldukça arttırır ve içsel sürtünme açısında minör artışlar oluşturur. Kohezyon, serbest basınç dayanımı ile birlikte artar ve büyük kayma dayanımı kürlü toprak-kireç karışımlarında ilerleme sağlar. Çekme dayanımı, özellikle kaplama tasarımında kullanıldığında, zemin-kireç sistemlerinde önemli bir parametredir. Zemin-kireç sistemlerinin çekme dayanımı ölçümlerinde, endirekt çekme veya eğilme testleri kullanılmıştır. Bir çalışmada, endirekt çekme dayanımının serbest basınç dayanımına oranı, 0,13 bulunmuştur. Bundan yola çıkarak, eğilme dayanımı, serbest basınç dayanımının %25'i alınmıştır. Kireçle iyileştirilmiş ince daneli zeminler, kr uzunluğu ve zeminin kireç reaktivitesine bakılmaksızın, çoğu kez artmış CBR değerleri göstermiştir. Bu yüzden, CBR değerleri dayanımın genel bir ölçüsü

olarak kullanılabilirler, bununla birlikte, eğer diğer dayanım testleri mevcutsa, CBR değerleri önerilmez (TRB, 1967).

5) Gerilme-birim deformasyon karakteristikleri: Zemin-kireç karışımlarında, doğal zeminlerle karşılaştırıldığında, kırılma gerilmesi artar ve nihai birim deformasyon azalır. Zemin-kireç karışımları için geliştirilen bir gerilme-birim deformasyon ilişkisi, genellikle zemin tipine ve kür süresine aldırış etmeden, yaklaşık %1 birim deformasyon geliştirmek için, max. basınç gerilmesini gösterir. Kürlü zemin-kireç karışımları için basınç gerilmesinin lineer ilişkilerine karşı, elastisite modülü ve eğilme dayanımı ve eğilme modülü bulunmuştur. Bir havaalanının, kireçle iyileştirilmiş temelinin saha ölçümü esneklik modülü, sonraki 2-2,5 yıllık inşaat boyunca, 165000 psi'den 568000 psi'ye önemli bir artış göstermiştir. Zemin-kireç karışımlarının Poisson oranının, nihai basınç dayanımı %50-75 arasındayken 0,31 değeri civarında olduğu bildirilmiştir [10].

6) Yorulma ve süreklilik: Çalışmalar göstermiştir ki, yorulma dayanımları, 5 milyon gerilme tekrarında, ortalama olarak nihai eğilme dayanımının %54'üdür. Ancak, kürle birlikte nihai dayanım artarken, yorulma gerilmesi, nihai dayanımın bir yüzdesi olarak, azalır ve bu yüzden karışımın yorulma ömrü artar. Kireç, reaktif zeminle karıştırıldığında, dayanıklı malzemeler elde edilebilir. Bazı dayanım azalması ve hacim değişmesi oluşmasına rağmen, kalıcı direnç, çoğu kez saha gereksinimlerini karşılamak için yeterlidir. Tipik zemin-kireç karışımlarındaki süreklilik testleri göstermiştir ki, 120 °F'de 48 ve 96 saat kürde, serbest basınç dayanımında, donma-çözülmenin tur başına ortalama düşüş oranı, sırasıyla 9 psi ve 18 psi'dir (ASTM D560) (Dempsey ve Thompson, 1968). Zemin-kireç karışımları, ayrıca kendi kendini iyileştirme kapasitesine sahiptir. Bu yüzden donma-çözülmeden kaynaklanan dayanım azalması, kümülatif değildir ve kürle birlikte düzeltilebilir.

Kireç ve Puzolanik Katkılarla Stabilizasyon

Doğal zemin, kireçle tepkimeye girmek için puzolanik bileşenlere ihtiyaç duyduğunda, çimentolaşma reaksiyonları elde etmek için doğal veya sentetik maddeler eklenebilir. Doğal puzolanik malzemeler genellikle volkanik kül, tuf ve tras taşı şeklinde bulunur. Yapıda kristalin değil ama iyoniktirler. Puzolanlar ve puzolanik kayalar, bazı ülkelerde çimento katkısı olarak kullanıldılar. Ayrıca kırılmış bazalt kayası ve ocak artığı da, katkı olarak kullanılmak üzere yeterli çimentosal özelliklere sahiptir. Bunlardan başka doğal olarak bulunan puzolanlar, kömürün yanmasıyla oluşan ürünler, kömür ve belediyeye ait atıklar, zemin stabilizasyonunda puzolanik özelliklere sahip katkı olarak kullanılmıştır. Bu malzemelerin arasında, tamamı kömür yanmasının ürünleri olan, uçucu kül, fırın dibi külü, erimiş kül ve granüle yüksek fırın cürufu yaygın olarak kullanılmıştır. Zemin-kireç karışımı özelliklerini iyileştirmek için diğer katkılar test edilmiştir. Sodyum metasilikat, sodyum sülfat, ve sodyum hidroksit içeren bir miktar sodyum bileşimiyle iyi sonuçlar elde edilmiştir. Zemin stabilizasyonunda kullanılan kömür-ilişkili yan ürünlerin, kapsamlı bir değerlendirmesi, Usmen ve arkadaşları tarafından sunulmuştur (1983) [10].

Su ve kalsiyum hidroksitle beraber çimentolaşan bir ürün oluşturan silisli veya alüminyumlu maddeler puzolan olarak tanımlanmaktadır [2, 3].

Anlamli miktarda kirecin zemine eklenmesiyle zemin-kireç karışımındaki kirece doymun boşluk suyunun pH değeri 12,4'e yükselir. Yükselmiş pH değelerinde, silis alüminyumun çözünebilirliği önemli bir biçimde artar. Kil danelerinden ayrılan silis ve alüminyum, kireçte bulunan kalsiyum katyonlarıyla reaksiyona girerek çimentolaşır ve seneler boyu süren bir direnir artışı başlamış olur [7].

Kilin bünyesinde bulunan silis ve alüminyum miktarına bağlı olarak yapılan karışımın dayanımı artmaktadır. Bu nedenle kireç stabilizasyonu montmorillonitlerde, kaolinitlere göre daha iyi sonuçlar vermektedir [5].

gelişmiştir. Volkanizma andezit, bazalt ve trakiandezit birleşimidir. Tüf-breş ve aglomera içermektedir. Sedimanter kayaçlar ise genel olarak, kıltaşı-kumtaşı-marn, çamurtaşı-tüfit, tüf ve konglomeralarla sahada temsil edilmektedir. Bu volkanik ve tortul kayaçlar üst kretase ve tersiyer yaşlı genç intirüzüfler tarafından kesilmişlerdir. Proje güzergâhı üst kretase-eosen yaşlı kumtaşı-çamurtaşı-kireçtaşı, şelf-yamaç çökel kaya aralanmasından oluşan sedimenter seri ile aglomera-tüf andezitik ve dasik lavların bulunduğu proklastlar içinden geçmektedir. Proje sahasında denizaltı volkanizması etkili olmuştur. Bazik karakterli bu volkanizmaya bağlı olarak andezit-bazalt, andezit-trakiandezit lav ve piroklastları oluşmuştur [26].

Proje sahasının genelleştirilmiş stratigrafik sütun kesiti aşağıdaki Şekil 4.1 üzerinde gösterilmiştir. Bu kesitte güzergâh boyunca yüzeylenen jeolojik birimlerin özellikleri yaşlıdan gence doğru tanımlanmıştır.

4.1.1. Üst kretase: andezit-bazalt-aglomera-dasit-tüf

Proje güzergâhında, Melet nehrinin güneyini kaplayan bu birim andezit, bazalt, aglomera, dasit ve tüflerden oluşur. Genel olarak, taze-az derecede ayrıışmış, sağlam-çok sağlam ve sık-geniş eklemlidir. Aglomera formasyon içerisinde 0,00-3,00 metre kalınlıklarda, tabakasız; çakılları andezit, bazalt ve çeşitli boylarda köşeli, boylanmamış, birbirleriyle teması az ve gevşek tüf çimento içerisinde [26].

4.1.2. Üst kretase-paleosen: kumtaşı-silttaşı-kıltaşı-marn-tüf

Proje güzergâhında, kuzeyden güneye doğru Melet Nehrine olan kısımda görülür. Birim, kumtaşı, silttaşı, kıltaşı, marn ve tüflerde oluşur [26].

Kumtaşı-silttaşı-kiltaşı-marn

Kahverengimsi gri, sarımsı gri ve grimsi kahverengi, genellikle taneleri orta derecede yuvarlaklaşmış, iyi, yer yer orta boylanmış, ince taneli, kırıntıları çoğunlukla volkanik, ince-orta tabakalı olup, yer yer küresel ayrışma gösterir. Gevşek tuf ve kireç çimentoludur [26].

ZAMAN	DEVİR	DEVRE	SMGE	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR
SENEZOİK	KUVATERNER	HOLOSEN	Qym		Yamaç Molozu
			Qal		Alüvyon
	TERSİYER	EOSEN			Riyodasit, Şelf, Karasal Volkanik Kaya
		PALEOSEN			Kumtaşı, Çamurtaşı, Kiltası, Marn
SENEZOİK	ÜST KRETASE				Andezit, Dasit, Piroklastik kaya, Bazalt, şelf.

Şekil 4.1. Stratigrafik Sütun Kesiti [26].

Tuf

Koyu gri-gri-yeşilimsi kahverengi; ince-orta tabakalı, nadiren tabakasız veya kalın tabakalıdır. Birim genel olarak kırılğan, ince taneli, yer yer kaba taneli

ve kloritleşmiş mika-feldispat taneleri içermekte, bazen küresel ayrışma göstermektedir. Ayrıca bazik akıntı ve aglomera parçalarını tüfler içerisinde görmek mümkündür. Bu birimde tünel yapısı için T1 SK2 sondajı açılmıştır. Birim içindeki hâkim süreksizlik tabakalanma olup, genelde yatay ve yataya yakın eğimlidir [26].

Bu kesime ait jeolojik plan Şekil 4.2'de ve jeolojik profili Şekil 4.3'te gösterilmiştir [26].

4.2. İklim

İnceleme alanında Karadeniz iklimi hâkim olup her mevsimde yağış görülür. Yağışlar genellikle yağmur, kışın ise kar şeklindedir. Yıllık ortalama yağış 1089,2 mm'dir. Bölgede en yüksek sıcaklık 31,6 °C, en düşük sıcaklık -6,7 °C'dir [26].

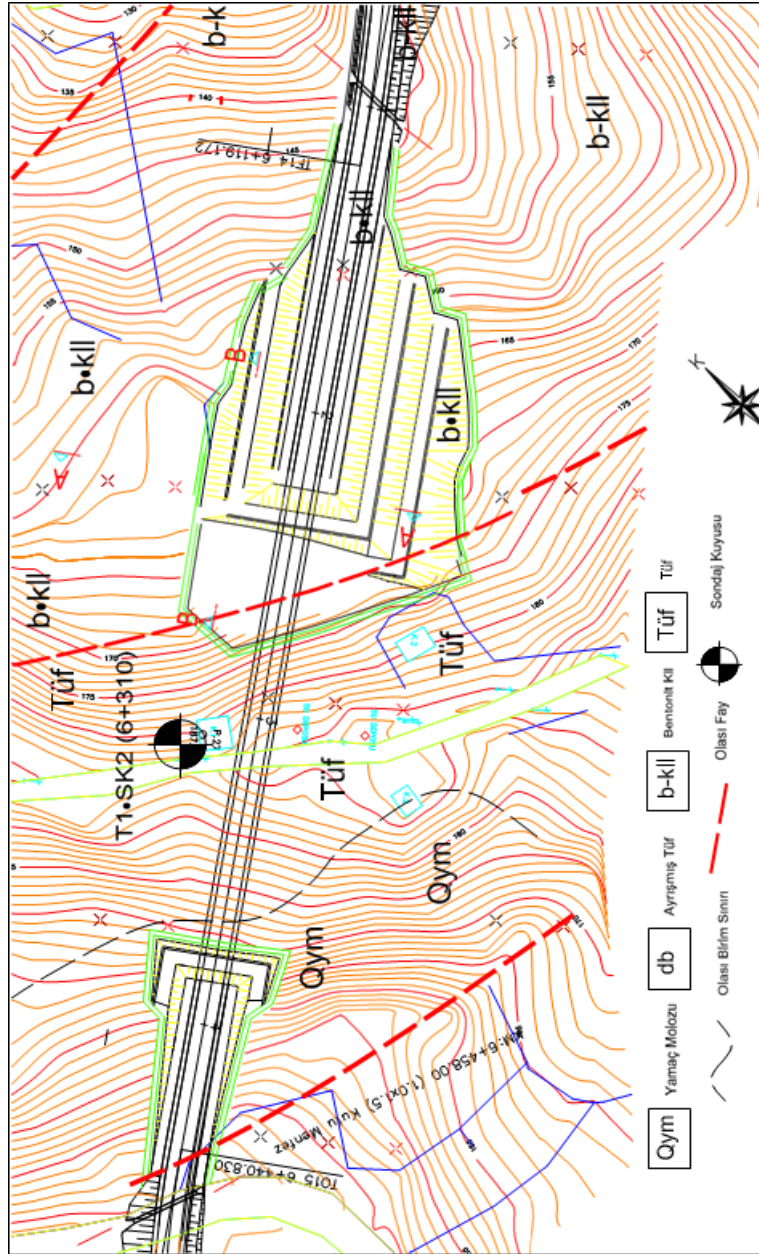
Bu çalışmada yolun üstyapı tabanının Km:6+015-6+405 arasında, 260 m'si tünel içinde geçen, toplam 390 m'lik yüksek şişme potansiyeline sahip bentonitik killi kesiminin, yol yapısında oluşturacağı olumsuz etkilerinin giderilmesi amacıyla, iki farklı kimyasal katkı malzemesi ile stabilizasyonunu kapsayan, deneysel bir çalışma yapılmıştır.

4.3. Yapısal Jeoloji ve Tektonik

İnceleme sahasında yüzeylenen bütün birimler alt ve orojenik fazlardan etkilenecek bugünkü yapısal form ve konumlarını kazanmışlardır. Birimlerin birbirleri üzerinde uyumlu ve istifli dizilişleri orojenik fazların ektili olmadığı bir göstergesidir. Bazik karakterli volkanizmaya bağlı olarak andezit-bazalt, andezit-trikandezit lav piroklastları oluşmuştur.

İnceleme alanında birimler genel olarak kuzeybatı- güneydoğu yönünde uzanım göstermektedirler. Daha çok kıvrım tektoniği etkendir. Türkiye

deprem bölgesi haritasına göre 2. derece deprem bölgesinde yer almaktadır. Deprem aktivitesi kuzey Anadolu fay hattı tarafından belirlenmektedir.



Şekil 4.2. Jeolojik plan [26]

5. STABİLİZASYON MALZEMELERİ

5.1. Consolid

5.1.1. Consolid kimyasal katkılarının oluşturulma süreci

1960'lı yıllarda Consolid AG başkanı Dr. A. G. Sherr (İsviçre), temel ve alttemel zemin inşaatlarında ve geleneksel yöntemlerle yapılması mümkün olmayan yol yapılarında kullanılmak üzere, bir çeşit esnek asfalt sübyesi üreterek sistemin temeli atılmıştır.

Bundan sonra zemin stabilizasyonu geliştirme konusunda belli başlı gereksinimleri belirleyerek; hem saha hem de laboratuvar testleri ile aşağıda sıralanan hedefleri oluşturacak bir ürün oluşturulmuştur [27].

1. Stabilizatör fiziksel ve kimyasal bileşimi ne olursa olsun her cins zeminle ve mümkünse aynı oranlarda (1, 2, 3) kullanılabilir olmalıdır,
2. Zeminin kimyasal bileşiminden etkilenmemek için zeminle kimyasal tepkimeye girmemelidir,
3. Stabilizasyonun işleyişi gevşek zeminin sertleştirilmesi yönünde bir etkide bulunmalı veya katalizör olarak çalışmalıdır,
4. Zeminin suya hassasiyetini kontrol edebilmelidir, bu sayede zemin taneciklerinin geri dönüşü imkânsız şekilde elektrokimyasal yük alışverişi yardımıyla kümelenmesi sağlanmalıdır,
5. Stabilizasyon zamanla ve trafik altında gelişmeli ve kalıcı olmalıdır,
6. Kimyasal stabilizatör zehirli olmamalıdır, çevreyi kirletmemelidir,

7. Ekonomik bir çözüm olmalı ve maliyeti yüksek uygulamalar gerektirmemelidir.

5.1.2. Consolid sistemin uygulama şekli

Consolid sistemi, zemin stabilizasyonu için geliştirilmiş bir metottur. Consolid sistemi denmesinin nedeni, bu uygulamanın daima iki ürün ile birlikte uygulanmasıdır. Bu tez kapsamında Consolid sistemi olarak seçilen karışım Consolid444+Solidry (kullanım kolaylığı bakımından (C+S) kısaltması kullanılmıştır) kimyasal katkısı kullanılmıştır. Consolid444 sıvı olarak, Solidry ise katı olarak karışım içindeki yerini alır. İki katkı zeminle karıştırılıp sıkıştırılarak uygulama tamamlanır. C+S bağlayıcı veya oksitleyici olarak tepkimeye girmeyen, her türlü sıkı zeminin doğal katılma sürecini hızlandıran bir sistemdir [27].

5.1.3. C+S katkısının kimyasal ve fiziksel yapısı

Solidry

Solidry, zemin koruyucusu olarak uygulanan katı/toz halde, kimyasal organik maddedir. Maddenin kabarma hareketi işlenmiş zeminde kapiler artışı engeller [27].

Kimyasal yapısı %96,5 Portland Çimentosu ve Kireç, CAS CEM 266-043-4, %3,5 SD Mono moleküler ve CAS No 61789-80-8, Poli akrilikler ve reaktanlar, Alkilamin ve dimetilamonyum kloritten oluşan kararlı polimoleküler yüzey aktif madde olarak tariflenmektedir [27].

Consolid 444

Consolid 444 sıvı bir kimyasal maddedir ve pH'ı 6'dır. Yüksek basınç altında yanıcı değildir. Uygulama süreklilik gösterir ve kuruduktan sonra geri dönüşümsüzdür [27].

C+S zemin danelerine yapışmış olan ince su tabakasını parçalayıp tanelerin geri dönülmez bir şekilde kümelenmelerine neden olarak suyun kapiler artışını azaltan kimyasal bir sistemdir. İnce danelerin bağlanmasını sağlayarak suyla etkileşen zemin yüzeyinin azalmasını ve gerçek kenetlenme gücünün açığa çıkmasını sağlar [27].

Suda çözünmüş %20 mono moleküler ve poli moleküler CAS No61791-550-7 ve dimetilamonyumklorit, CAS No 61798-80-8 ve izopropenol, CAS No 67-63-0 çözücüler, emülgatörler ve katalizörlerden oluşan kararlı yüzey aktif madde karışımı biçiminde tanımlanan kimyasal bir yapıya sahiptir.

C+S üzerinde Karlsruhe Araştırma Enstitüsü (1999) ve DSİ TAKK dairesi (2003) tarafından yapılan araştırmalara göre C+S katkılı zeminlerin, katkısız olanlara göre çeşitli deneylerle yapılan değerlendirilmesi Çizelge 5.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.1. Araştırma çalışmalarında ulaşılan deney sonuçları [27]

Yapılan Deneyler	Katkısız Numune	Katkılı Numune
Geçirimsizlik Katsayısı (k_f) (cm/s)	5,46e-8	$k < 7,97e-9$
Proktor $\gamma_{dmax}(t/m^2-w_{opt})$	1,84-14 /1,808-15	1,84-14 / 1,780-15
CBR	33-%118	61-%58
Üç eksenli basınç testi (uu) (c –kPa)-(Ø-°C)	85 kPa-18°C	60 kPa-23 °C
Bağıl yoğunluk (Gs)	2,69	2,69

5.1.4. Consolid sistemin çevre ile etkileşimi

C+S çevre ile uyum içerisindedir. Geri döndürülmüş veya ıslah edilmiş malzemeyle değiştirilmeyecek ana malzemenin olduğu veya bu malzemenin gerekli olduğu uygulamalar için değerli kaynakların muhafaza edilmesi bu sistemle sağlanabilir. İsviçre Ulusal Sağlık Bürosu (1997) C+S'nin çevreyle uyumlu olduğuna ilişkin Eluat testi uygulayarak bir rapor hazırlamıştır. Dayanıklılık süresinin 300 yıldan fazla olduğu beyan edilmektedir.

5.1.5. C+S katkısı ile deney yöntemi

Gerekli olan kuru malzeme miktarı hesaplanır. Sıvı katkı maddesi (Consolid444) ile sıkıştırma için gerekli optimum su miktarı iyice karıştırılır. Katı katkı maddesi (Solidry) ile gerekli zemin numunesi iyice karıştırılır. Sıvı ve katı karışımlar birbirine iyice karıştırılır. Örneğin küçük proktor kalıbı için gerekli 4 kg'lık ağırlığında zemin için %1 Solidry (Toz) katkıdan 40 g ve %1 Consolid444 (Sıvı) katkıdan 40 ml olacak şekilde (C+S) zemine karıştırılır [27].



Resim 5.1. C+S sistemin uygulanışı

C+S'nin yol temel inşaatında uygulanması

Consolid444, 50 lt'lik varillerde satılmaktadır. Solidry ise 25/50 kg'lık paketlerde satılmaktadır [27].

Gerekli donanım; diğer mevcut araçlara ilave olarak, özel imal bir karıştırma makinesi tavsiye edilmekle birlikte, bu işlemi traktörlere bağlanan zirai döner çapalar veya çok sıralı diskli düzelticilerde görebilirler [27].

Sistemin çimento stabilizasyonuna göre oluşturmaya çalıştığı fark, kil içeriğinin değiştiği ve hatta organik madde içeren zeminlerde çimento ilavesiyle oluşturulacak kırılgan yapıda bir alt tabakada, dinamik trafik yükleri ile oluşacak kırık ve çatlaklardan su girişi sonucu yolun ömrü içinde olumsuz sonuçlara sebebiyet vermemesi şeklindedir [27].

5.2. Kireç

Stabilizasyon-iyileştirme işleminde kullanılacak sönmüş kirecin kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 5.2'de belirtilen değerlere uygundur [24].

Çizelge 5.2. Stabilizasyonda kullanılan kirecin kimyasal ve fiziksel özellikleri

Özellik (TS EN 459-2)	Sönmüş Kireç
CO ₂ (Kızdırma Kaybı), %	≤ 7
Toplam (CaO+MgO), %	≥ 80
SO ₃ , %	≤ 2
MgO, %	≤ 10
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ +SO ₃ , %	≤ 5
Parçalar, mm	-
Ağırlıkça Elekte Kalan, %	0.09 mm ≤ 7 0.20 mm ≤ 2

5.3. Stabilizasyon Kriterleri

LL değerinin %60'dan daha büyük, PI değerinin %35'ten daha büyük ve γ_{dmax} değerinin 1450 kg/m^3 'ten daha küçük olduğu durumların, tümüne uygun şartlarda olan bütün kazı malzemeleri «zayıf zemin» olarak nitelendirilmektedir. $PI \leq \%6$ ve $CBR > \%10$ olan doğal cüruflar ve tüfler bu kategori dışında bırakılmıştır [24].

Proje aşamasında zayıf zeminlerin tespitine ilişkin olarak zayıf zeminin,

- niteliği (CL, CH, OH, vb),
- kalınlığı,
- zamana bağlı oturma özellikleri,
- stabiliteyi etkileyecek kayma dayanım parametreleri,
- şişme potansiyelinin belirlemesini gerekli görmektedir.

Yol projelerinde yarma tabanında şişme özelliği olan zemin olması durumunda şişme nedeniyle oluşacak deformasyonun en fazla 50 mm olmasına müsaade etmektedir [24].

İyileştirilecek malzemeler için beklenen kriterler Çizelge 5.3'de özet olarak sunulmuştur. AASHTO sınıflandırma sistemine göre A5, A6, A7, A-2-6, A-2-7 veya birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine (BZSNF) göre CH, CL, MH, ML, GC, SC sınıflarına giren plastisite indeksi 10'dan büyük ($PI \geq 10$) veya Kaliforniya Taşıma Oranı (Yaş CBR %) < 10 veya CBR şişme %'si ≥ 3 olan zemin/malzemeler için stabilizasyon-iyileştirme yapılması uygundur [23, 24].

Çizelge 5.3. Kireçle stabilizasyonda uygunluk şartları özet tablosu [24]

STABİLİZASYON		
BZSNF CH, CL, MH, ML, GC, SC		Üstyapı Tabanı
SINIFLANDIRMA AASHTO: A-2-6, A-2-7, A5, A6, A7		
ZEMİN	Ph Değerinin Ölçümü	: TS 6166
	Organik Maddeler	: TS 1169,AASHTO T 194, T267,< % 4
	Sülfatlar	: TS 6170 , SO ₃ , < % 3
	Metilen Mavi Değeri	: TS EN 933- 9 > 10 g / dl
KİREÇ	Özellik (TS EN 459-2)	Söndürülmüş Kireç
	CO ₂ (kızdırma kaybı)	≤ 7 %
	Toplam (CaO+MgO)	≥ 80 %
	SO ₃	≤ 2 %
	MgO	≤ 10 %
	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ +SO ₃	≤ 5 %
	Parçalar	--
	TS EN 459-2 Ağırlıkça Elekte Kalan %	0.09 mm ≤ % 7 0.2 mm ≤ % 2
S _U	SO ₃ < 200 ppm	

5.3.1. Optimum kireç yüzdesinin belirlenmesi için yapılan ön deneyler

Stabilizasyon işleminde kullanılacak yaklaşık kireç yüzdesi kısa süreli testlerle bulunabilir. Bu tezde kullanılan ilk oranı tahmin etme metodu Eades ve Grim tarafından 1958 yılında geliştirilmiş olan pH metodudur. Buna göre karışımın pH'ını 12,4'e getiren kireç oranında puzolanik reaksiyonlar oluşmaktadır [24, 30].

İkinci metot ise kireç-toprak-su karışımının bir saat bekletilmesinden sonra yapılan Likit Limit ve Plastik Limit deneyleri ile değişik kireç oranlarında Plastisite İndeksi (PI) değerlerinin bulunmasıdır. Üstyapı tabanı malzemeleri için PI < 10, en küçük kireç oranı değeri yaklaşık kireç yüzdesi olarak kabul edilir [24].

Bu iki metotla yaklaşık olarak hesaplanan kireç yüzdeleri ile aşağıda belirtilen çalışmalar yapılarak, en az 3 farklı kireç yüzdesi ile yapılan çalışma sonucunda teknik ve ekonomik optimizasyon ile seçilmiş kireç yüzdesi uygulama için Optimum Kireç Yüzdesi olarak kabul edilir [24].

Arazideki uygulamalarda Optimum Kireç Yüzdesinin %1,5'dan küçük olmaması istenir. Stabilizasyon sonrasında ulaşılmaması gerekli kriterler Çizelge 5.4'de özet olarak verilmektedir [24].

Yol inşaatında kullanılacağı yere göre değişmekle birlikte Üstyapı tabanı için $CBR \geq 20$, Şişme $\% < 1,0$ LL $\% < 30$, PI $\% < 10$, serbest basınç ve çekme mukavemetleri $q_u(7) > 5 \text{ kg/cm}^2$, $q_c(7) > 0,3 \text{ kg/cm}^2$, donma çözünme sonrası $q_u(n) > 1,5 \text{ kg/cm}^2$ olması istenmekte olup uygulama sırasında araziden uygulama yapılan kesimlerde $CBR \geq 15$ ve Şişme $< \% 1$, LL < 30 ve PI < 10 olmalı ve yüksekliği 1 metreden az dolgunun son katmanı ve üstyapı tabanı için yük devri (veya süresi) $0,15-0,25 \text{ N/mm}^2$ arasında, $M_d \geq 50 \text{ N/mm}^2$ şartlarını sağlamalıdır. Stabilizasyon ardından sağlanması gerekli şartlar Çizelge 5.4'te özetlenmiştir.

Kireç minimum kil oranı %10, PI > 10 olan ve No. 200 elekten geçen malzeme miktarı %25'ten büyük olan zeminler için uygundur. Ancak daha düşük plastisiteli ve kil oranı daha düşük siltli zeminlerde de etkili olabilmektedir [28, 29]. Kumlar gibi NP ve organik zeminlerde kireç tek başına iyileştirici olamaz, puzolanik katkılara gereksinimi olur [28].

Çizelge 5.4. Stabilizasyon şartları

STABİLİZASYON	
Üstyapı Tabanı	
TASARLANAN KARIŞIMIN LABORATUVAR ÇALIŞMALARARI	TASARLANAN KARIŞIM: pH = 12,4
	DOZAJ : KİREÇ % ≥ 1,5
	SIKIŞTIRMA AASHTO Standart Proctor Üstyapı Tabanı CBR için 20°C, Nem > % 95'de 3 gün ve 20°C'de suda 4 günden sonra CBR ≥ 20 ŞİŞME < % 1,0
	LL < 30 PI < 10 Atterberg Limitleri 1 saatlik değerlerdir $q_u (7) > 5 \text{ kg/ cm}^2$ $q_c (7) > 0,3 \text{ kg/ cm}^2$ Dona Hassas Bölgelerde $q_u (n) > 1,5 \text{ kg/cm}^2$ n donma-çözünme sayısı n ≥ 5 (En az 12 saat)
YAPIM AŞAMASI KALİTE KONTROLU	CBR ≥ 15 ŞİŞME < % 1,0 20°C, Nem > % 95'de 3 gün ve 20°C'de suda 4 günden sonra LL < 30 PI < 10
	Yük devri 0,15 - 0,25 N/mm ² $M_d \geq 50 \text{ N/mm}^2$ yükseltilerin son 30 cm'si

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

(Ordu-Ulubey) Ayrımı-Topçam Yolu Km 6+015-6+405 arasında gerçekleştirilecek olan yol yapısı stabilizasyon çalışması için, öncelikle sahadan tünel girişi kesiminde, yaklaşık 4 m derinlikte bir araştırma çukuru açılarak, yol üst yapı tabanını temsil eden numuneler alındı. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) toprak ve stabilizasyon laboratuvarında serilerek havada kurutulan numunelere, öncelikle doğal su muhtevası, Atterberg limitleri, elek analizi, hidrometre ve özgül ağırlık deneyleri yapılarak, birleştirilmiş zemin sınıflamasına ve AASHTO sınıflamasına göre zemin değerlendirildi. KGM kimya laboratuvarında kimyasal analiz, pH tayini ve organik madde tayini yapılarak kimyasal içeriği ortaya konulan zeminin, ODTÜ Jeoloji Müh. Bölümünde X-Ray analizi yapılarak dahil olduğu kil grubu ve içerdiği minerallerle ilgili sonuçlara ulaşıldı. TS 1900, ASTM, AASHTO ve BS 1377 standartları esas alınarak yapılan deneylerin sonuçları Çizelge 6.1’de verilmiştir.

6.1. X-Ray ve Kimyasal Analizleri

Zemin numunesine, kil minerallerinin belirlenmesi amacıyla X ışını kırınımı yöntemi uygulanmıştır. Kil örnek 2 µ boyutunda ayrılıp, öncelikle havada kurutularak, daha sonra etilen glükol ile iyileştirilerek, 300 °C’de ve 550 °C’de ısıtılarak analizlere tabi tutuldu. Analizler sonucunda Ca^{+2} ve Na^{+1} mineralleri, kuvarz, plajyoklastlar ve mika içeren smektit grubu kil sınıfının bir üyesi olduğu tespit edildi.

Kil numunesinin, havada kurutulduğunda 14-13 A’, etilen glükolde iyileştirildiğinde 17 A’, 300 °C’de 14-12 A’ ve 550 °C’de 9 A’ d(001) piklerini verdiği tespit edildi (Bkz. EK-1). Havada kurutulmuş numunede yapılmış olan X-ray analizi grafiği üzerinde, HAFF.315 tipi planimetre ile yapılan yarı kantitatif analizde smektit minerali için 38vu (vu: vernier birimi olup, 10 vernier birimi= 1 cm²/dir) yani 3,8 cm²/lik alan tespit edildi. Bunun dışında

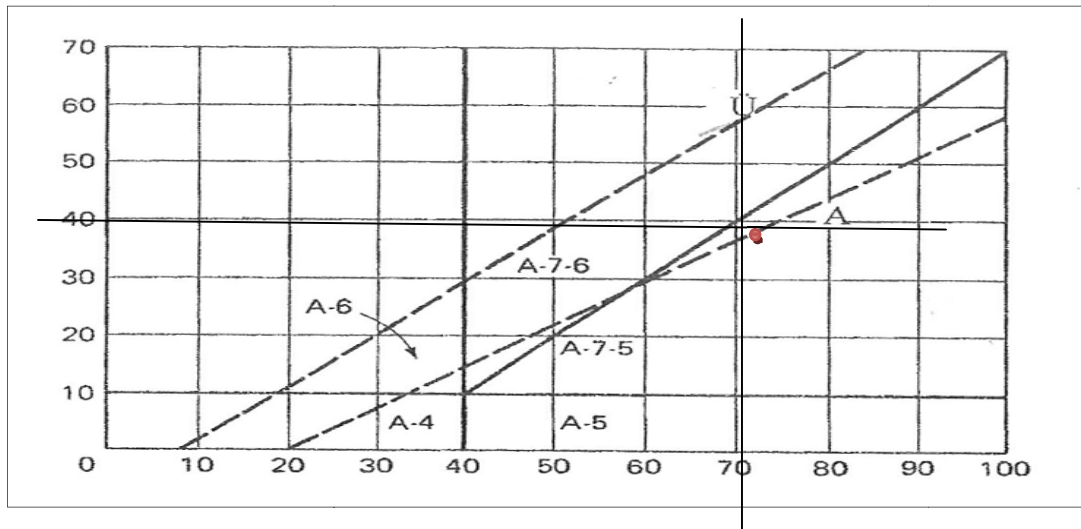
herhangi bir pik olmadığı değerlendirilerek C (0,002 mm'den geçen) değeri %38,2 olan kil kısmın tümünün Ca-Na smektit mineralinden oluştuğu tespit edildi.

Çizelge 6.1. Bentonitik kil numunesi deney sonuçları

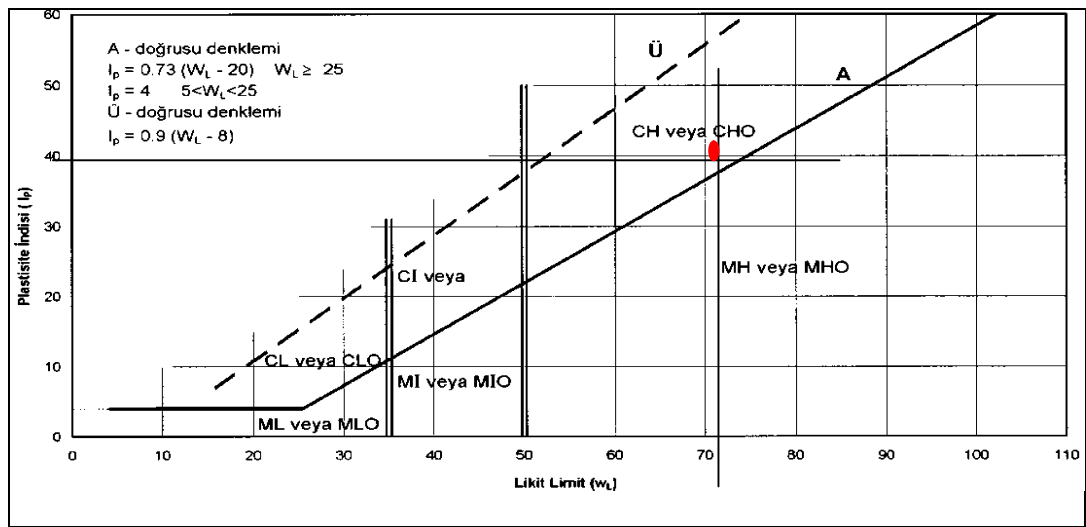
Kimyasal Analiz	(%)
SiO ₂ , %	61,37
R ₂ O ₃ (Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃)	21,40
Al ₂ O ₃	20,54
Fe ₂ O ₃	0,86
(SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)	82,77
Toplam CaO	2,30
MgO	3,10
SO ₃	0,00
Kızdırma Kaybı	9,29
Cl	0,00
Organik madde	0,00
Wn(%)	35,4
Atterberg Limitleri	(%)
LL	73,4
PL	32,3
PI	41,1
Elek analizi ve hidrometre	(%)
No.4 elekten geçen(%)	99,6
No.200 elekten geçen(%)	80,8
Birleştirilmiş zemin sınıfı	CH
C (0,002mm den geçen (%))	38,2
A	1,076
Gs	2,54
Şişme Potansiyeli (ŞP)	Yüksek-Çok yüksek

6.2. Sınıflandırma Deneylerinin Değerlendirilmesi

Numuneye yapılan elek analizi ve hidrometre sonuçları Çizelge 6.1'de sunulmuştur. Çizelge 6.1'deki verilerin değerlendirilmesi sonucunda, sahada bulunan bentonitik kilin AASHTO zemin sınıfı A7-5 olarak bulunmuş ve Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Birleştirilmiş zemin sınıfı CH olarak belirlenmiş ve Şekil 6.2'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. AASHTO zemin sınıflandırma sistemi ile kilin değerlendirilmesi [1]



Şekil 6.2. Zemin sınıflandırma sistemi ile kilin değerlendirilmesi

Atteberg deney sonuçlarına göre Çizelge 2.5'te derlenmiş olan şişen zeminlerin sınıflandırılması yaklaşımları değerlendirildiğinde killi malzemenin şişme potansiyeli yüksek-çok yüksek olan zayıf bir zemin malzemesi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Eş. 2.1'e göre aktivitesi hesaplanan malzemenin Skempton değerlendirmesine göre normal aktif bir yapıda olduğu belirlenmiştir. T1 SK2 sondajından bentonitik kilin kalınlığının oldukça fazla olduğu tespit edilmiştir (Bkz. EK-2).

6.2.1. Laboratuvar çalışmaları

Su muhtevası deneyi

Doğal su muhtevasında alınan numuneler laboratuvar ortamında serilerek kurutulmaya bırakıldı. ASTM D 2216/2005 standart metodu uygulanarak su muhtevası belirlendi. Yaklaşık 30-40 g numune iki ayrı kapta tartılarak (m_1) 105 ± 10 °C etüvde değişmez kütleye ulaşınca kadar kurutuldu (m_2). Numunedeki su miktarının ($m_1 - m_2$) kuru numune (m_1 -kap ağırlığı) miktarına oranı su muhtevası ($w_n = \%35,4$) olarak belirlendi.

Atterberg limitleri deneyleri

Likit limit deneylerinin tümü çarpmalı cihazla yarı logaritmik yöntem kullanılarak yapıldı. ASTM D 4318/2005 zeminin likit limit ve plastik limiti için standart test metodu standardı kullanılarak Atterberg limitleri belirlendi.

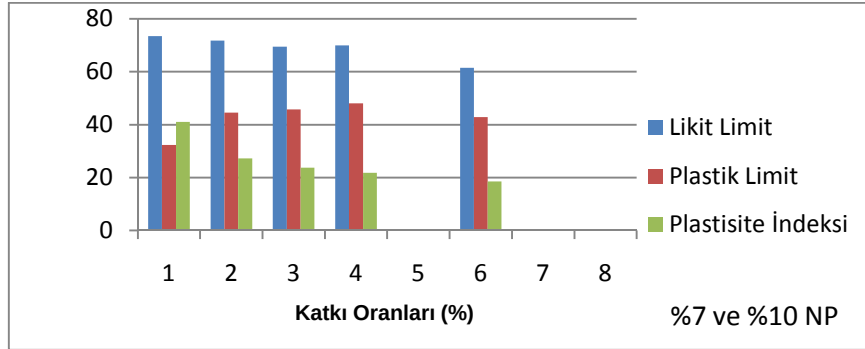
No.4 (0,425 mm göz açıklıklı) elekten elenen malzemedan 200 g kullanılarak numune karıştırma potasında macunumsu kıvama gelinceye dek karıştırıldı. Desikatörde 24 saat bekletildi. Daha sonra 10 dakika süreyle karıştırıldı. Casagrande cihazına yüzeyi yatayla paralel olacak şekilde yerleştirildi. Oluk açma bıçağı ile ortasından açılan oluğun saniyede 2 düşüş ile 13 mm kapandığı andaki ve bu bölgedeki su muhtevaları tespit edildi. Bu işlem 3 kez tekrarlandı. 25-35, 20-30, 15-25 arasında okunan değerler yarı logaritmik

kâğıda çizilerek 25 vuruş karşılık gelen değerdeki su muhtevası değeri likit limit olarak belirlendi.

Plastik limit değerlerinin belirlenebilmesi için likit limit deneyi için hazırlanan numunelerden 20 g kadar malzeme parmaklara yapışmadan kolayca yuvarlanabilecek homojen hale getirildi ve düz bir yüzeyde yaklaşık 3 mm çapındaki silindirlerde çatlama ve dağılmalar meydana gelinceye kadar el ile yuvarlandı. Bu durumdaki su içeriği tespit edilerek plastik limiti belirlenmiş oldu. Deney iki kez tekrarlanıp ortalaması alınarak plastik limit değeri tespit edildi. Likit limit ve plastik limit sonuçları grafikleştirilerek Çizelge 6.2’de ve Şekil 6.3’te sunulmuştur.

Çizelge 6.2. Atterberg limitleri ve doğal su muhtevası deney sonuçları

Katkı Oranları	Su İçeriği	Atterberg Limitleri		
	$\bar{W}_n$ %	LL %	PL %	PI %
Katkısız	35,4	73,4	32,3	41,1
%1 CS		71,8	44,6	27,2
%2 CS		69,5	45,7	23,8
%3 CS		69,9	48,1	21,8
% 5 Kireç		61,5	42,9	18,6
%7 Kireç		NP		
%10 Kireç		NP		



Şekil 6.3. Katkisız, %1-2-3 C+S ve %5-7-10 Kireç Katkılı numunelerin Atterberg limitleri ve plastisite indisleri

Şekil 6.3'te katkisız duruma göre C+S katkısının ilave edilmesi sonucunda kilin artan katkılarla azalma eğiliminde olan LL değerlerine karşın artma eğiliminde olan PL değerlerinin sonucu olarak PI değerleri %41,1'den %21,8 değerlerine düştüğü görülmektedir. Artan katkı oranlarında katkisız duruma göre kireç ilavesi de benzer şekilde, LL değerini azaltıp PL değerini artırmak suretiyle PI değerini azaltan bir eğilim sergilemiş ve %7 ve %10 katkılarda zeminin NP davranmasına neden olmuştur. Her iki katkı da işlenebilirliği artırmıştır ve malzemenin kalıcı deformasyonlarını azaltmıştır. Deney numuneleri Resim 6.1'de görülmektedir.

Tek eksenli büzülme deneyi

Likit limit deneyi için hazırlanan malzemeden 150 g kadar numune deneye alındı ve likit limit kıvamında homojen bir karışım haline gelene kadar damıtık su ile karıştırıldı. Tek eksenli büzülme kalıbına yerleştirildi, içindeki hava kabarcıklarının çıkması için kalıp sarsıldı ve üstü düzeltildi. Hava akımı etkisinden uzak bir yerde numune kalıp çeperlerinden çekilene kadar kurutuldu. Sonra büzülmenin büyük bölümü tamamlanana kadar 60-65 °C etüvde son olarak tam büzülme sağlanması amacıyla 105-110 °C etüvde kurutularak üstten ve alttan kumpas ile uzunluğu ölçüldü. Tek eksenli büzülme deneyi TS1900-1/2006 İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri standardına uygun olarak yapılmıştır.



Resim 6.1. Atterberg ve büzülme limiti deney numuneleri

Bağıl Yoğunluk (Özgül Ağırlık Deneyi)

Bentonitik kil numuneye, %1, %2, %3, C+S katkılı ve %5, %7, %10 kireç katkılı numunelere bağıl yoğunluk deneyi yapıldı. 50 ml'lik piknometreler boş ve kuru olarak tartıldı (m_1) ve 20 g kuru numune No.10 (2 mm) göz açıklıklı elekten elendi. İki piknometreye 10'ar g numune konularak tartım yapıldı (m_2). Malzemeyi örtecek kadar damıtık su ilave edildi, çalkalandı ve hava kabarcığı kalmayana kadar vakum desikatöründe bekletildi. Boyun kısmına kadar su konularak (20 ± 1) °C su banyosunda 1 saat bekletildi. Su seviyesindeki azalma damıtık su ile takviye edildi. Piknometre + numune + suyun sıcaklığı ölçüldü ve tartım yapıldı (m_3). Aynı işlem piknometre + su için tekrarlandı ve tartım yapıldı (m_4). Bağıl yoğunluk değeri aşağıdaki Eş. 6.1'e göre hesaplandı. Deney aynı anda 2 numuneye yapıldı ve iki değer arasında 0,02'den büyük fark olmadığı belirlendi. Özgül ağırlık deneyi TS 1900-1/2006 İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri standardına göre uygulanmıştır. Tek eksenli büzülme limiti ve özgül ağırlık deney sonuçları Çizelge 6.3'te verilmektedir.

$$Gs = \frac{\rho_L \times (m_2 - m_1)}{\rho_w \times ((m_4 - m_1) - (m_3 - m_2))} \quad (6.1)$$

Çizelge 6.3. Tek eksenli büzülme limiti ve özgül ağırlık deney sonuç tablosu

Katkı Oranları	Özgül Ağırlık	Tek eksenli büzülme
	Gs	Ls %
Katkısız	2,540	17
%1 CS	2,580	14
%2 CS	2,460	10
%3 CS	2,460	6
% 5 Kireç	2,600	1
%7 Kireç	2,630	0
%10 Kireç	2,620	0

Düşük katkı oranlarında, katkısız durumuna oranla artış gösteren özgül ağırlık değerleri C+S katkısının artan oranları ile başlangıç seviyesinin altına düşmüştür. Artan kireç oranlarında ise özgül ağırlık azalmış ancak başlangıç değerinin üzerinde kalmıştır.

Büzülme davranışını modellemek için yapılan lineer büzülme deneyi sonuçları değerlendirildiğinde kireç katkısı büzülme davranışını tümüyle ortadan kaldırmıştır. C+S katkısı için ise bu durum %3 katkı oranında ancak %65 mertebesinde seyretmiştir.

Elek analizi deneyi

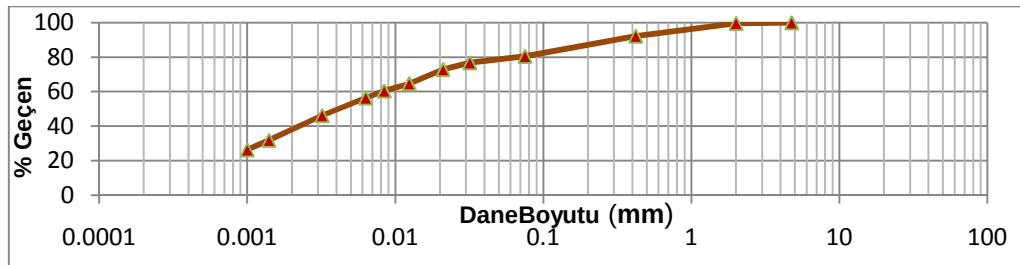
Elek analizine tabi olacak temsili numune tüm numuneler iyice harmanlandıktan sonra yarılama ve çeyreklemeye metodu ile alındı. 105 ± 10 °C 24 saat kurutulan malzeme geniş bir tepsi içinde 1 litresine 2 g sodyum hekza meta fosfat katılmış suyun içinde ara sıra karıştırılarak 1 gün bekletildi. Daha sonra yavaşça No. 40 + No. 200 eleğin üzerine aktarıldı ve sürekli akan suyun altında yıkanarak elendi. Su berraklaşınca, No. 200 elek üstünde kalan malzeme, porselen potalarda 105 ± 10 °C'deki etüvde 24 saat kurutuldu.

Elek serisinden elendi. Elek üstünde kalan malzeme tartılarak, toplam numune ağırlığı esas alınır kalan ve geçen numune yüzdesi hesaplandı. Elek analizi deneyi TS 1900-1/2006 İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri standardına uygun olarak yapılmıştır.

Hidrometre deneyi

Organik madde içermediği belirlenen malzemeden 200 g kadarı No. 200 göz açıklıklı elekten elendi. 105 ± 10 °C etüvde 24 saat kurutuldu. 50 g malzeme karıştırma kabına konuldu. 100 ml dispersiyon verici çözelti (1 litre suda 33 g sodyum hekza fosfat, pH 8-9) ilave edilerek 15 dakika 3000 devir/dakika hızla karıştırıldı. 1000 ml'lik mezüre geçirilen karışıma damıtık su ilave edildi. Mezürün ağzı lastik tıpa ile kapatıldı ve homojen bir süspansiyon oluncaya kadar karıştırıldı. Düz bir yüzeye konularak kronometre çalıştırıldı. Hidrometre serbest yüzmeye bırakıldı. 2., 5. ve 15. dakikalarda okuma alındı. Mezür çıkartıldı. 15. 30. 60. 250. ve 1440. dakikalarda aynı işlem tekrarlandı. Deney ASTM D 422/2002 Zeminlerin partikül boyutu analizi test metoduna göre yapılmıştır.

Yarı logaritmik elek analizi ve hidrometre grafiği süperpoze edilerek Şekil 6.4'te sunulmuş, sayısal deney sonuçları Çizelge 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4. Yarı logaritmik elek analizi ve hidrometre grafiği

Çizelge 6.4. Elek analizi ve Hidrometre deney sonuçları

DANE BOYUTU DAĞILIMI	ELEK ANALİZİ (% GEÇEN)	ASTM elekleri		
		inç	mm	
		3	75	
		2	50	
		1 ½	37,5	
		1	25	
		¾	19	
		3/8	9,5	
		No.4	4,75	100
		No.10	2	99,6
		No.40	0,42	92,6
		No.200	0,075	80,8
	HIDROMETRE ANALİZİ	0,0318		76,8
		0,021		72,8
		0,0124		64,6
		0,0084		60,5
		0,0063		56,4
		0,0032		46,2
		0,0014		31,8
		0,001		26,3

pH deneyi

Kireç katkı oranının belirlenmesi için Eades ve Grim tarafından önerilen pH deneyi metodu için havada kurutulmuş numuneye %100 damıtık su ilave edilerek kalibre edilmiş pH metre ile katkısız ve %5, %7, %10 kireç katkılı zemin numunelerinin pH değerleri ölçüldü. Bu deney TS 6166/88 standart test metoduna uygun olarak yapılmış olup hazırlanmış olan rapor EK-4'te verilmiştir. Metoda göre pH 12,4 değerini sağlamamış olmasına rağmen numune NP kıvama ulaştığı için daha fazla katkı denenmemiştir. Deney sonuçları Çizelge 6.5'te verilmiştir.

Çizelge 6.5. pH deney sonuçları

Katkı	pH değerleri
Katkısız	8,58
%5	12,01
%7	12,08
%10	12,10

Standart Proktor Deneyleri

Kil numuneye %1, %2, %3 oranlarında C+S ve %5, %7, %10 oranlarında kireç katılarak proktor deneyleri yapılmıştır. $\gamma_{dmax}-w_{opt}$ ilişkileri belirlenmiştir. Kullanılan kalıplar, ince daneli malzeme için önerilen, çapı 105 mm, boyu 115,5 mm olan ebatlarda seçilerek tartıldı (w_1) ve hacmi hesaplandı (V). Otomatik proktor cihazı ile 2,5 kg'lık ağırlığın, 305 mm'lik yükseklikten serbestçe 25 vuruşu ile oluşan sıkıştırma enerjisi, zemin numunesini mevcut kalıba üç tabaka halinde sıkıştırarak şekilde uygulandı (Resim 6.2) ve tartım yapıldı (w_2). İlk önce plastik limitin %12-15'i kadar su ilave edilerek iyice karıştırılan numune, sıkıştırılarak tartıldı ve su içeriği belirlendi (w). Daha sonra %2-3'lük artışlarla su miktarı artırılarak 5-7 kez arasında arası deney tekrarlandı. Sıkıştırılmış malzemenin yaş birim ağırlığı Eş. 6.2'den hesaplanır. Zeminin kuru birim hacim ağırlığı ise Eş. 6.3'ten bulunur. Deneyde TS 1900-1/2006 zeminin kuru birim hacim ağırlık su içeriği bağıntısının 2,5 kg'lık tokmakla elde edilmesi (standart enerji) standart metodu kullanıldı. Deney sonuçları Çizelge 6.6'da, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da verilmiştir. Proktor deneyine ait resimler Resim 6.2'de sunulmuştur.

$$\gamma = (w_2 - w_1) / V \quad (6.2)$$

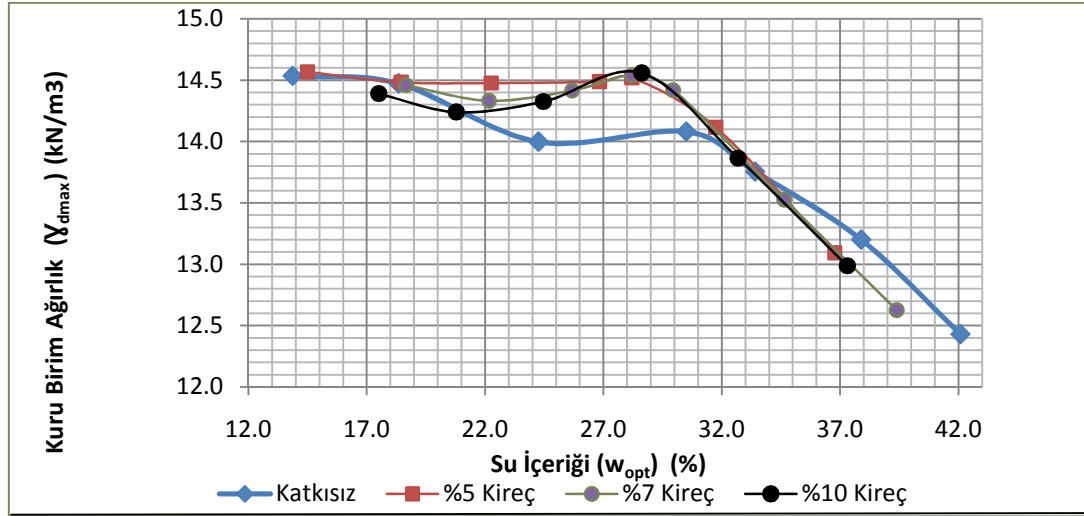
$$\gamma_d = 100 \times \gamma / (100 + w) \quad (6.3)$$

Çizelge 6.6. Standart proktor deney sonuçları

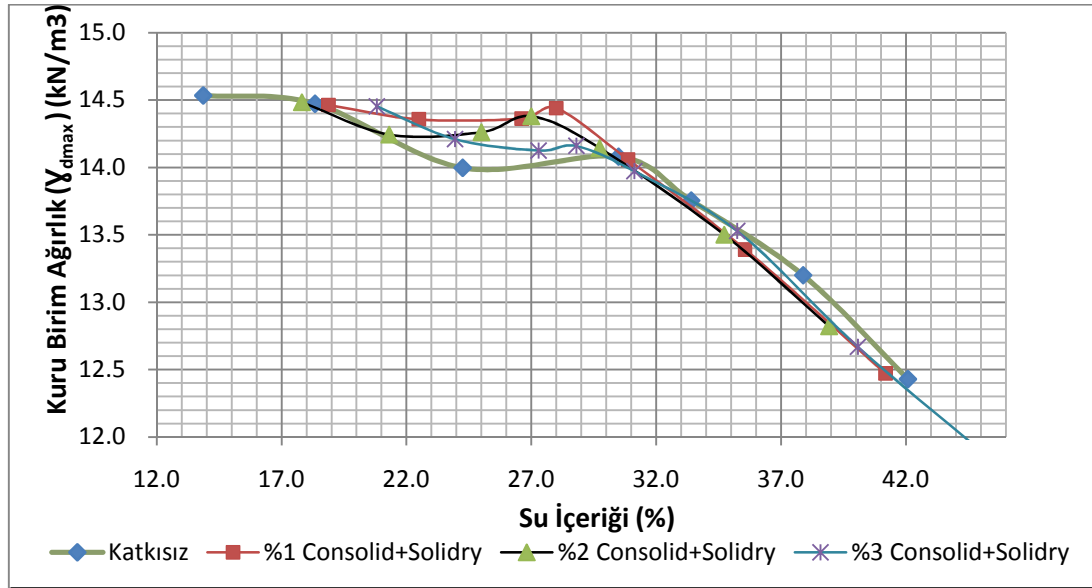
Katkı Oranları	Proktor	
	W_{opt} %	γ_{dmax} KN/m ³
Katkısız	30,5	14,08
%1 CS	28,0	14,44
%2 CS	27,0	14,38
%3 CS	28,8	14,16
% 5 Kireç	28,2	14,52
%7 Kireç	28,2	14,54
%10 Kireç	27,2	14,66



Resim 6.2. Proktor deneyi uygulanışı



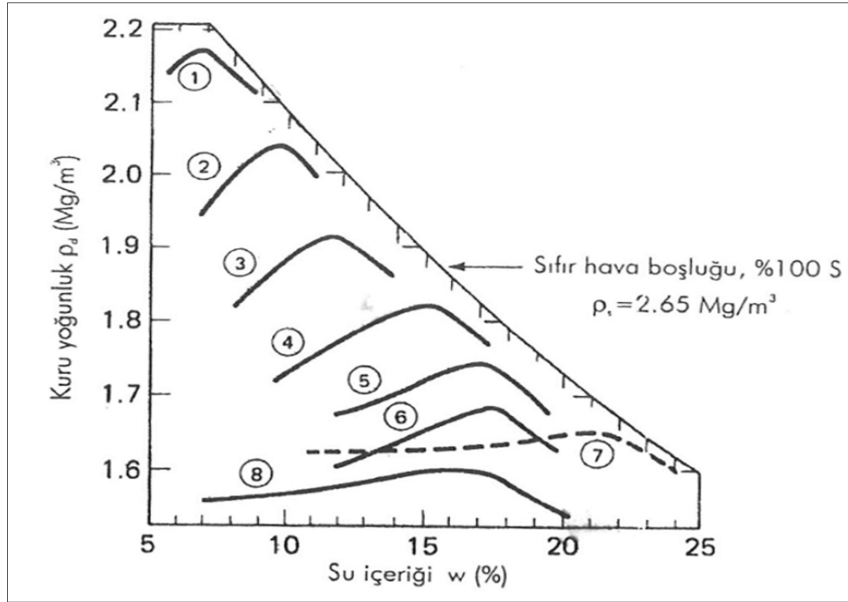
Şekil 6.5. Katkısız ve kireç katkılı numunelerin proktor deney sonuçları (γ_{dmax} - w_{opt} eğrileri)



Şekil 6.6. Katkısız ve C+S katkılı numunelerin proktor deney sonuçları (γ_{dmax} - w_{opt} eğrileri)

Standart proktor deneylerinde, proktor eğrilerinin düşük su muhtevalarından optimum su muhtevasına ulaşana kadar olan bölgede düzleşme karakteristiği gösterdiği tespit edilmiştir. Bu tip proktor eğrilerinin tipik kohezyonsuz zemin sıkışma eğrilerine benzerlik gösterdiği görülmüştür (Şekil 6.6). Bu grafikte 1 ve 2 iyi derecelenmiş kum, 3 orta derecelenmiş kum, 4 yağsız kumlu siltli kil,

5 yağsız siltli kil, 6 l6s kili, 7 ağır kil ve 8 kötü derecelenmiş kumdur. Bunun nedeninin silt içeriğinin %40 olması olduğu d6ř6n6lmektedir.



şekil 6.7. Farklı zeminler için tipik proktor eğrileri (Johnson ve Sallberg) [2].

Her iki katkı çeşidinin de zeminin optimum su içeriği değerinde %1'lik bir azalmaya sebep olduğu anlaşılmaktadır. Artan kireç katkısı oranı ile kuru birim hacim ağırlık değerleri artmaya devam etmiştir.

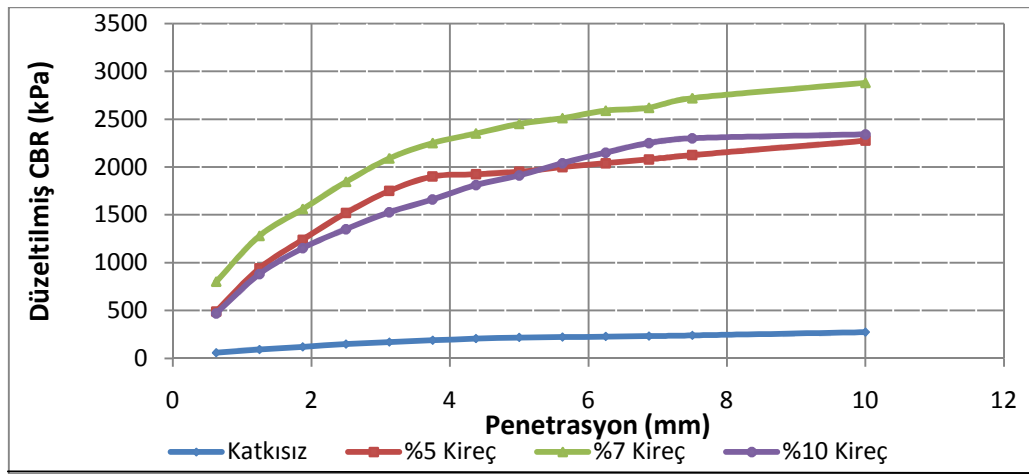
%1 C+S katkısı ile kuru birim hacim ağırlık değeri 14,44 kg/cm³'e y6kselmiş olmakla birlikte artan katkı oranıyla azalma g6stermiştir.

CBR deneyleri

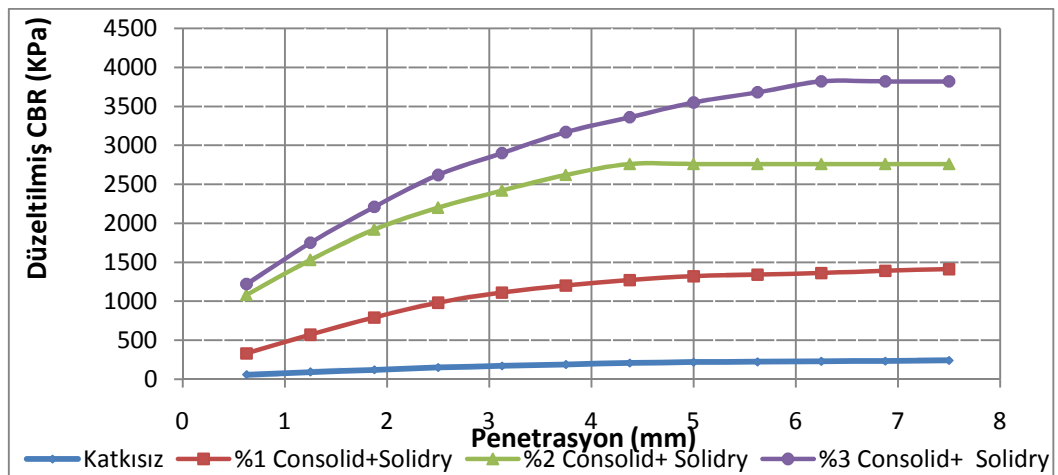
4 inçlik CBR kalıbında, Standart Proktor y6ntemi ile belirlenen optimum su içeriğinde hazırlanan katkısız bentonitik killi, %1, %2, %3, C+S karışımlı ve %5, %7, %10 kireç katkılı kil numunelere CBR deneyi uygulandı. CBR test cihazında katkısız ve t6m katkılı durumlar için hazırlanan ikişer numuneye, deney hızı 1,27 mm/dakika (0,05 in/dk) olacak şekilde ve standart derinliklerde (2,54 mm, 5,08 mm, 7,62 mm, 10,16 mm ve 12,70 mm)

penetrasyon pistonu batırıldı. Bunlara karşılık belirlenmiş kırma taşa ait standart gerilme değerleri ($70,4 \text{ kgf/cm}^2$, $105,6 \text{ kgf/cm}^2$, $133,7 \text{ kgf/cm}^2$, $161,9 \text{ kgf/cm}^2$, 183 kgf/cm^2)'ne göre okunan değerler standart gerilme değerlerine, oranlanarak CBR değerleri Eş. 6.5'ten hesaplandı. Deney AASHTO-T193 /2007 CBR standart test metodu kullanılarak yapılmıştır.

$$\% \text{CBR} = \text{Düzeltilmiş basınç} \times 100 / \text{Standart basınç} \quad (6.4)$$



Şekil 6.8. Katkısız ve kireç katkı numunelerinin CBR deney sonuçları



Şekil 6.9. Katkısız ve C+S katkı numunelerinin proktor deney sonuçları

Katkısız halde CBR dayanımı 2 olan zeminin %1 C+S ile 14'e yükselen değeri %3 C+S ile 38'e ulaşmıştır.

Kireç için bu durum %5 kireç katkısıyla 20 değerine yükselmiş, ancak artan kireç oranları ile bir artış bir azalış şeklinde düzensiz bir dağılım sergilemiş ve %10 kireç için 21,5'e yükselmiştir.

CBR deneyi sonuçları Çizelge 6.7'de ve CBR deneyinin uygulamasına ait bir görüntü Resim 6.3'te verilmiştir.

Çizelge 6.7. CBR deneyi sonuçları

Katkı Oranları	CBR	
	CBR	Şişme %
Katkısız	2,0	7,6
%1 CS	14,0	1,3
%2 CS	29,4	0,3
%3 CS	38,3	0,2
% 5 Kireç	20,0	0,7
%7 Kireç	25,0	0,2
%10 Kireç	21,5	0,1



Resim 6.3. CBR deneyi uygulanişı

Serbest basınç deneyi

Deney, bentonitik kil numuneye katkısız ve %1, %2, %3, C+S katkılı ve %5, %7, %10 kireç katkılı numunelere uygulandı. 4 inçlik proktor kalıplarında optimum su muhtevalarında standart proktor sıkılığında sıkıştırılan katkılı ve katkısız malzemelerden numune çıkarıcı kriko vasıtası ile alınan çap/boy oranı 2-2,5 arasında olan serbest basınç deney numuneleri tartıldı. Çapı (D) ve boyu (H_0) ölçülen numuneler daha sonra 1 ξ /dak (0,8 mm/dak) hızla aksenal olarak yüklendi ve 0,25 ξ deformasyonlara karşılık gelen yük halkası okumaları (YHO) kaydedildi. Yük halkası okumaları, ring faktörü (kullanılan cihaz için $RF = 0,208$) ile kuvvete dönüştürüldü. numune başlangıç alanı belirlenip (A_0), düzeltilmiş alan Eş. 6.5 ve Eş. 6.6'dan hesaplandı (A). Kuvvet düzeltilmiş alana bölünerek serbest basınç mukavemetleri (q_u), Eş. 6.7' den bulundu. Kurutulan numuneler tartılarak su muhtevaları belirlenip deneyler tamamlandı.

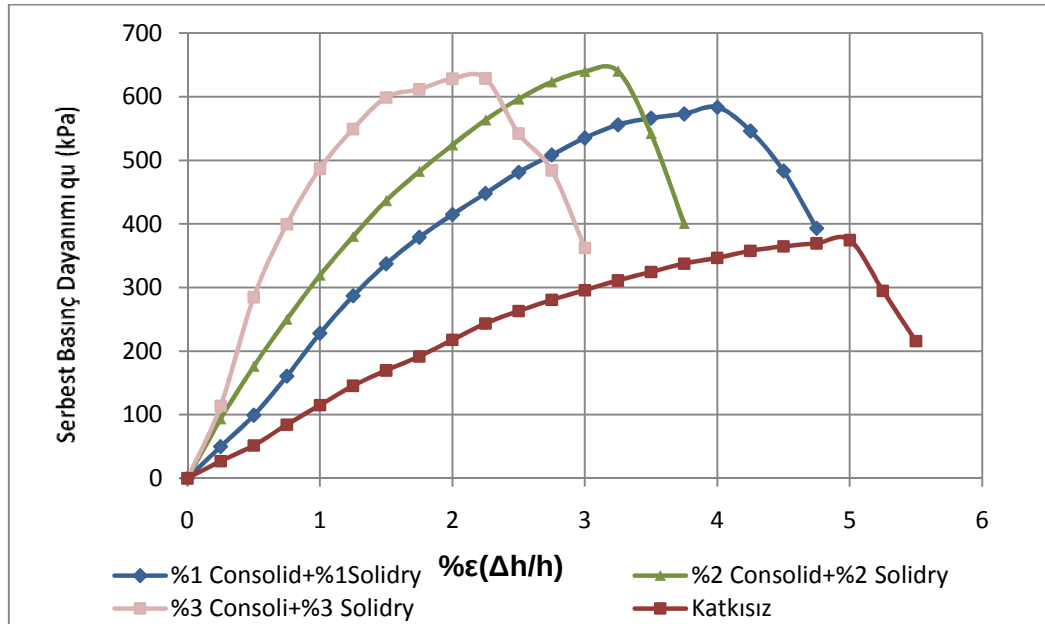
Katkısız ve tüm katkı oranlarında 7 gün ve 28 gün %95 nem ortamında kür edilen numunelere de serbest basınç deneyleri uygulanarak zamana dayalı davranış durumu belirlenmeye çalışıldı.

Bunun ardından 7 gün %95 kür ortamında bekletildikten sonra donma ve çözünme davranışını belirlemeye yönelik olarak 5 gün, gün aşırı -20 °C,+20 °C de kür edilen numuneler üzerinde deney tekrarlandı. Tüm serbest basınç deneyleri TS 1900-2 standardına uygun olarak gerçekleştirildi. Çizilen grafiklerden eğrinin başlangıç kısmının tanjantı ile elastisite modülü (tanjant modülü) değerleri hesaplandı. EK-11'de örnek gösterim verilmiştir.

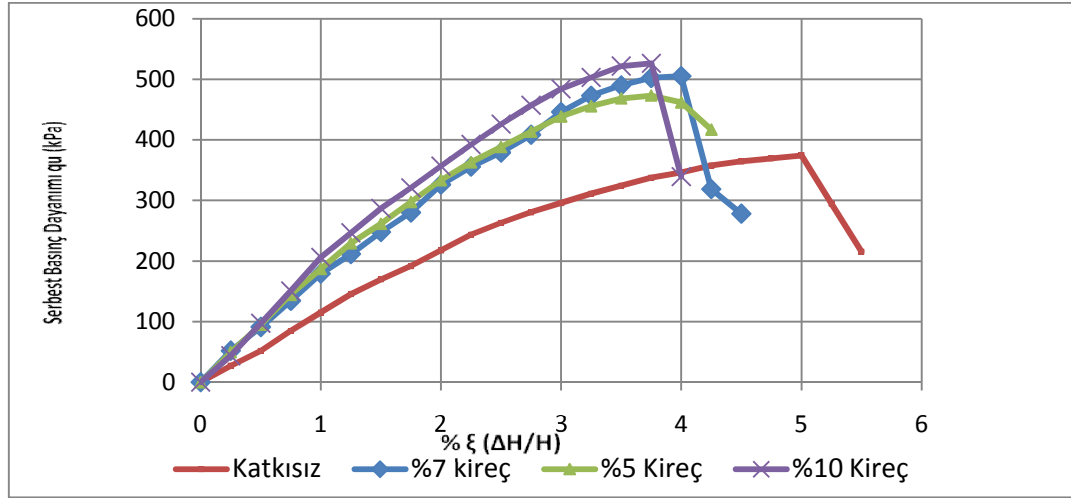
$$\xi = \Delta H / H_0 \quad (6.5)$$

$$A = A_0 / (1 - \xi) \quad (6.6)$$

$$q_u = YHO \times RF / A \quad (6.7)$$



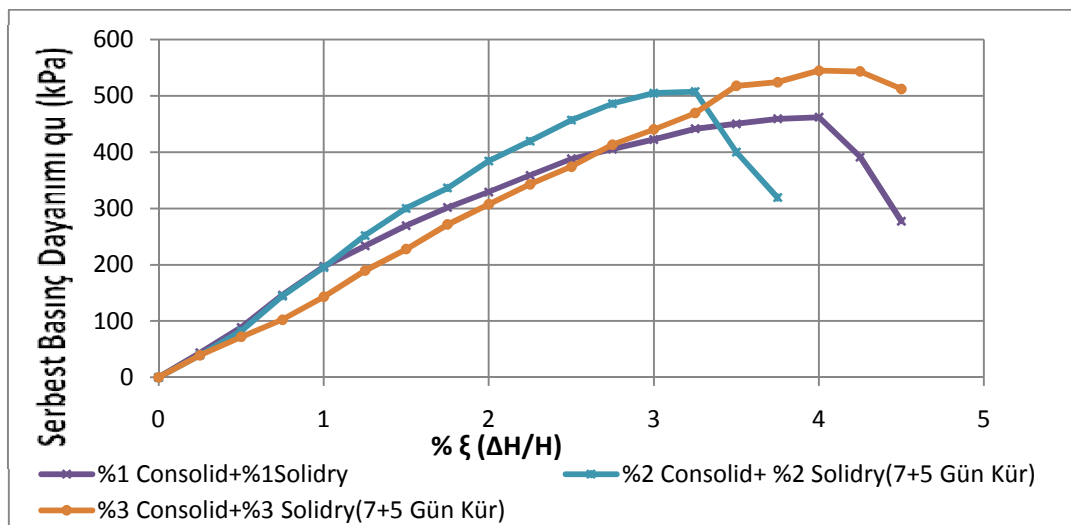
Şekil 6.10. Katkısız ve C+S katkısı ile yapılan serbest basınç deney sonuçları



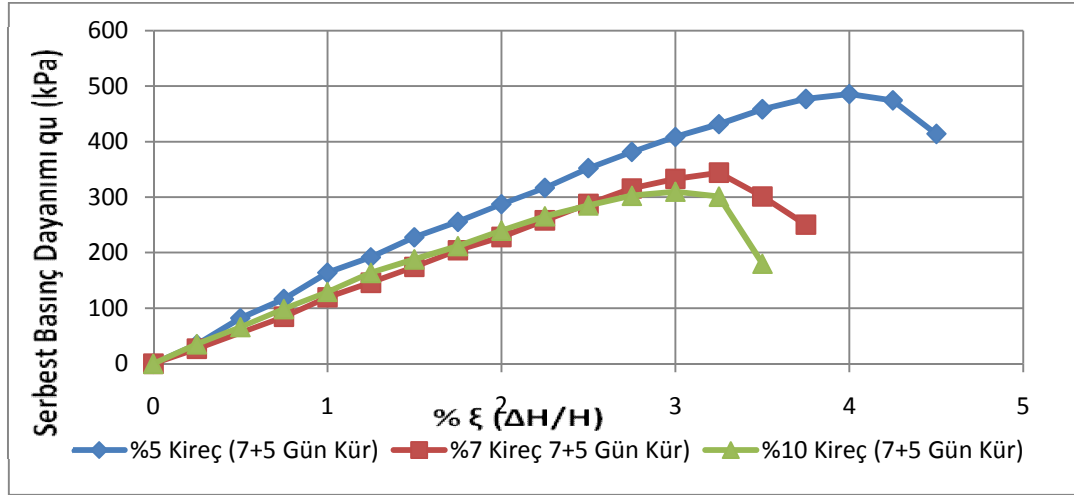
Şekil 6.11. Katkısız ve Kireç katkısı ile yapılan serbest basınç deney sonuçları

Çizelge 6.8. Kürsüz serbest basınç deney sonuçları

	q_u (kPa)	ξ (%)	γ_n (kN/m ³)	E (MPa)
Katkısız	375	5	19,18	11,5
%1C+%1S	585	4	19,42	22,8
%2C+%2S	640	3,25	19,22	31,9
%3C+%3S	629	2,25	19,37	48,7
%5 Kireç	473	3	19,18	17,9
%7 Kireç	505	4	19,16	18,7
%10 Kireç	527	3,75	19,18	20,6



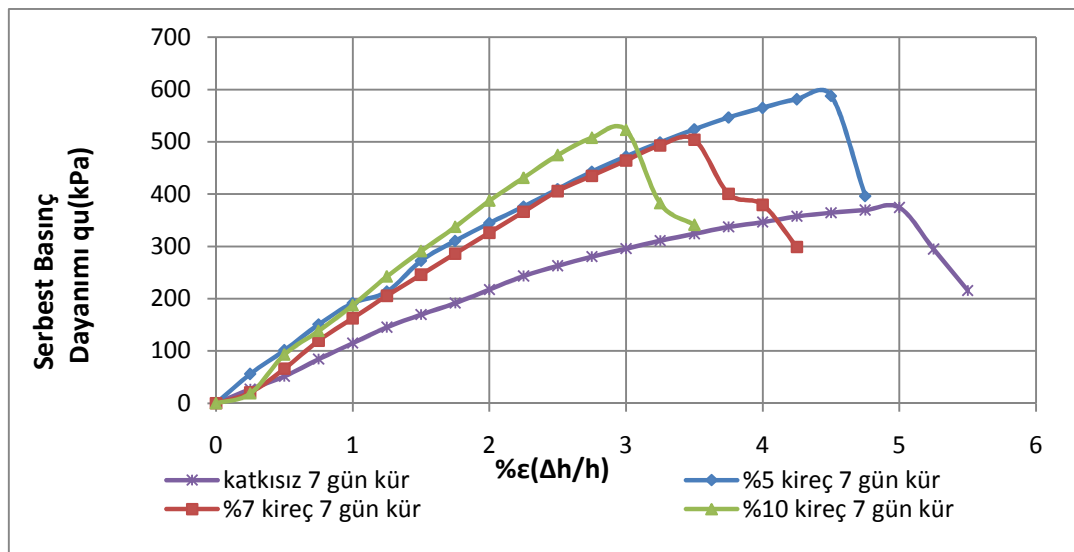
Şekil 6.12. C+S katkısı ile 7+5 (±20 °C) gün kürlü deney sonuçları



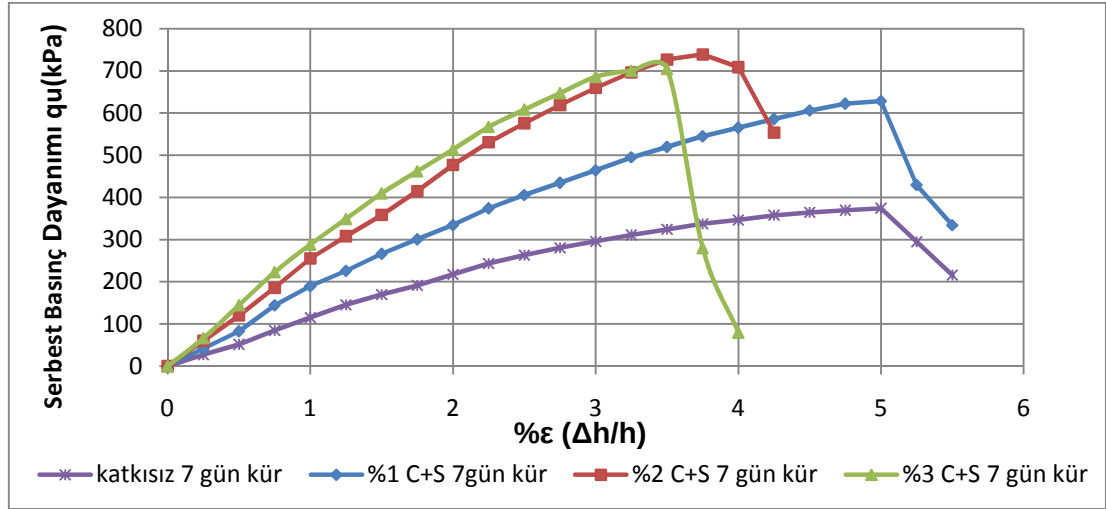
Şekil 6.13. Kireç katkısı ile 7+5 ($\pm 20^\circ\text{C}$) gün kürlü deney sonuçları

Çizelge 6.9. 7+5 gün $\pm 20^\circ\text{C}$ kürlü serbest basınç deney sonuçları

7+5 gün kür ile	q_u (kPa)	ξ (%)	γ_n (kN/m ³)	E (MPa)
%1C+%1S	462	4	19,46	19,7
%2C+%2S	508	3,25	19,17	19,5
%3C+%3S	545	4	19,19	14,3
%5 Kireç	485	4	19,35	16,3
%7 Kireç	344	3,25	19,39	11,9
%10 Kireç	310	3	19,44	12,9



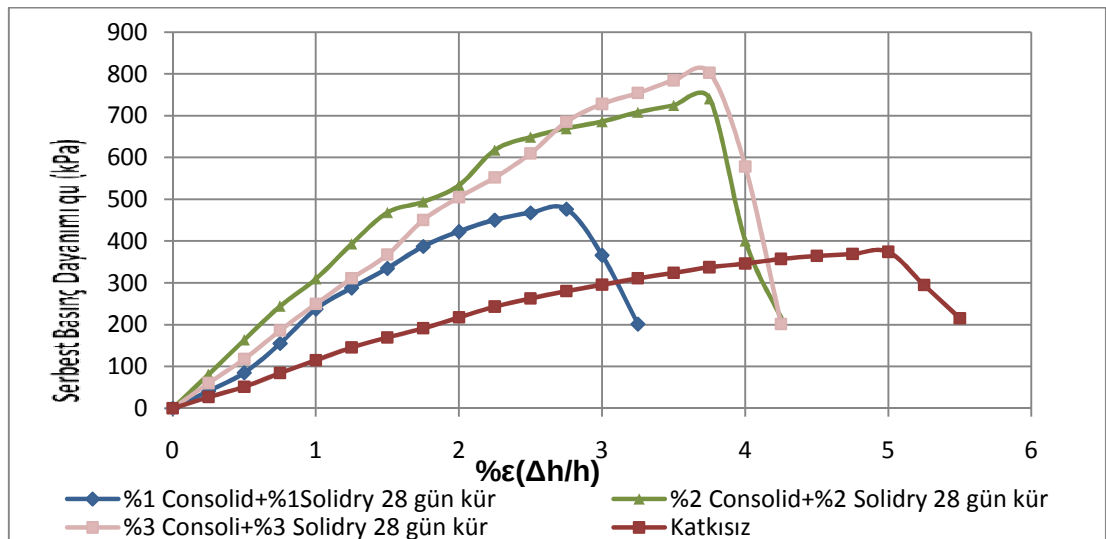
Şekil 6.14. Kireç ile 7 gün kürlü serbest basınç deney sonuçları



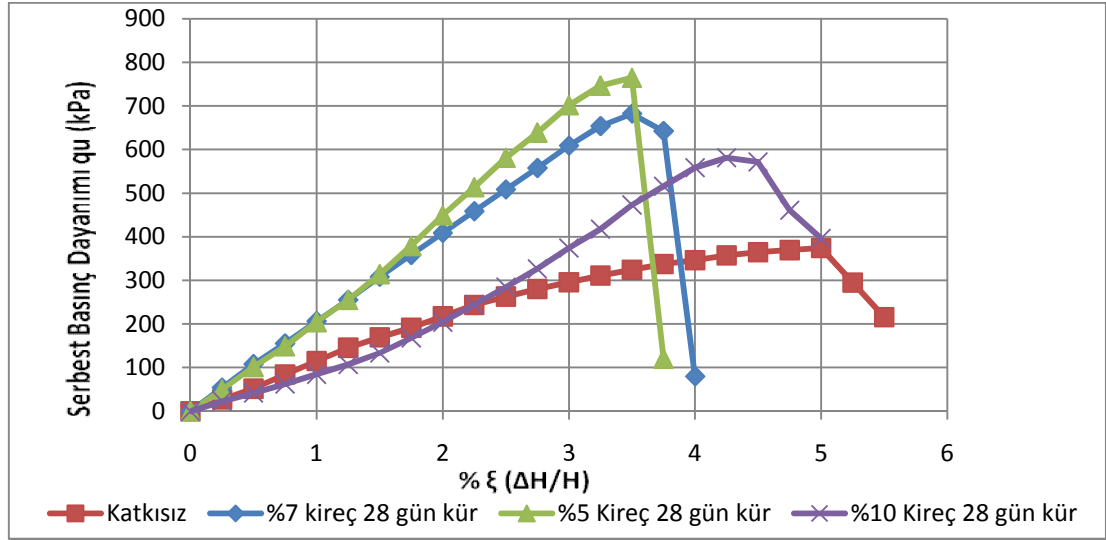
Şekil 6.15. C+S katkısı ile 7 gün kürlü serbest basınç deney sonuçları

Çizelge 6.10. 7 gün kürlü serbest basınç deney sonuçları

7 gün kür	qu (kPa)	ξ (%)	γ_n (g/cm ³)	E(MPa)
%1C+%1S	628	5	19,49	18,9
%2C+%2S	739	3,75	19,35	25,5
%3C+%3S	704	3,5	19,30	28,8
%5 Kireç	588	4,5	19,10	19,2
%7 Kireç	504	3,5	19,20	16,3
%10 Kireç	522	3	19,30	18,7



Şekil 6.16. C+S katkısı ile 28 gün kürlü deney sonuçları



Şekil 6.17. Kireç katkısı ile 28 gün kürlü deney sonuçları

Serbest basınç deneyleri kürsüz (Şekil 6.10, Şekil 6.11 ve Çizelge 6.8), 7 ve 28 gün kürlü (Şekil 6.12 ile Şekil 6.15 arasında Çizelge 6.9 ve Çizelge 6.10) 7 + 5 gün ($\pm 20^\circ\text{C}$) ayrıca (donma çözünme durumu modellenmesi amacıyla) (Şekil 6.16 ve Şekil 6.17 ve Çizelge 6.11) 7 gün kür sonrasında 5 gün donma çözünme çevrimli deneye tabi tutulmuştur.

Kürsüz serbest basınç dayanımları değerlendirildiğinde %1-2-3 C+S katkısının dayanım değerini katkısız numuneye nazaran aynı sırayla %56-71-68 oranlarında artırmıştır. Benzer şekilde %5-7-10 kireç katıldığında serbest basınç dayanımını aynı sırada %26-35-41 oranında artırdığı belirlenmiştir.

Çizelge 6.11. 28 gün kürlü serbest basınç deney sonuçları

7+5 gün kür ile	q_u (kPa)	ξ (%)	γ_n (kN/m ³)	E (MPa)
%1C+%1S	477	2,75	18,45	29,5
%2C+%2S	741	3,75	19,30	26
%3C+%3S	803	3,75	19,02	25
%5 Kireç	765	3,5	18,99	20
%7 Kireç	709	3,75	19,38	20
%10 Kireç	586	4	18,75	10

7 gün kür sonunda C+S katkısı serbest basınç dayanım değerlerini katkısız dayanımlarına göre %7-15-11 mertebesinde artırmaya devam ederken, Kireç katkısında %7-%10 katkı oranlarında serbest basınç dayanımı değerlerinde kayda değer bir değişme gözlenmemiştir. %5 kireç katkı oranında ise %24'lük bir artış görülmüştür.

28 gün kür sonunda %1 C+S katkısı için serbest basınç dayanımı değeri %32 oranında azalmış, %2 C+S için kayda değer bir değişim olmamış ve %3 C+S için ise %14 oranında artmaya devam etmiştir. %5-7-10 kireç katkısı için serbest basınç dayanımı 7 gün kürlü numuneye göre %30-41-11 oranlarında artmıştır.

Çizelge 6.12. Serbest basınç deney sonuçları

Katkı Oranları	Serbest Basınç (Kürsüz)			Serbest Basınç (7Gün Kür)			Serbest Basınç (7+5Gün Kür)			Serbest Basınç (28Gün Kür)		
	q_u kPa	ε %	γ_n kN/m ³	q_u kPa	ε %	γ_n kN/m ³	q_u kPa	ε %	γ_n kN/m ³	q_u kPa	ε %	γ_n kN/m ³
Katkısız	374	5,00	19,18									
%1 CS	585	4,00	19,42	628	5,00	19,49	462	4,00	19,46	477	2,75	18,45
%2 CS	640	3,25	19,22	739	3,75	19,35	508	3,25	19,55	741	3,75	19,30
%3 CS	629	2,25	19,37	704	3,50	19,30	545	4,50	19,19	803	3,75	19,02
% 5 Kireç	473	3,00	19,18	588	4,5	19,10	485	4,00	19,35	765	3,5	18,99
%7 Kireç	505	4,00	19,18	504	3,50	19,20	344	3,25	19,39	709	3,75	19,38
%10 Kireç	527	3,75	19,16	522	3	19,30	310	3,00	19,44	586	4	18,75

7 gün kür ardından 5 kez tekrarlı donma ve çözülme deneyine tabi tutulan numunelerde C+S katkısı artan oranları 7 gün kürlü numuneye göre %36-46-29'luk azalış gözlenirken, kireç katkısı için artan oranlara göre %21-47-68'lik azalış gözlenmiştir. Donma çözünme çevrimi ile malzemeler dayanım kaybına uğramaktadır. Tüm serbest basınç deney sonuçları Çizelge 6.12'de verilmiştir.

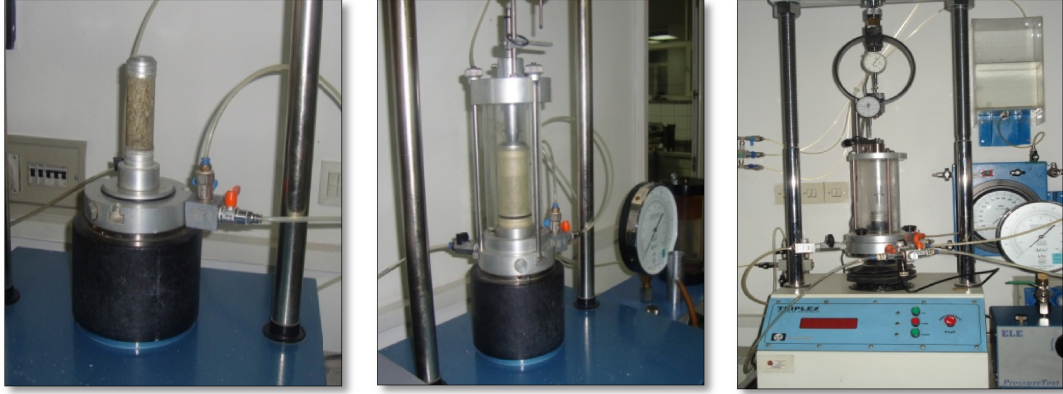
Üç eksenli basınç deneyleri

4"lik proktor kalıplarında optimum su muhtevalarında standart proktor sıkılığında sıkıştırılan katkılı ve katkısız malzemelerden numune çıkarıcı krikovası ile alınan çap / boy oranı 2-2,5 arasında olan serbest basınç deney numuneleri tartıldı. Deney, bentonitik kil numuneye ve %1, %2, %3, C+S karışım ve %5, %7, %10 kireç katkılı numunelere uygulandı Çapı (D) ve boyu (H₀) ölçülen numuneler daha sonra üç eksenli basınç hücresine yerleştirilerek, her grup numuneye 1-2-3 kg/cm² çevre basınçlarında deney yapıldı. 1 ξ/dak (0,8 mm/dak) hızla eksenel olarak konsolidasyonsuz ve drenajsız (UU) koşullarda yüklendi. Ring faktörü 0,208 olan yük halkası okumaları (YHO) 0,25 ξ aralıklarla alındı. Deviator (σ₁-σ₃) gerilme Eş. 6.8, Eş. 6.9 ve Eş. 6.10 ile hesaplandı. TS 1900-2/2006 standardına uygun olarak deney yapılmıştır.

$$\xi = \Delta H / H_0 \quad (6.8)$$

$$A = A_0 / (1 - \xi) \quad (6.9)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = YHO \times RF / A \quad (6.10)$$



Resim 6.4. Üç eksenli basınç deney düzeneği

Katkısız ve tüm katkı oranlarında üç eksenli konsolidasyonsuz drenajsız (UU) basınç testi yapılmıştır. Deney düzeneğinin resmi Resim 6.4'te sunulmuştur. 100-200-300 kPa çevre basınçlarında gerçekleştirilen deneyler incelendiğinde; her iki katkının düşük oranlarında doğal birim hacim ağırlık değerleri katkısız numuneye oranla artış göstermiş ancak artan katkı oranları ile bu değerlerin katkısız değerden daha aşağıya düştüğü görülmüştür.

Ayrıca katkısız numuneye konsolidasyonlu drenajsız (CU) üç eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 6.13'te ve EK-12'de verilmiştir.

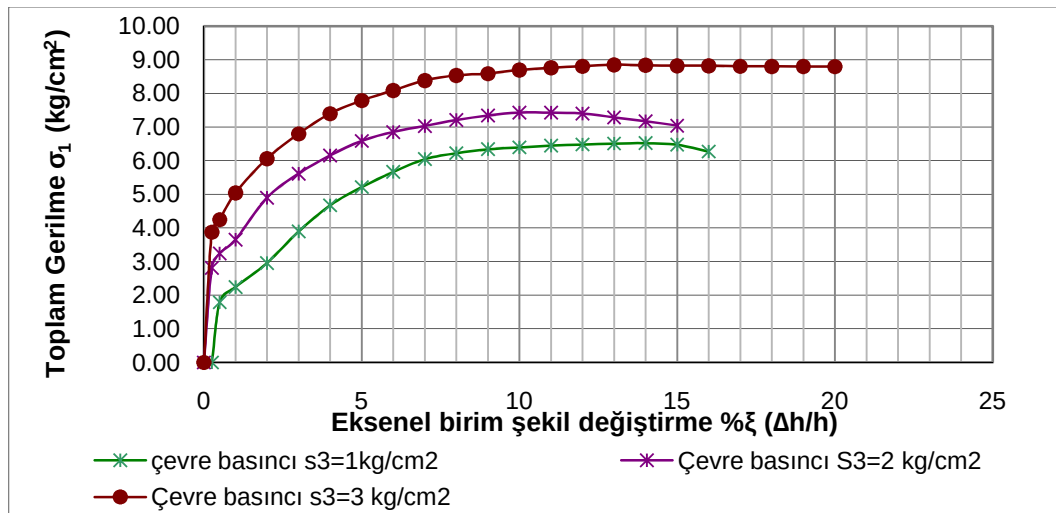
Çizelge 6.13. Üç eksenli basınç (CU) deney sonuçları

C (kPa)	C' (kPa)	ϕ (°)	ϕ' (°)
17,7	9,78	16,6	25,4

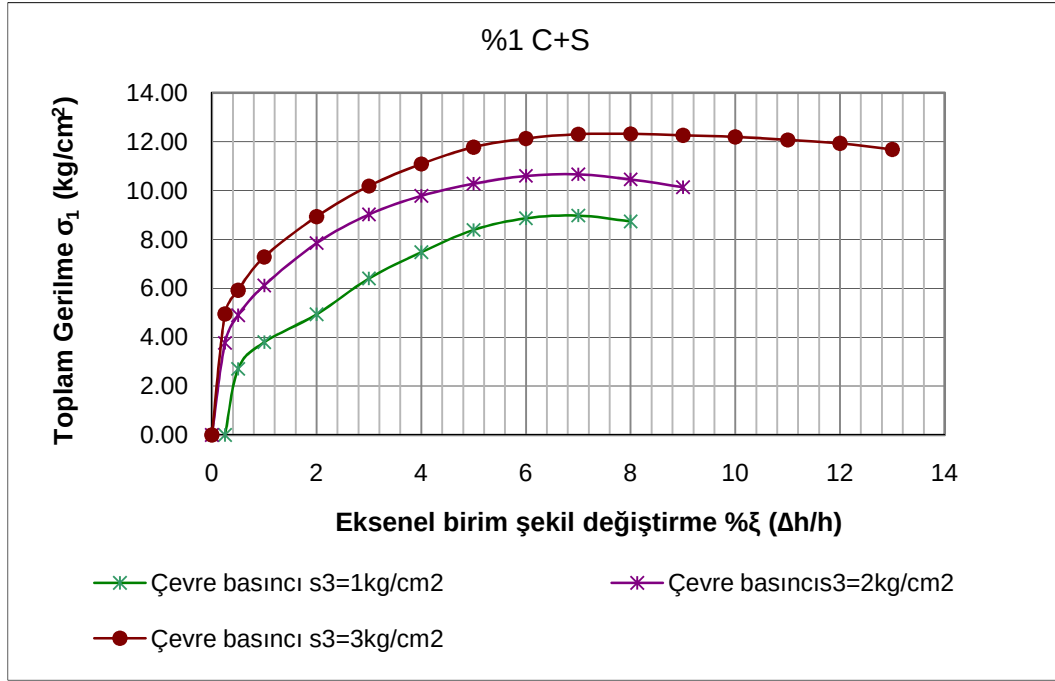
Üç eksenli basınç deneyleri sonuçları değerlendirildiğinde (Çizelge 6.14) iki farklı katkının oldukça benzer davranış gösterdikleri görülmüştür. Artan katkı miktarı ile kohezyon değerleri azalırken, içsel sürtünme açısı değerleri artmıştır. Tüm katkı oranları için toplam gerilme eksenel şekil değiştirme grafikleri Şekil 6.18 ile Şekil 6.24 aralığında sunulmuştur.

Çizelge 6.14. Üç eksenli basınç deneyi (UU) sonuçları

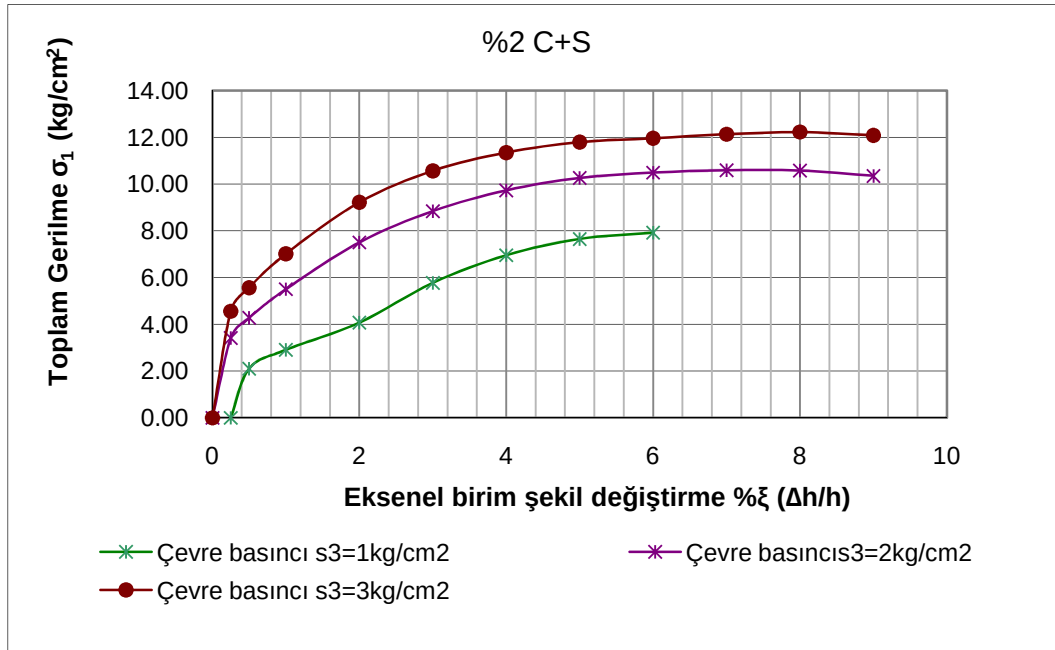
Katkı Oranları	Üç Eksenli Basınç Deney Sonuçları					
	γ_n g/cm ³	c kPa	ϕ (°)	ε (%)	σ_3 kPa	$\sigma_1 - \sigma_3$ kPa
Katkısız	1,923	236	5	13 10 13	100 200 300	552 543 585
%1 CS	1,939	282	15	6 7 8	100 200 300	797 867 932
%2 CS	1,911	265	17	4 6 6	100 200 300	793 866 952
%3 CS	1,907	196	21	2 3 5	100 200 300	687 809 917
% 5 Kireç	1,935	237	17	5 8 8	100 200 300	719 848 890
%7 Kireç	1,928	201	21	5 7 8	100 200 300	692 859 922
%10 Kireç	1,907	196	22	5 7 8	100 200 300	698 851 941



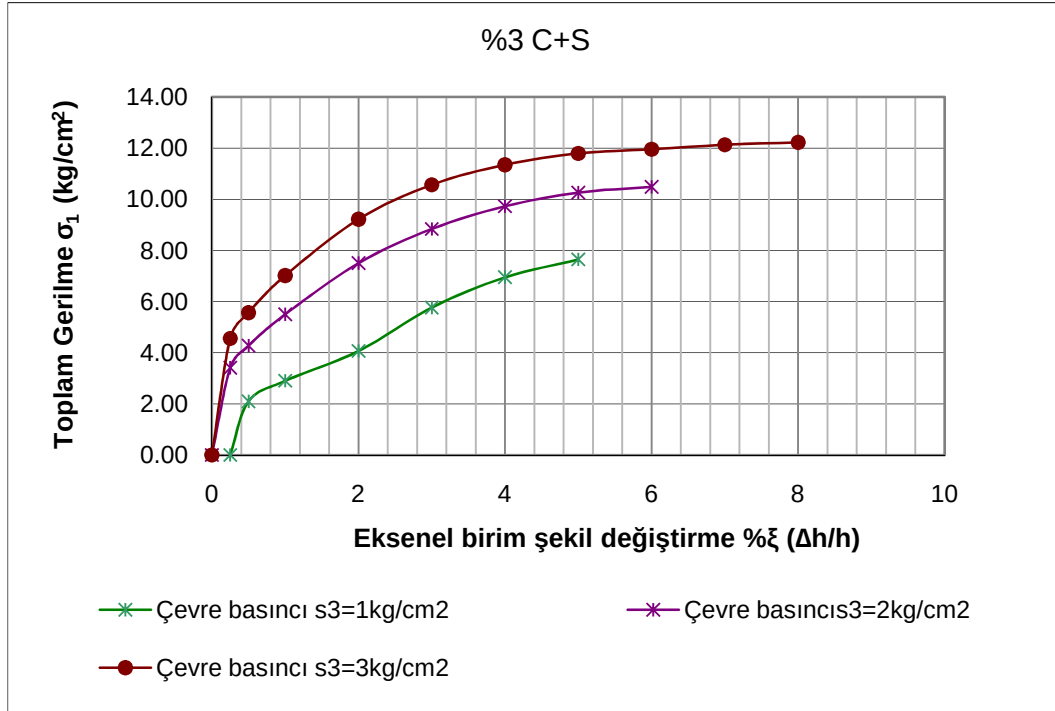
Şekil 6.18. Katkısız numune üç eksenli basınç deney sonucu



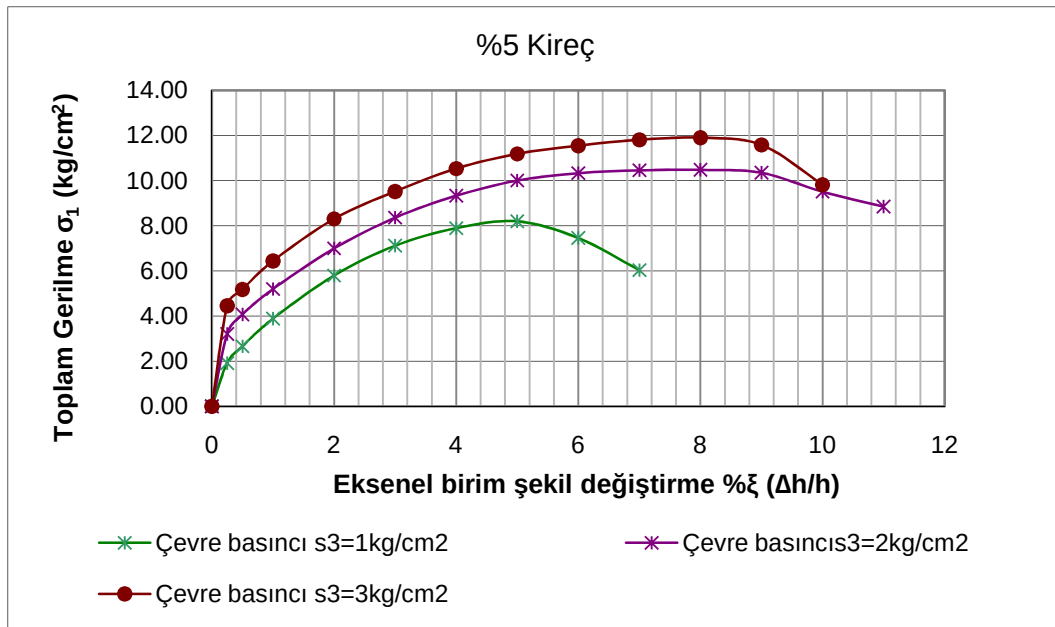
Şekil 6.19. %1 C+S katkılı numunenin üç eksenli basınç deney sonucu



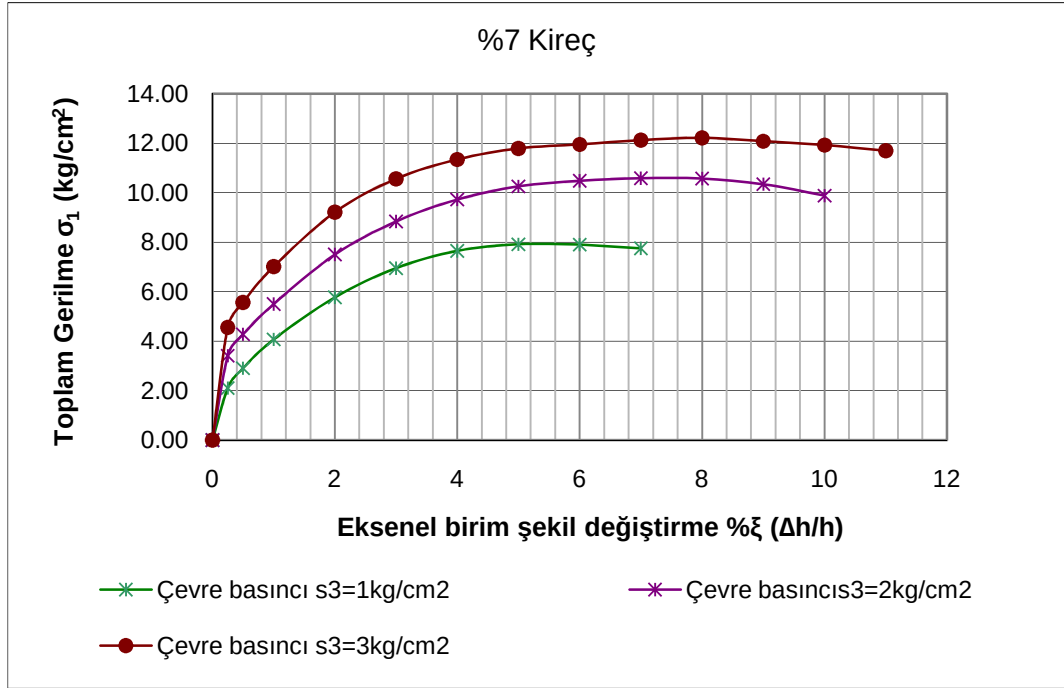
Şekil 6.20. %2 C+S katkılı numunenin üç eksenli basınç deneyi



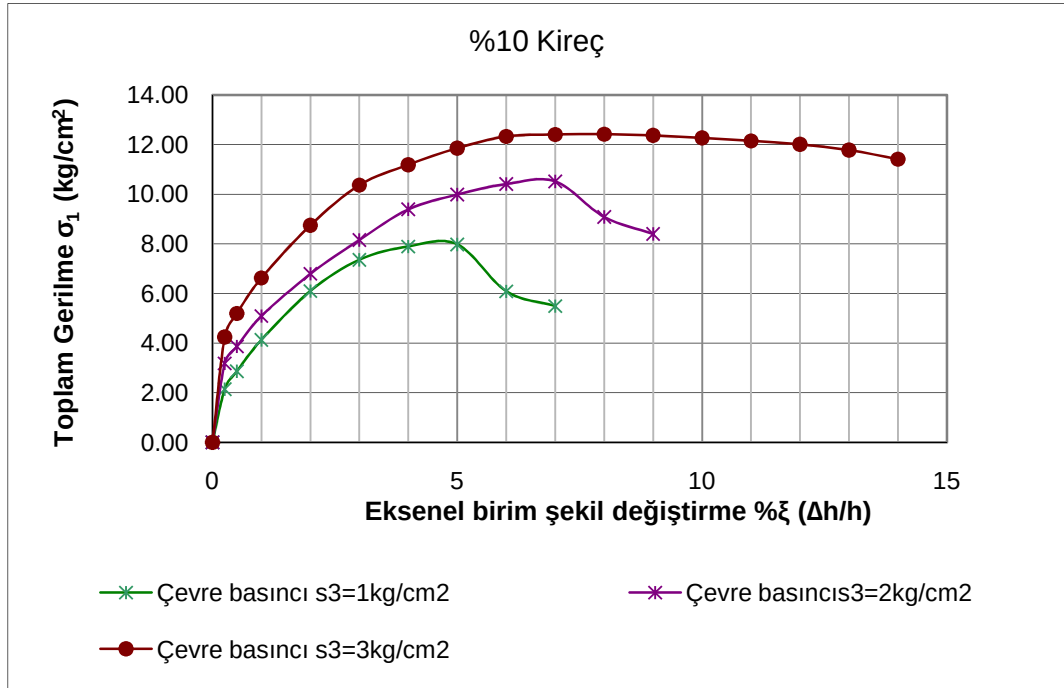
Şekil 6.21. %3 C+S katkılı numunenin üç eksenli basınç deneyi



Şekil 6.22. %5 Kireç katkılı numunenin üç eksenli basınç deneyi



Şekil 6.23. %7 Kireç katkılı numunenin üç eksenli basınç deneyi



Şekil 6.24. %10 Kireç katkılı numunenin üç eksenli basınç deneyi

Şişme Deneyleri

CBR şişmesi

4 inçlik CBR kalıbında, Standart Proktor yöntemi ile belirlenen optimum su içeriğinde hazırlanan numune yol kaplamasından gelecek sürşarj yükü karşılığı 2 adet 2,27 kg'lık ağırlık altında su tankında 15 gün bırakıldı ve şişme miktarları ilk yüksekliğe (116,4 mm) oranlanarak tayin edildi. Deney AASHTO-T193 /2007 CBR standart test metoduna göre yapıldı. Deney düzeneği Resim 6.5'te sunulmuştur.

Serbest şişme

Holtz and Gibbs (1956), tarafından geliştirilen bu test ile şişme potansiyeline sahip zeminlerin şişme miktarı tayin edilebilmektedir. Bunun için havada kurutulmuş zeminden 10 cm³ kadar alınıp 100 cm³'lük dereceli silindire gevşek olarak konulmakta ve üzerine su ilave edilmektedir. Deney kil örnek ile %5, %7, %10 Kireç ve %1, %2, %3 oranlarında C+S karıştırılmasıyla elde edilen numunelere yapılmıştır.



Resim 6.5. CBR şişme deneyi düzeneği

$$S\text{Ş} = \frac{\text{Nihai Hacim} - \text{Başlangıç Hacmi}}{\text{Başlangıç Hacmi}} \times 100 \quad (6.11)$$

Holtz ve Gibbs' e göre $S\text{Ş} < \%50$ ise şişme potansiyeli yok; $S\text{Ş} > \%100$ ise şişme potansiyeli yüksek olarak tanımlanmaktadır. Monmorillonit killerde $S\text{Ş} = \%1200-1600$ olduğu saptanmıştır [4].



Resim 6.6. Serbest şişme deneyi yapılışı

Odeometre cihazı ile şişme yüzdesi deneyi

Proktor kalıbına sıkıştırıldıktan sonra yükseklik/çap oranı 1/3,5 olan konsolidasyon kalıplarına alınan numuneler odeometre cihazına yerleştirildi. 7 kpa (1 psi) basınç numunenin üzerine uygulandı. Damıtık su eklendi. Son iki okuma arasında fark olmayana değin deney devam etti. Şişme miktarı ilk yüksekliğe oranlanarak şişme yüzdesi hesaplandı. ASTM-D 4546 A standart metoduna uygun olarak deneyler gerçekleştirildi [31].

Odeometre cihazı ile şişme basıncı deneyi

Proktor kalıbına sıkıştırılarak yükseklik/çap oranı 1/3,5 olan konsolidasyon kalıplarına alınan numuneler odeometre cihazına yerleştirildi. 7 kpa (1 psi)

basınç numunenin üzerine uygulandı. Damıtık su eklendi. Numune şişme gösterdiği anda bu şişmeyi engelleyecek miktarda yük cihaza konuldu. Şişme olmayıncaya kadar bu işleme devam edildi. Kaldıraç sistemiyle çalışan odeometre cihazının kol oranı 1/11 olduğu için konulan yük oran ile çarpılıp numune alanına bölünerek şişme basıncı belirlendi. ASTM D4546 C standart test metoduna uygun olarak deneyler yapılmıştır.



Resim 6.7. Odeometre cihazı

Artan katkı oranlarında düşen plastisite gibi şişme basıncının ve şişme yüzdesinin de düştüğü Çizelge 6.15 ve Çizelge 6.16'da görülmektedir.

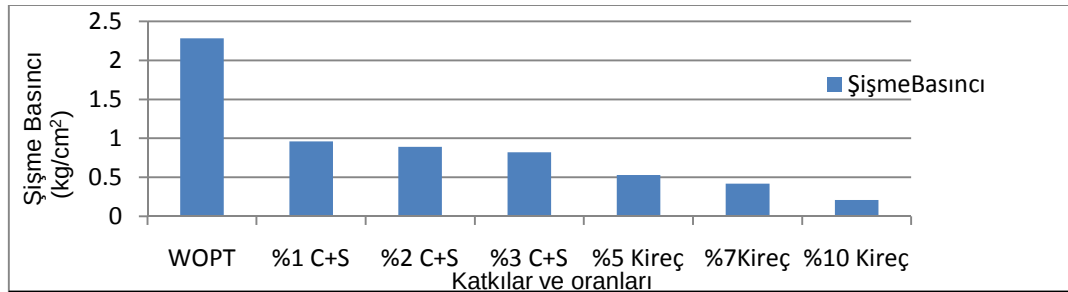
Çizelge 6.15. Şişme basıncı-şişme yüzdesi- PI deney sonuçları

Katkı Oranları	Şişme basıncı (kPa)	Şişme Yüzdesi (%)	PI (%)
Katkısız	228	13,6	41,1
%1 CS	96	4,5	27,2
%2 CS	82	1,7	23,8
%3 CS	89	0,5	21,8
% 5 Kireç	42	0,7	18,6
%7 Kireç	53	0,6	NP
%10 Kireç	21	0,4	NP

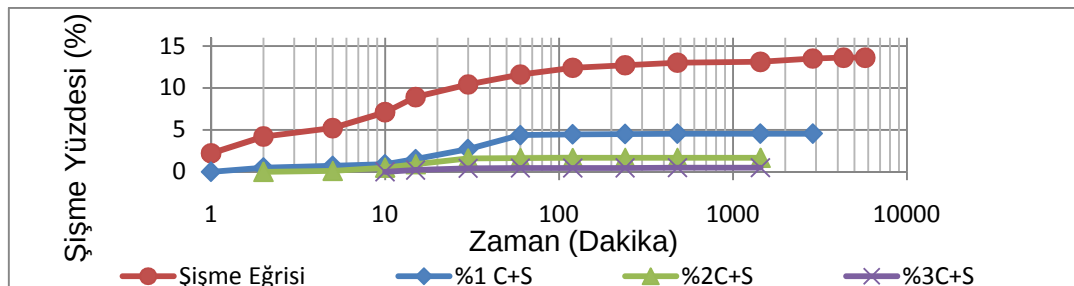
Çizelge 6.16. Farklı şişme yüzdesi deneyleri sonuçları

Katkı Oranları	CBR Şişmesi %	Holtz ve Gibbs Şişmesi %	Odeometre Şişmesi %
Katkısız	7,6	80	13,6
%1 CS	1,3	70	4,5
%2 CS	0,3	65	1,7
%3 CS	0,2	34	0,5
% 5 Kireç	0,7	75	0,7
%7 Kireç	0,2	60	0,6
%10 Kireç	0,1	45	0,4

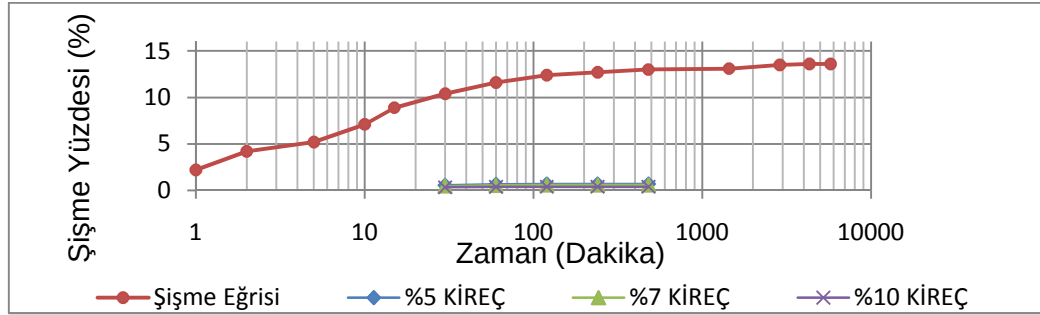
Odeometre cihazı ile yapılan şişme basıncı ve şişme yüzdesi deney sonuçlarına göre değerlendirme yapıldığında katkı oranı artmasıyla şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerleri azalmakta olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.25’de şişme basıncı deney sonuçları, Şekil 6.26 ve Şekil 6.27’de şişme yüzdesi deney sonuçları görülmektedir.



Şekil 6.25. Şişme basıncı deneyi sonuçları



Şekil 6.26. Şişme Yüzdesi deneyinde C+S katkısı etkisi



Şekil 6.27. Şişme yüzdesi deneyinde kireç katkısı etkisi

Konsolidasyon deneyleri

Odeometre cihazına poroz taşlarla birlikte yerleştirilen numunelere 50-100-200-400-800 kPa yükleme serisi sırayla ve 24 saatlik periyotları takiben uygulandı ve zamana bağlı konsolidasyonları kaydedildi. Yükleme sonrası şişme gözlenmesi durumunda bir sonraki yüklemeye geçildi. 0,1-0,2-0,3-0,5-1- 2- 3- 4- 6- 8- 10- 15- 20- 30- 40- 60- 80- 100- 150- 200- 300- 400- 500- 1440. dakikalarda konsolidasyon okumaları alındı. Katı danelerin eşdeğer yüksekliği (H_0) Eş. 6.12' den, boşluk oranı (e) değeri Eş. 6.13'ten hesaplandı. Birbirini takip eden basınç kademeleri değişimi ve boşluk oranı değişimlerinden hacimsel sıkışma katsayısı (m_v), Eş. 6.14'ten hesaplandı. Logaritma - zaman (t_{50}) ve karekök - zaman (t_{90}) grafikleri çizilerek konsolidasyon katsayıları (c_v) hesaplandı. Deney sonuçları katkısız ve her bir katkılı durum için Çizelge 6.17'den Çizelge 6.23'e kadar aşağıda sunulmuştur. Konsolidasyon deneyleri ASTM-D 2435 tek yönlü konsolidasyon deneyi standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

$$H_0 = \frac{Ws}{GsA} \quad (6.12)$$

$$e = \frac{H-H_0}{H_0} \quad (6.13)$$

$$M_v = \frac{\Delta e / \Delta \sigma}{1+e} \quad (6.14)$$

Çizelge 6.17. Katkısız numune konsolidasyon deney sonuçları

BASINÇ KADEMESİ	BOŞLUK ORANI	HACİMSEL SIKIŞMA KATSAYISI	OTURMA ZAMANI		KONSOLİDASYON KATSAYISI (10^{-3})	
σ (kPa)	e	m_v (cm ² /kg)	t_{50} (s)	t_{90} (s)	C_{v50} (cm ² /s)	C_{v90} (cm ² /s)
0	0,927	0,035		120		6,38
400	0,654	0,011	2520	120	0,21	4,70
800	0,579					
400	0,599					
200	0,628		e_o	s_r (%)	h_k (cm)	h_o (cm)
100	0,661		0,927	90,11	0,99	1,9
50	0,702					

Çizelge 6.18. %1 C+S katkılı numune konsolidasyon deneyi

BASINÇ KADEMESİ	BOŞLUK ORANI	HACİMSE L SIKIŞMA KATSAYIS I	OTURMA ZAMANI		KONSOLİDASYON KATSAYISI (10^{-3})	
σ (kPa)	e	m_v (cm ² /kg)	t_{50} (s)	t_{90} (s)	C_{v50} (cm ² /s)	C_{v90} (cm ² /s)
0	0,678	0,031		120		6,38
400	0,472	0,005		72		8,19
800	0,445					
400	0,452					
200	0,462		e_o	s_r (%)	h_k (cm)	h_o (cm)
100	0,472		0,678	99,16	1,09	1,9
50	0,481					

Çizelge 6.19. %2 C+S katkılı numune konsolidasyon deneyi

BASINÇ KADEMESİ	BOŞLUK ORANI	HACİMSEL SIKIŞMA KATSAYISI	OTURMA ZAMANI		KONSOLİDASYON KATSAYISI (10^{-3})	
σ (kPa)	e	m_v (cm ² /kg)	t_{50} (s)	t_{90} (s)	C_{v50} (cm ² /s)	C_{v90} (cm ² /s)
0	0,687	0,03		90		8,50
400	0,487	0,001		150		3,96
800	0,478					
400	0,482					
200	0,485		e_o	s_r (%)	h_k (cm)	h_o (cm)
100	0,487		0,687	91,36	1,09	1,9
50	0,489					

Çizelge 6.20. %3 C+S katkılı numune konsolidasyon deneyi

BASINÇ KADEMESİ	BOŞLUK ORANI	HACİMSEL SIKIŞMA KATSAYISI	OTURMA ZAMANI		KONSOLİDASYON KATSAYISI (10 ⁻³)	
σ(kPa)	e	m _v (cm ² /kg)	t ₅₀ (s)	t ₉₀ (s)	C _{v50} (cm ² /s)	C _{v90} (cm ² /s)
0	0,738	0,061		120		6,38
200	0,524	0,002		60		9,81
400	0,517	0,004		90		6,48
800	0,494					
400	0,497					
200	0,501		e ₀	s _r (%)	h _k (cm)	h ₀ (cm)
100	0,505		0,738	89,5	1,09	1,9
50	0,507					

Çizelge 6.21. %5 kireç katkılı numune konsolidasyon deneyi

BASINÇ KADEMESİ	BOŞLUK ORANI	HACİMSEL SIKIŞMA KATSAYISI	OTURMA ZAMANI		KONSOLİDASYON KATSAYISI (10 ⁻³)	
σ(kPa)	e	m _v (cm ² /kg)	t ₅₀ (s)	t ₉₀ (s)	C _{v50} (cm ² /s)	C _{v90} (cm ² /s)
0	0,827	0,117		120		6,38
100	0,614	0,005		60		9,95
200	0,605	0,006		120		4,17
400	0,585	0,004		90		6,39
800	0,557					
400	0,561					
200	0,565		e _o	s _r (%)	h _k (cm)	h _o (cm)
100	0,568		0,827	91,86	1,04	1,9
50	0,571					

Çizelge 6.22. %7 kireç katkılı numune konsolidasyon deneyi

BASINÇ KADEMESİ	BOŞLUK ORANI	HACİMSEL SIKIŞMA KATSAYISI	OTURMA ZAMANI		KONSOLİDASYON KATSAYISI (10 ⁻³)	
σ(kPa)	e	m _v (cm ² /kg)	t ₅₀ (s)	t ₉₀ (s)	C _{v50} (cm ² /s)	C _{v90} (cm ² /s)
0	0,746	0,115	1200	90	0,59	8,50
100	0,545	0,004		60		9,98
200	0,538	0,004		60		9,90
400	0,525	0,003		60		9,73
800	0,505					
400	0,509					
200	0,512		e _o	s _r (%)	h _k (cm)	h _o (cm)
100	0,514		0,746	76,09	1,09	1,9
50	0,516					

Çizelge 6.23. %10 kireç katkılı numune konsolidasyon deneyi

BASINÇ KADEMESİ	BOŞLUK ORANI	HACİMSEL SIKIŞMA KATSAYISI	OTURMA ZAMANI		KONSOLİDASYON KATSAYISI (10^{-3})	
σ (kPa)	e	m_v (cm ² /kg)	t_{50} (s)	t_{90} (s)	C_{v50} (cm ² /s)	C_{v90} (cm ² /s)
0	0,743	0,123	2880	90	0,25	8,50
100	0,528	0,009		60		9,80
200	0,513	0,008		90		6,41
400	0,489	0,005		102		5,47
800	0,460					
400	0,464					
200	0,467		e_0	s_r (%)	h_k (cm)	h_o (cm)
100	0,470		0,743	93,95	1,09	1,9
50	0,473					

Konsolidasyon deney sonuçları incelendiğinde C+S katkısı ile boşluk oranlarındaki düşüşün kireç katkısına göre daha fazla olduğu ve her iki katkıda da artan oranlara göre boşluk oranının azalarak değiştiği görülmüştür.

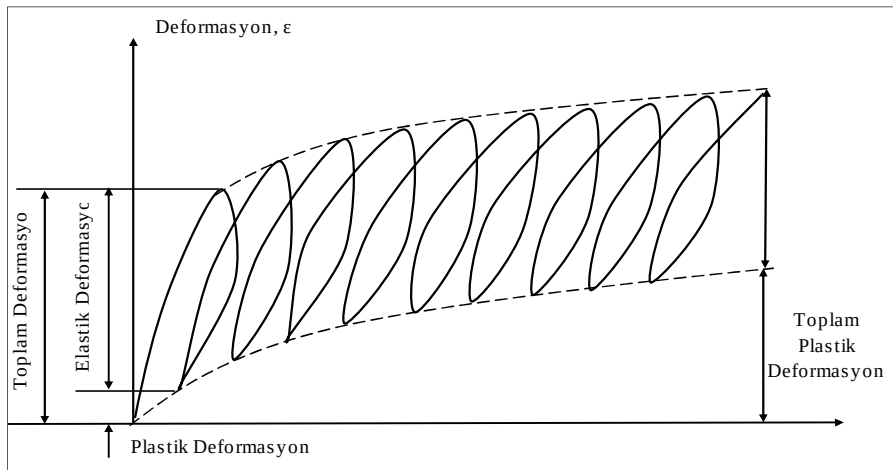
Kireç katkısı ile zeminin konsolidasyon özellikleri değişmiştir. Katkısız halde 0-400 kPa basınç aralığına kadar şişme davranışı sergileyen zemin kireç katıldığında 0-100 kPa basınç aralığında konsolidasyon davranışı ortaya koymuştur. Ancak C+S katkısı ile bu durum değişiklik göstermemiştir.

Esneklik modülü deneyi

CBR deneyinin, üstyapı tabakalarının maruz kaldığı gerilmeleri yeterli şekilde modelleyemeyen statik bir test olması ve gerçek arazi koşullarının laboratuvar koşullarında sağlanamıyor olmasından dolayı üstyapı mühendisliğinde yolda kullanılan malzemelerin gerçek arazi koşullarındaki ve trafik yükleri altındaki davranışlarını gerçekçi şekilde modelleyen yeni dinamik deney metotlarının arayışı içine girmişlerdir. Bunun sonucu olarak da Esneklik Modülü Deneyi ortaya çıkmıştır. Şu anda Esneklik Modülü Deneyi dünyada en çok kullanılan ve güvenilir şekilde malzemelerin trafik yükleri

altındaki davranışlarını yansıtan dinamik deneydir. Bu deneyde, dinamik tekerlek yükleri tekrarlı haversine eksenel yükü kullanılarak modellenmiştir. Deney numunesine bulunduğu tabaka içerisinde, diğer malzemeler tarafından uygulanan yanal basınç ise numuneye yanal olarak uygulanan hava basıncıyla modellenmiştir [32].

Malzemenin tekrarlı yükler altındaki gerçek esneklik davranışı, belirli sayıda tekrarlı yük uygulaması gerçekleştirildikten sonra belirlenebilir. Yükleme durumunun başlarında, numunede dikkate değer miktarda kalıcı deformasyon meydana gelir. Uygulanan yükleme sayısı arttıkça, yük tekrarlarından dolayı oluşan plastik deformasyonlar azalır [32]. Bundan dolayı her hangi bir yükleme serisine ait Esneklik Modülü değeri, her 100 yüklemenin son 5 tanesi göz önüne alınarak belirlenir. Esneklik Modülü, uygulanan deviatör gerilmenin, düşey elastik (geri dönüşümlü) deformasyona oranı olarak tarif edilir. Şekil 6.36 tekrarlı yükler altında oluşan elastik ve plastik deformasyonları göstermektedir. Şekil 6.36'da kalıcı deformasyonların değişiminin, tekrarlanan yük sayısı arttıkça sıfıra yaklaştığı görülmektedir.



Şekil 6.28. Tekrarlı yükler altında oluşan elastik ve plastik deformasyonlar

Granüler ve ince daneli zeminler, değişen dane yapıları yüzünden esneklik modülü deneyinde farklı davranışlar sergilerler. Esneklik Modülü deneyinde

ince daneli zeminler, artan yükler altında yumuşama gösterirler. Ayrıca; deviator gerilmede ve su muhtevsındaki değişimlere karşı çok hassastırlar. Genellikle yanıl basıncın ince daneli zeminlerin Esneklik Modülü değeriine etkisi önemsizdir [32].

Bentonitik kil malzeme (Tip-2) optimum su muhtevasına getirildikten sonra 14-16 saat arası ağzı bağılı plastik torbalarda dinlendirildi Dinlendirilen malzeme AASHTO T 307 standardına göre 5 tabaka halinde sıkıştırıldı.



Resim 6.8. Esneklik modülü deney düzeneğı



Resim 6.9. Esneklik modülü numunesinin hazırlanması [32]

Membran geçirilen numunenin üst kısmına poroz disk ve onun üzerine de yüklemenin gerçekleştirilmesi sağlayacak üst plaka yerleştirildi. Numunelere uygulanan 15 farklı yükleme serisinden ilki şartlandırma evresidir. Şartlandırma evresinde, numunede deney esnasında oluşacak kalıcı deformasyonu almak, numune başlıklarıyla numune arasında teması sağlamak ve numunenin sıkıştırılması esnasında meydana gelebilecek olan sıkıntıları ortadan kaldırmak için 1000 adet yükleme gerçekleştirilir. Esneklik Modülü değerinin belirlenmesi için kullanılan diğer 15 yükleme serisinin her biri için yükün tekrar sayısı 100 adettir. Şartlandırma evresinde uygulanan 1000 adet yükleme ve diğer 15 yükleme serisinde uygulanan yüzer adet yük tekrarının her biri, düşey yükün 0,1 sn numuneye uygulanması ve 0,9 sn boyunca numunenin düşey yükten mahrum bırakılması ile gerçekleştirilir. Deney esnasında uygulanan yüklemeler haversine yük formunda, sinüzoidal olarak gerçekleştirilir.

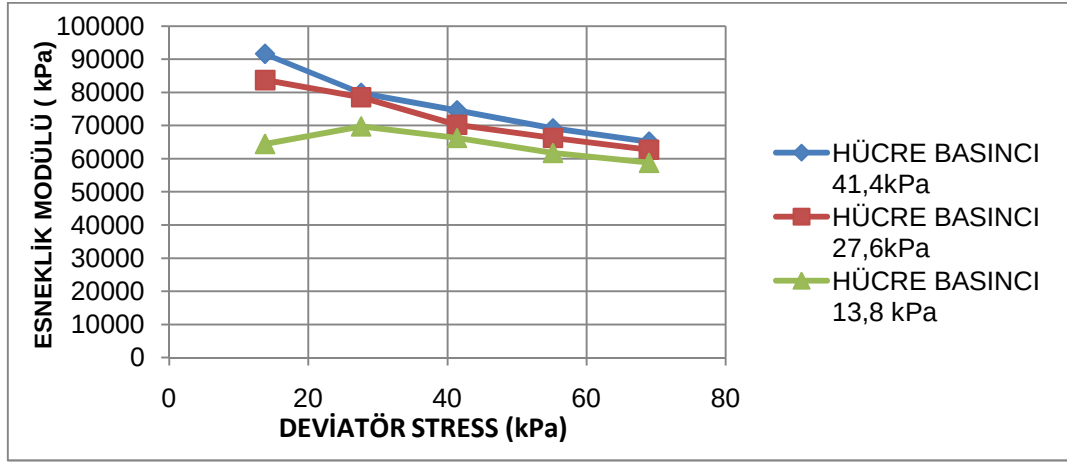
$$\text{Haversine Yüğü} = (1 - \cos\Theta)/2 \quad (\Theta = \text{Zaman}) \quad (6.15)$$

Çizelge 6.24. Tip-2 Numunelere Ait Yükleme Tablosu

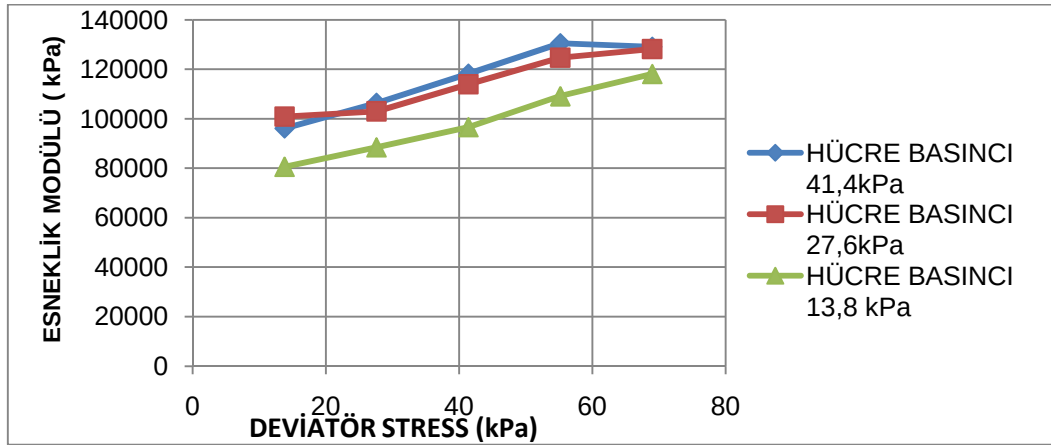
Yükleme Seri Numarası	Yanal Basınç, S_3		Max. Eksenel Gerilme, S_{maks}		Periyodik Gerilme, $S_{periyodik}$		Sabit Gerilme, $0.1S_{maks}$		Serilerdeki Yükleme Sayısı
	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	
0	41,4	6	27,6	4	24,8	3,6	2,8	0,4	500-1000
1	41,4	6	13,8	2	12,4	1,8	1,4	0,2	100
2	41,4	6	27,6	4	24,8	3,6	2,8	0,4	100
3	41,4	6	41,4	6	37,3	5,4	4,1	0,6	100
4	41,4	6	55,2	8	49,7	7,2	5,5	0,8	100
5	41,4	6	68,9	10	62,0	9,0	6,9	1,0	100
6	27,6	4	13,8	2	12,4	1,8	1,4	0,2	100
7	27,6	4	27,6	4	24,8	3,6	2,8	0,4	100
8	27,6	4	41,4	6	37,3	5,4	4,1	0,6	100
9	27,6	4	55,2	8	49,7	7,2	5,5	0,8	100
10	27,6	4	68,9	10	62,0	9,0	6,9	1,0	100
11	13,8	2	13,8	2	12,4	1,8	1,4	0,2	100
12	13,8	2	27,6	4	24,8	3,6	2,8	0,4	100
13	13,8	2	41,4	6	37,3	5,4	4,1	0,6	100
14	13,8	2	55,2	8	49,7	7,2	5,5	0,8	100
15	13,8	2	68,9	10	62,0	9,0	6,9	1,0	100

Yapılan çalışmalarda, kireç stabilizasyonunun özellikle ince daneli zeminlerde esneklik modülü değerini, yüksek deviatör stres ve yüksek su içeriklerinde önemli ölçüde artırdığı ve deviatör stres değişimine daha az hassas olduğu tespit edilmiştir [33].

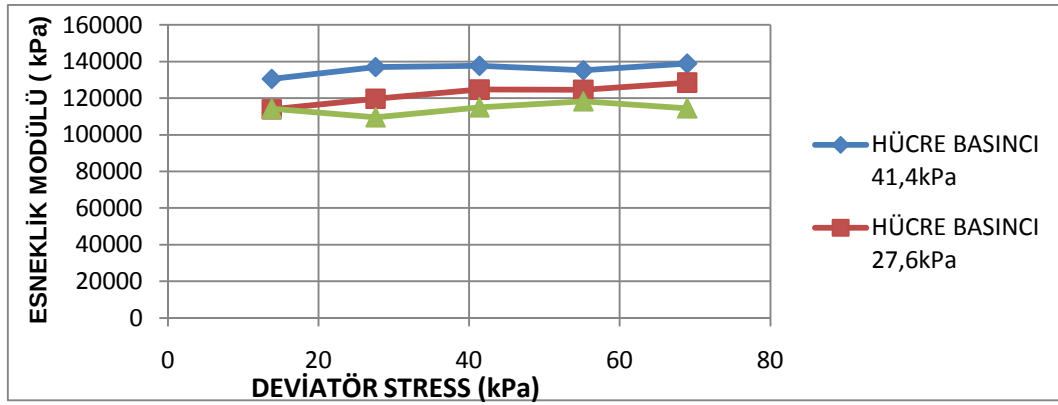
Bu çalışma kapsamında projenin niteliği gereği esneklik modülü deneyleri yapılarak üstyapı performansları açısından katkılar değerlendirilmeye çalışılmıştır.



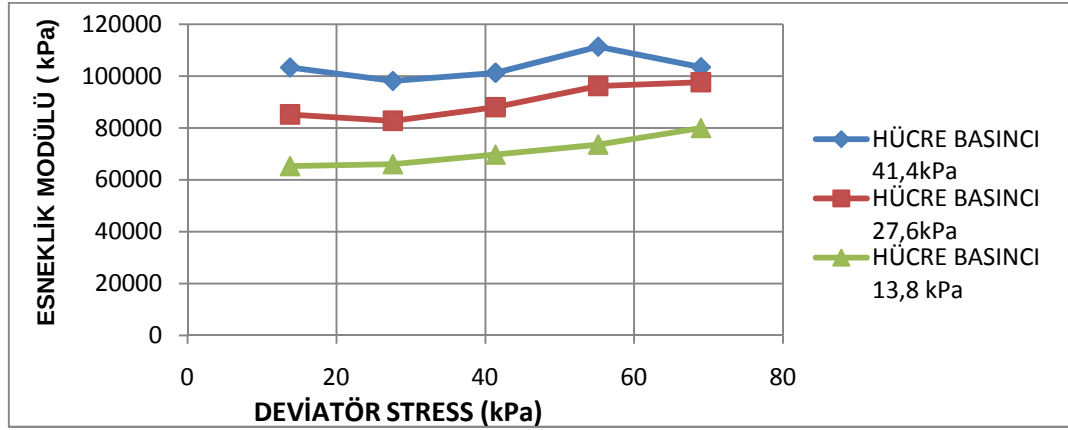
Şekil 6.29. Katkısız numune esneklik modülü deney sonuçları



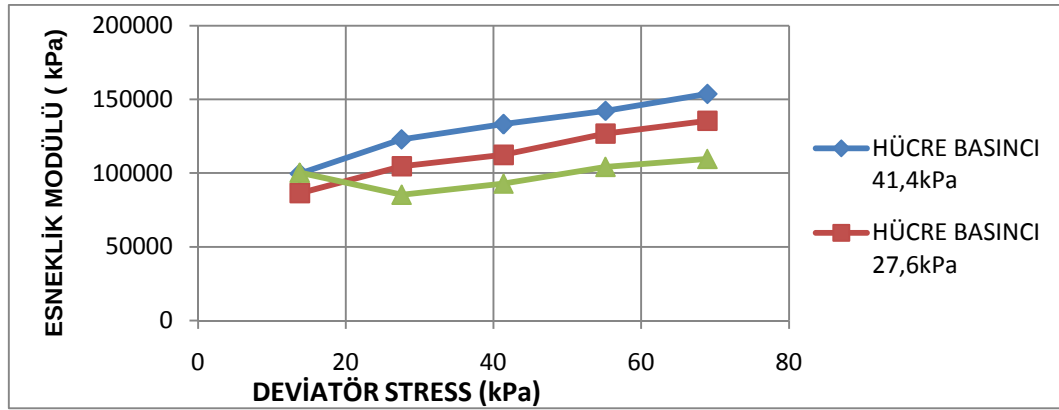
Şekil 6.30. %1 C+S katkılı numune esneklik modülü deney sonuçları



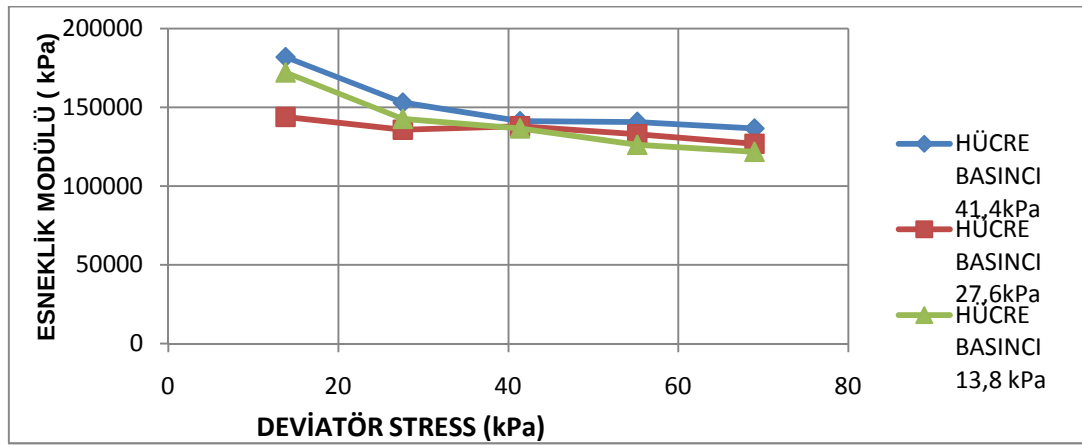
Şekil 6.31. %2 C+S katkılı numune esneklik modülü deney sonuçları



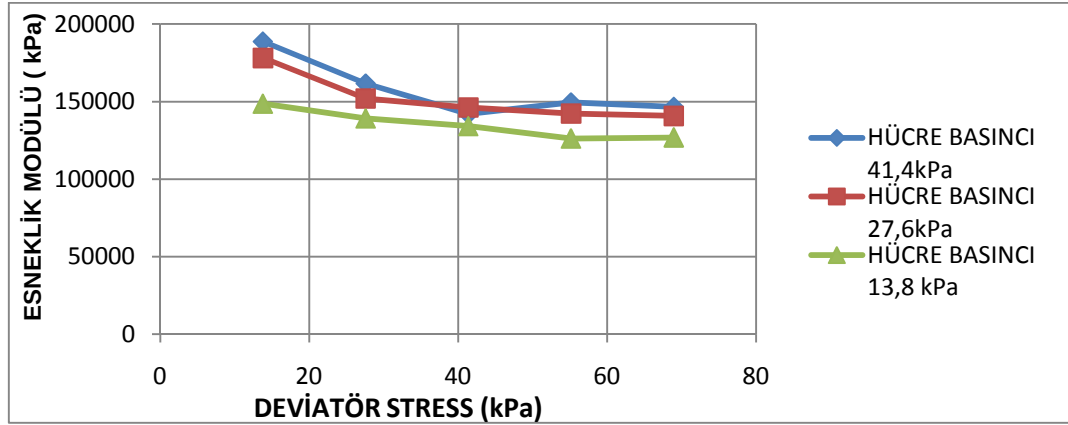
Şekil 6.32. %3 C+S katkılı numune esneklik modülü deney sonuçları



Şekil 6.33. %5 kireç katkılı numune esneklik modülü deney sonuçları



Şekil 6.34. %7 kireç katkılı numune esneklik modülü deney sonuçları



Şekil 6.35. %10 kireç katkılı numune esneklik modülü deney sonuçları

Deney sonuçlarına göre üretilen denklem Eş. 6.16'da verilmiştir.

$$MR = K_1 \sigma_d^{K_2} \sigma_3^{K_3} \quad (6.16)$$

Çizelge 6.25. MR deney sonuçları

	K_1	K_2	K_3	r
KATKISIZ	85954	-0,191	0,152	0,93318
%1C+S	24637	0,263	0,161	0,97361
%2 C+S	59913	0,0632	0,15	0,92151
%3 C+S	20954	0,0781	0,352	0,96718
%5 KİREÇ	22382	0,24	0,229	0,90496
%7 KİREÇ	293940	-0,245	0,0587	0,85082
%10 KİREÇ	167530	-0,155	0,135	0,96286

Yapılan esneklik modülü deney sonuçlarının çizilen grafikleri artan katkı oranlarına göre Şekil 6.29-Şekil 6.35'te görülmektedir. Çizelge 6.25'te elde edilen deney sonuçlarından üretilen ampirik formüllerin katsayıları sunulmuş olup tüm yüklemelere ait deney sonuçları EK-13'te verilmiştir.

Katkısız halde, azalan hücre basıncıyla ve tekrarlı yüklemeler altında düşüş gösteren esneklik modülü değerleri %1 C+S katkısı için yaklaşık olarak %20

oranında artmış ve tekrarlı yükler altında daha da yüksek esneklik modülü deneylerine ulaşılmıştır.

Artan kireç katkısının esneklik modülü üzerindeki etkisi C+S sisteminden daha yüksek olmakla birlikte tekrarlı yükleme sayısı artışıyla bu değer düşüş göstermiştir.

7. ÜST YAPI TABAKA KALINLIKLARININ TESPİTİ VE MALİYET KARŞILAŞTIRMASI

(Ordu-Ulubey) Ayrım-Topçam Yolu 1. Sınıf Devlet yolu statüsünde 2 şeritli 2 yönlü (2x1) olarak projelendirilmiştir. Bu bölümde yeni yapılacak karayolunun esnek üstyapı tabaka kalınlıkları belirlenirken, seçme malzeme getirilmesi, %1-2-3 C+S katkısı ile stabilize edilmesi ve %5-7-10 kireç katkısı ile stabilize edilmesi durumlarına göre belirlenerek her durum için maliyetler hesaplanmış ve karşılaştırılması yapılmıştır.

7.1. Üstyapı Tabakası Kalınlıklarının Belirlenmesi

Yol gövdesi altyapı ve üstyapı olmak üzere iki bölümdür. Altyapı yarma ve dolgulardan oluşur. Üstyapı ise trafik yüklerini taban zeminine dağıtan tabakalı bir yapıdır.

Bir üstyapı yapılmadan önce üstyapıya istenen bir destek sağlayacak şekilde altyapı, oluşturulmalıdır. Üstyapının performansı taban zemininin mühendislik özellikleri ile doğrudan ilintilidir.

Yol üstyapısı, trafik yüklerinin ve doğal şartların etkisi altındadır. Trafik yükleri, taşıtların hareketleri sırasında radyal çekme ve basınç gerilmeleri ile düşey basınç gerilmeleri oluşturur. Gerilmelerin şiddeti ve mertebesi, dingil yüklerinin tekerrürü ile doğrudan orantılıdır [34].

Bu bölümde AASHTO-93 yöntemine göre tabaka kalınlıkları tespit edilmeye çalışılmıştır. Servis kabiliyeti-davranış ilişkisine dayanan bu metot; zemin taşıma gücüne, trafik yüküne, bölge ve iklim koşullarına ve üstyapı tabakalarının özelliklerine bağlı olarak üstyapı tabaka kalınlıklarının tespit edilmesini sağlar. Servis kabiliyeti, üstyapının belirli bir gözlem anında yeterli bir taşıma ve sürüş kalitesi sağlama kabiliyetidir. Üstyapının servis kabiliyeti

ile dingil yükleri tekerrür sayıları ve üstyapıyı temsil eden üstyapı sayısı (SN) arasında kurulan bir bağıntı üstyapının boyutlandırılmasını mümkün kılar.

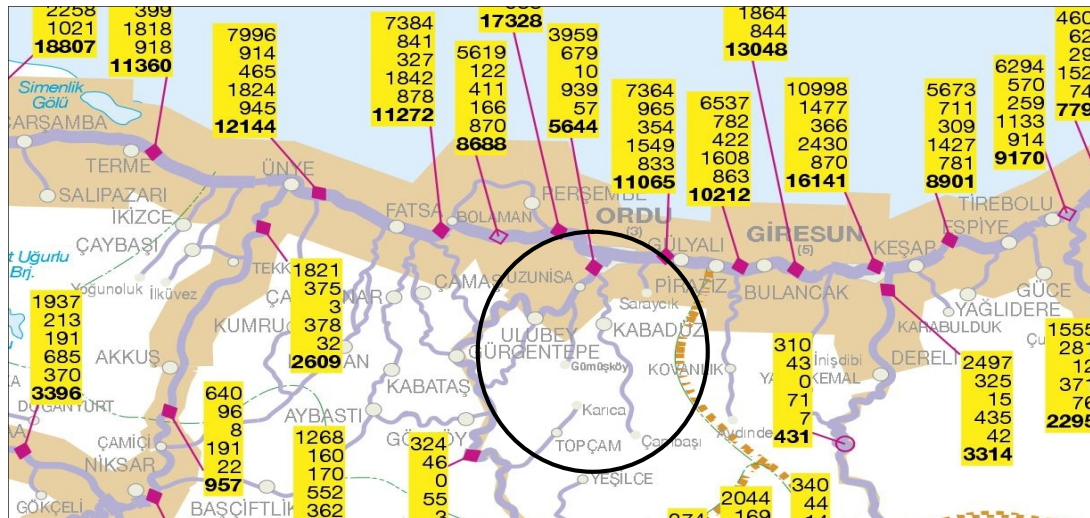
Üstyapının servis kabiliyetinde azalmaya neden olan trafik yüklerinin etkisi ve bunların tekerrürü, 8,2 ton standart dingil yükü cinsinden belirtilmiştir. Bu nedenle karayolu üzerinde seyreden çeşitli ağırlıktaki trafik yükleri her dingil grubu için belirlenen dingil eşdeğerlik faktörleri yardımı ile 8,2 ton standart dingil yükü sayısına çevrilir.

AASHTO-1993 metodunda zemin taşıma gücü, zeminin esneklik modülü (M_R) ile belirlenmektedir. Esneklik modülü laboratuvar deneyleri ile belirlenebildiği gibi, malzemelerin diğer fiziksel özellikleri ile korelasyon yapılarak elde edilen ampirik bağıntılar yardımı ile de tahmin edilebilmektedir.

İklim ve çevre koşulları üstyapı kalınlıklarında dikkate alınan başka bir husustur. İklim ve çevre verilerinin etkisi zemin şişmesi ve donma kabarmasından kaynaklanan servis kabiliyeti kaybı hesap edilerek belirlenir [34].

Karayolu üzerinde seyreden taşıtlar otomobil, orta yüklü ticari taşıt, otobüs, kamyon ve treyler olmak üzere 5 trafik grubuna ayrılır. Bu taşıtların projelendirme süresi boyunca hesap şeridinden geçecek toplam eşdeğer standart dingil sayısı hesaplanır. Harita 7.1'de proje güzergahına en uygun ve ilan edilmiş araç sayımı olan 2008 yılı yıllık ortalama günlük trafik değerleri (YOGT) verilmektedir. Bu değerler Çizelge 7.1'de gösterilmektedir.

Merkezleri, taşıtı enlemesine kesen ve birbirinden en fazla 100 cm. uzakta bulunan iki paralel düşey düzlem arasında kalan bütün tekerleklerin ilettiği toplam yük tek dingil yüküdür [34].



Harita 7.1. 2008 yılı trafik hacim haritası [35].

Çizelge 7.1. Yıllık ortalama günlük trafik hacimleri

Taşıt	YOGT (Yıllık Ortalama Günlük Trafik sayısı)
Otomobil	3959
Orta Yüklü Ticari Taşıt	679
Otobüs	10
Kamyon	939
Treyler	57
Toplam	5644

Üstyapının belirlenen proje süresi boyunca trafik ve çevre koşulları altında istenilen şartları karşılama olasılığı olarak tanımlanan Güvenilirlik seçimi Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Buna göre (Ordu-Ulubey) Ayrımı-Topçam Devlet yolu için alınacak güvenlik faktörü %85 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 7.2. Yol sınıfına göre güvenilirlik ve standart sapma değerleri [34]

Yolun Sınıfı	Şartname Güvenilirlik Değeri, R %	Standart Normal Sapma, Z_R
Otoyollar	95	-1.645
Devlet Yolu	85	-1.037
İl Yolu	70	-0.524

Otomobil, orta yüklü ticari taşıt, otobüs, kamyon veya treyler cinsinden bir taşıtın her bir geçişinin üstyapıya verdiği zarara eşit bir etki yaratan standart dingil yükü tekerrür sayısı, taşıt eşdeğerlik faktörü olarak tespit edilir. Taşıt eşdeğerlik faktörleri Çizelge 7.3'te verilmektedir.

Çizelge 7.3. Taşıt eşdeğerlik faktörleri [34]

Taşıt Grubu	Taşıt Eşdeğerlik Faktörleri
Treyler	4.10
Kamyon	2.90
Otobüs	3.20
Orta Yüklü Ticari Taşıt	0.60
Otomobil	0.0006

Üstyapının proje süresi sonunda ulaşması gereken hizmet kabiliyeti, son servis kabiliyeti (P_t) ile tanımlanır. Bu değer yolun önemine göre belirlenmekte olup Çizelge 7.4'te yol sınıfına göre alınması gereken değer tablosu sunulmuştur.

Çizelge 7.4. Servis kabiliyetinin seçimi (P_t) [34]

Yol Sınıfı	P_t
Otoyollar, Devlet Yolları	2.5
İl Yolları	2.0

Üstyapı Sayısı Trafiği (SN), taban zemini koşulları, drenaj özellikleri ve son servis kabiliyetinin analizinden elde edilen ve üstyapının her bir tabakasında kullanılmakta olan malzeme tipine uygun tabaka katsayılarının kullanılması suretiyle, esnek üstyapı tabakalarının kalınlığına dönüştürülen sayı olarak hesaplanır [34].

Bu çalışma için bu değerler hazırlanmış yazılım aracılığıyla hesaplanmış olup program çıktısı EK-14'te verilmiştir. Programa göre hesaplanan $SN=10,78$ ve Toplam standart dingil sayısı 19 912 391 olarak belirlenmiştir.

Şartname gereği CBR değeri $< \%8$ olan malzemeler üstyapı tabanında kullanılmamalıdır. Böyle durumlarda üstyapı tabanı, seçme malzeme-koruyucu tabakalar kullanılarak teşkil edilmelidir.

Seçme malzeme kullanılması, zayıf üstyapı tabanının yol performansına olan olumsuz etkisini azaltacağı gibi, alttemel tabakasının serilmesine ve sıkıştırılmasına uygun bir platform sağlamak, rutubetten dolayı üstyapı tabanında oluşması muhtemel mukavemet kaybını önlemek ve üstyapının nihai mukavemetini artırmak gibi katkılar sağlamaktadır.

Çizelge 7.5'te CBR değerine göre koruyucu tabaka kalınlıklarını gösteren çizelge değerlendirilirse 50 cm'lik bir tabakanın önerildiği anlaşılmaktadır.

Tipik yol üstyapı enkesiti tünelli ve tünelsiz olarak EK-16'da yer almaktadır.

Çizelge 7.5. Zayıf Zeminler Üzerine Çekilecek Koruyucu Tabaka Kalınlıkları [34].

Toplam Standart Dingil Tekerrür Sayısı (T_{82})	Taban CBR % değeri						
	1	2	3	4	5	6	7-8*
< 40 Milyon	75	50	40	35	25	20	20
40-80 Milyon	80	55	40	35	25	20	20
> 80 Milyon	85	60	45	40	30	25	20

(*) Taban CBR değeri %7-%8 arasında ise koruyucu tabakanın CBR değeri $\geq$ %15 olmalıdır

SN toplam standart dingil sayısı ve M_R sonuçları dikkate alınarak EK-15'te verilen tablodan 15-20 milyon trafik kategorisinde belirlenen üstyapı kalınlıkları Çizelge 7.6'da sunulmuştur.

Çizelge 7.6. Üstyapı kalınlıkları

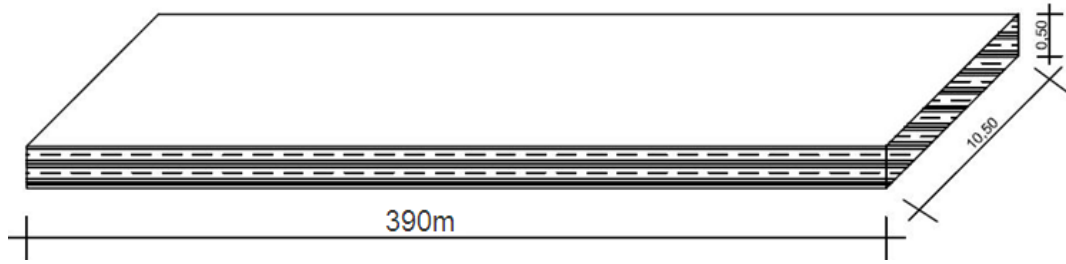
Katkı durumu	M_R (psi)	Aşınma (cm)	Binder (cm)	Bitümlü Temel (cm)	PMT (cm)	Alttemel (Kırmataş) (cm) + Seçme Malzeme
Katkısız	9438	5	7	8	15	15+50
%1 C+S	18720	5	7	8	25	Gerekmez
%2 C+S	20135	5	7	8	20	Gerekmez
%3 C+S	14993	5	7	8	25	Gerekmez
%5 Kireç	22270	5	7	8	20	Gerekmez
%7 Kireç	19803	5	7	8	20	Gerekmez
%10 Kireç	21240	5	7	8	20	Gerekmez

Üstyapı tabakası kalınlıklarının hesaplaması sonucunda, hem 15 cm alttemel, hem de 50 cm seçme malzeme ile teşkil edilecek yol platformunda, her iki katkı malzemesi ile yapılacak iyileştirmede bu tabakalara gereksinimi ortadan kalkmaktadır.

Üstyapı projelendirme rehberi yaklaşımına göre, C+S sisteminde buna ek olarak 5 cm plentmix tabakası eklenmesi, iki katkı malzemesinin mühendislik özellikleri açısından tek farkıdır.

7.2. Stabilizasyonda Kullanılan Kireç ve C+S Katkılarının Maliyet Karşılaştırması

Km:6+015-6+405 arası kil güzergah için uzunluk 390 m, platform genişliği 10,5 m ve gerekli olan 50 cm stabilize edilecek tabaka kalınlığı düşünülerek hesaplamalar yapılmıştır. Katkılar kuru ağırlığın %' si olarak hesaplandığı için öncelikle toplam malzemenin kuru ağırlığı belirlenmiştir (Çizelge 7.7). Zeminin birim hacim ağırlığı 1,8 t/m³ olarak alınmıştır.



Şekil 7.1. Yol kesiti

Çizelge 7.7. Stabilize edilecek hacim ve miktar

Zeminin						
Genişliği (m)	Uzunluğu (m)	Derinliği (m)	Hacmi (m ³)	Ağırlığı (ton)	Su içeriği (ton)	Kuru Miktar (ton)
(a)	(b)	(c)	(d=a×b×c)	(f=1,8×d)	(g=0,3×f)	(h=f-g)
10,50	390,00	0,50	2047,5	3685,5	1105,65	2579,85

F: Kazıdan başka inşaat malzemesi taşınması (10 000 m'den fazla) ton cinsinden ölçülen malzemelerin beher ton'u için ihaleli birim fiyatı (TL), K: Taşıma katsayısı=145 (2009 yılı birim fiyatlarına göre), A: Güçlük katsayısı=

1 ve M: Ortalama taşıma mesafesi (km cinsinden) olmak üzere Eş. 7.1 ile nakliye bedeli belirlenmiştir [36].

$$F=1,25 \times K \times (0,0007 \times M + 0,01) \times A \quad (7.1)$$

Yöreye en yakın fabrika olan Bartın (Barkisan) kireç fabrikasından projede kullanılan yüksek kalkerli kireç temin edilmiştir. Kireç birim fiyatı Çizelge 7.8' de belirtildiği şekilde hesaplanmıştır.

Çizelge 7.8. Kireç birim fiyatı

1 ton Kireç Maliyeti (2009 B.F. ile)	TL
Zati bedeli: Poz no: 04.759/3 Sönmüş toz kireci (torbalı) [37].	94,25
Nakli: Bartın-Ordu M=632Km $F=1,25 \times 145 \times (0,0007 \times M + 0,01) \times A$	82,00
Toplam	176,25

Kirecin maliyeti tüm katkı oranları için tespit edilmiştir. Kireç stabilizasyonu maliyeti Çizelge 7.9'da verilmiştir.

Çizelge 7.9. Kireç maliyeti

Kuru Miktar (ton)	Kireç %	Kireç Miktarı (ton)	Kireç B.F. (ton/TL)	Kireç Maliyeti (TL)
(a)	(b)	(c=axb/100)	(d)	(f=cxd)
2.579,85	5	128,99	176,25	22734,49
2.579,85	7	180,59	176,25	31828,99
2.579,85	10	257,98	176,25	45468,97

C+S katkısının Ankara distribütörü tarafından temin edileceği düşünülerek Ankara-Ordu arası mesafesi esas alınmıştır. C+S birim fiyatı Çizelge 7.10'da verildiği şekilde hesaplanmıştır. C+S katkısının maliyeti Çizelge 7.11'de belirtilmektedir.

Çizelge 7.10. C+S birim fiyatı

1 ton Consolid444+1lt Solidry maliyeti (2009 B.F. ile)	TL
Zati bedeli Consolid444 [37]	2500,00
Nakli Ankara-Ordu M=571Km $F=1,25 \times 145 \times (0,0007 \times M + 0,01) \times A$	74,26
Toplam	2574,26
Zati bedeli Solidry	17,50
Nakli Ankara-Ordu M=571Km $F=1,25 \times 145 \times (0,0007 \times M + 0,01) \times A$	0,07
Toplam	17,57
Genel Toplam	2591,83

Çizelge 7.11. C+S maliyeti

Kuru Miktar (ton)	C+S %	C+S Miktarı (ton)	C+S Birim Fiyat. (ton/TL)	C+S Maliyeti (TL)
(a)	(b)	(c=a×b/100)	(d)	(f=c×d)
2579,85	1	25,80	2591,83	66869,21
2579,85	2	51,60	2591,83	133738,43
2579,85	3	77,39	2591,83	200581,72

İki sistemin maliyet karşılaştırması yapıldığında, uygulama yöntemleri açısından oldukça benzer bir süreçten geçtikleri görülmektedir. İki stabilizasyon katkı malzemesinin uygulama açısından işçilik ve ekipman maliyetleri hemen hemen aynı olmasına rağmen, stabilizatör malzemelerin

maliyetleri açısından değerlendirildiğinde, kireç katkısıyla stabilizasyonun daha ucuz bir yöntem olduğu ortaya çıkmaktadır.

8. SONUÇLAR

(Ordu-Ulubey) Ayrımı-Topçam Yolu projesi 2009 yılında tamamlanmış olan yeni bir yol güzergâhıdır. Yapılan bu çalışmada yol güzergâhının Km:6+015-6+405'i arasında karşılaşılan bentonitik kilin stabilizasyonu amacıyla yüksek kalsiyumlu sönmüş kireç ve C+S kimyasal katkıları kullanılarak şartname kriterlerine uyumu araştırılmıştır. Bu malzemenin üstyapı tabanı olarak durumu değerlendirilmiş ve şu sonuçlara ulaşılmıştır.

1) Bentonitik kil malzemeye yapılan sınıflandırma deneyleri sonucunda No. 200 elekten geçen malzeme miktarının %80,8 LL değerinin %73,4 ve plastisite indisinin %41,1 olduğu ve birleştirilmiş zemin sınıfının CH olduğu belirlenmiştir. 2 µm'den küçük dane miktarı %38,1 hesaplanan, şişme potansiyeli yüksek ve kil aktivitesi normal olan malzemenin kimyasal analizi ve X-Ray difraksiyon analizi yapılarak %38,1 oranında Na-Ca smektit grubu bir zemin olduğu tespit edilmiştir.

2) Katkısız duruma göre C+S katkısının ilave edilmesi sonucunda kilin artan katkılarla azalma eğiliminde olan LL değerlerine karşın artma eğiliminde olan PL değerlerinin sonucu olarak, PI değerleri %41,1'den %21,8 değerlerine düşmüştür. Bununla birlikte artan katkı oranlarında katkısız duruma göre kireç ilavesi de benzer şekilde, LL değerini azaltıp PL değerini artırmak suretiyle PI değerini azaltan bir eğilim sergilemiş ve %7 ve %10 katkılarda NP davranmıştır. Her iki katkı da işlenebilirliği artırmış ve malzemenin kalıcı deformasyonlarını azaltmıştır.

3) Düşük katkı oranlarında, katkısız durumuna oranla artış gösteren özgül ağırlık değerleri, C+S katkısının artan oranları ile katkısız seviyesinin altına düşmüştür. Artan kireç oranlarında ise özgül ağırlık azalmış ancak katkısız değerinin üzerinde kalmıştır.

Kireç katılmış numunelerin özgül ağırlık değerleri örneğin %7 katkı için katkısız şekline göre %2 mertebesinde artarken %2 C+S katılan numunelerin özgül ağırlık değerleri %3,5'luk azalma göstermiştir.

4) Büzülme davranışını modellemek için yapılan lineer büzülme deneyi sonuçları değerlendirildiğinde kireç katkısının büzülme davranışını tamamen sönümlediği buna karşın C+S katkısı için ise bu sönümleme seviyesinin %3 katkı oranında %65 mertebesinde olduğu gözlenmiştir.

5) Yapılan standart proktor deneylerinde, proktor eğrilerinin düşük su muhtevalarından optimum su muhtevasına ulaşana kadarki bölgede düzleşme karakteristiği gösterdiği tespit edilmiştir. Bu tip proktor eğrilerinin tipik kohezyonsuz zemin sıkışma eğrilerine benzerlik gösterdiği görülmüştür. Bunun silt içeriğinin %40 olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Her iki katkı çeşidinin de optimum su içeriği değerinde %1'lik bir azalmaya sebep olduğu anlaşılmaktadır.

6) Katkısız durumda $14,8 \text{ kN/m}^3$ olan kuru birim hacim ağırlık değeri, %5 kireç katkısı ile $14,52 \text{ kN/m}^3$ 'e yükselmiş ve artan kireç katkısı oranı ile artmaya devam etmiştir. %1 C+S katkısı ile bu değer $14,44 \text{ kN/m}^3$ 'e yükselmiş olmakla birlikte, artan katkı oranıyla azalarak yol üstyapı tabanı standart kriteri dışında kalmıştır.

7) Katkısız halde CBR dayanımı %2 olan zeminin %1 C+S ile %14'e yükselen değeri, %3 C+S ile %38'e ulaşmıştır. Ancak kireç için bu durum %5 kireç katkısıyla %20 değerine yükselmiş, sonrasında artan kireç oranları ile bir artış bir azalış şeklinde düzensiz bir dağılım sergilemiştir.

8) Her iki farklı katkının kil üzerinde şişme ve büzülme davranışını değiştirdiği gözlenmiştir. Standart proktor enerjisinde sıkıştırılmış numunelere yapılan CBR deneyleri sonucunda, %10 kireç katılan numunenin katkısız

durumda %7,6 olan şişme değerini %99 sönümlendiği, benzer şekilde C+S katkısının da bu değeri %97 oranında sönümlendiği belirlenmiştir.

9) Kürsüz serbest basınç dayanımları değerlendirildiğinde %1-2-3 C+S katkısının dayanım değerini katkısız numuneye nazaran aynı sırayla %56-71-68 oranlarında artırmıştır. Benzer şekilde %5-7-10 kireç katıldığında serbest basınç dayanımını aynı sırada %26-35-41 oranında artırdığı belirlenmiştir.

10) 7 gün kür sonunda C+S katkısı serbest basınç dayanım değerlerini, katkısız dayanımlarına göre, %7-15-11 mertebesinde artırmaya devam ederken, kireç katkısında %7-%10 katkı oranlarında serbest basınç dayanımı değerlerinde kayda değer bir değişme gözlenmemiştir. %5 kireç katkı oranında ise %24'lük bir artış görülmüştür.

11) 28 gün kür sonunda %1 C+S katkısı için serbest basınç dayanımı değeri 7 gün kürlü numuneye göre %32 oranında azalmış, %2 C+S için kayda değer bir değişim olmamış ve %3 C+S için ise %14 oranında artmaya devam etmiştir. %5-7-10 kireç katkısı için serbest basınç dayanımı 7 gün kürlü numuneye göre %30-41-11 oranlarında artmıştır.

12) 28 gün kür ardından katkısız duruma göre değerlendirildiğinde %1 C+S katkısının dayanım değerini %23 azalttığı %2-3 C+S için ise sırasıyla %16-30 artırdığı, %5-7-10 kireç katıldığında, serbest basınç dayanımını aynı sırada %62-40-12 oranında artırdığı görülmüştür. C+S katkısı artan katkı oranlarında artma eğilimindeyken, kireç artan oranlarla azalma eğilimindedir.

13) 7 gün kür ardından 5 kez tekrarlı donma ve çözülme deneyine (± 20 °C) tabi tutulan numunelerde, C+S katkısı artan oranlarında 7 gün kürlü numuneye göre %36-46-29'luk azalış gözlenirken, kireç katkısı için artan oranlara göre %21-47-68'lik azalış gözlenmiştir. Donma çözünme çevrimi ile malzemeler dayanım kaybına uğramaktadır.

14) Tüm katkı oranlarında malzemeler üzerinde üç eksenli basınç testi yapılmıştır. 100-200-300 kPa çevre basınçlarında gerçekleştirilen deneyler incelendiğinde, her iki katkı için oldukça benzer davranış gösterdikleri görülmüştür. Kohezyon değeri artan katkı ile azalırken, içsel sürtünme açısı değerleri artmıştır. Katkı malzemeleri ortamın doygunluğunu azaltarak bu sonucu sağlamaktadır.

15) Tez kapsamında yapılan üç farklı şişme tayini deneyi (Odeometre, CBR, Holtz ve Gibbs) sonuçlarına bakılınca, odeometre şişmesinin CBR şişmesinden katkısız duruma göre %79 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Holtz ve Gibbs şişmesi, diğer ikisine kıyasla oldukça yüksek bir değer vermektedir.

16) Artan katkı oranları şişme basıncı değerini, katkısız halde 228 kPa'dan %3 C+S için 89 kPa'ya, %10 kireç için 21 kPa'ya düşürmüştür.

17) Katkısız olarak ve tüm katkı oranında malzemelere esneklik modülü deneyleri yapılmıştır. Katkısız haldeyken azalan hücre basıncıyla ve tekrarlı yüklemeler altında azalma eğilimi gösteren esneklik modülü değerleri, %1 C+S için yaklaşık olarak %20 oranında artmış ve tekrarlı yükler altında artma eğilimi sergilemiştir. Artan kireç katkısının esneklik modülü üzerindeki etkisi, C+S sisteminden daha yüksek olmakla birlikte, tekrarlı yükleme sayısı artışıyla bu değer düşüş göstermiştir.

18) Üstyapı tabakası kalınlıklarının hesabı sonucunda, 15 cm alttemel ve 50 cm seçme malzeme ile teşkil edilecek yol platformunda, Kireç ve C+S katkı malzemeleri, bu tabakalara gereksinimi ortadan kaldırmıştır. Ancak C+S sisteminde, buna ek olarak 5 cm plentmix temel tabakası eklenmesi, üstyapı projelendirmesi açısından iki katkının farkını oluşturmuştur.

19) Karayolları Teknik Şartnamesi açısından değerlendirildiğinde %7 oranında yüksek kalsiyumlu kireç ilavesi ile üstyapı tabanı stabilizasyon

şartlarının sağlandığı gör÷lmektedir. %2 C+S katkısı da bu şartları LL ve PI kriteri dışında sağlamaktadır.

20) İki sistemin maliyet karşılaştırması yapıldığında, uygulama yöntemleri açısından oldukęa benzer bir süreç kullanılan iki stabilizasyon katkı malzemesi için de, işçilik ve ekipman maliyetleri aynı tutulmasına rağmen, kireç katkısının daha ucuz bir yöntem olduğu ortaya çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

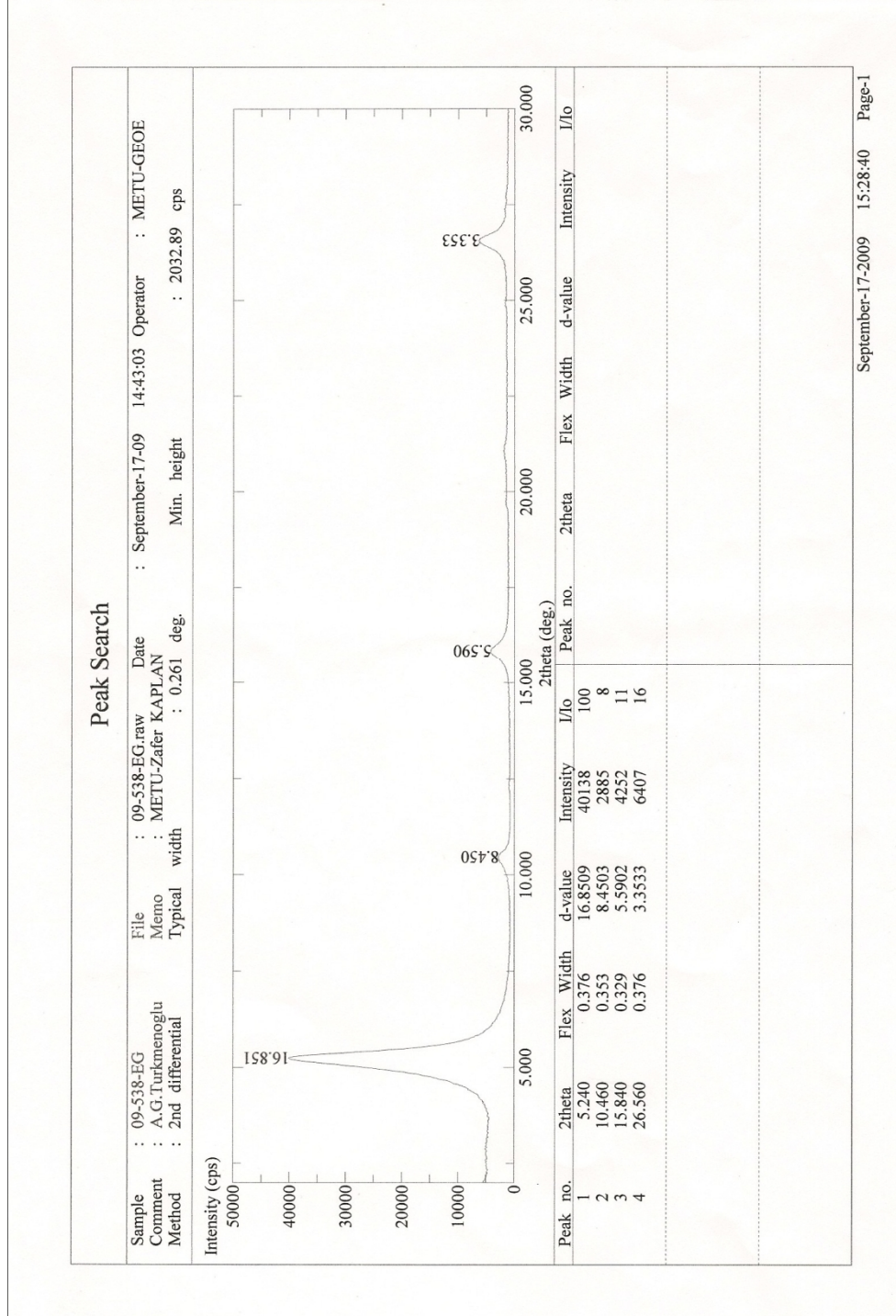
1. Önalp, A., "Geoteknik Bilgisi I Zeminler ve Mekaniği", **Sakarya Üniversitesi, Yayın No:27**, 36-71,99-102 (1997).
2. Holtz, R. D., Kovacs, W. D., "Geoteknik Mühendisliğine Giriş", **Gazi Kitabevi**. 36,68-87,100,164-169 (2002).
3. FHWA, Technical Report,"Evaluation of Soil and Rock Properties", 231,233-236 (2002).
4. Güngör, A. G., "Bursa Yöresi Şişebilen Kil Zeminlerin Yol Dolgularında Kullanılması Amacıyla Uçucu Kül İle Islahı", İnşaat Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 9-11,19 (2002).
5. Chen F.H., "Foundations on Expensive Soils", **Elsevier Scientific Publishing Company**,18-28 (1983).
6. Al-Rawas,A.A.,Goosen,M.F.A., "Expansive Soils", **Balkema** 15-34 (2006).
7. Das, B.M, "Advance Soil Mechanics", **McGraw-Hill** , 15-25 (1983).
8. Dumlupınar,İ., "Bentonit Oluşumlarının Jeolojik Minerolojik ve Jeokimyasal Özellikleri", Maden Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi **Afyon Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 10,11 (2008).
9. Sarıkaya,Y., Önal, M.,Alemdaroğlu, T.,Noyan, H., "Bir Bentonitin Katyon Değiştirme Kapasitesi ile Şişmesi Arasındaki İlişki", **10.Ulusal Kil Sempozyumu** Konya, 27-31 (2001).
10. Fang, H.Y., "Foundation Engineering Handbook", **Chapman and Hall**, 317-378 (1984).
11. Tan, Ö., Karabüyük, E. "Kum Bentonit Karışımlarında Bazı Geoteknik Özelliklerin Araştırılması", **Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi**, İstanbul, 219-226 (2004).
12. Yeşilbağ, G., Çokça, E., "Stabilization of Expansive Soils Using Agregate Waste, Rock Powder and Lime", **Proceedings of International Conference on Problematic Soils**, N. Cyprus, 806-816 (2005).
13. Agus, S.S., Schanz, T., "Swelling Pressure and Total Suctionof Compacted Bentonite Sand Mixtures", **Proceedings of International Conference on Problematic Soils**, N. Cyprus, 61-69 (2005).

14. Das, B. M., "Principles of Foundation Engineering", **PWS Engineering**, USA 534-536, (1984).
15. Nas, E., "Şiran Kilinin Kayma Direnci Parametrelerinin Çimento ve Kireç Katkısı ile Değişimi", **Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi**, Trabzon, 551-559 (2006).
16. İkizler, S.B., Aytekin, M., Vekli, M., Yavuz, H.İ., Tandoğan, M., "Bentonitin çimento, uçucu kül ve kum ile stabilizasyonu", **Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onikinci Ulusal Kongresi**, Konya, 689-698 (2008).
17. Çokça, E., İpek, T., "Kireç, Çimento, C ve F Sınıfı Uçucu Kül Katkısının Şişen Bir Zeminin Şişme Basıncına Etkisi", **Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Yedinci Ulusal Kongresi**, İstanbul, 450-459 (1998).
18. Bell, F.G., "Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils", **Engineering Geology**, 223-237 (1996).
19. Kavak, A., Keskin, E., Yılmaz, C., Mutman, U., "Lime Stabilization and its Effects on Road Cross Section", **Proceedings of International Conference on Problematic Soils**, N. Cyprus, 865-874 (2005).
20. Çokça, E., Toktaş, F., "Dispersif Bir Kilin C Tipi Uçucu Kül ile Stabilizasyonu", **Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi**, Eskişehir, 659-668 (2002).
21. Şenol, A., Edil, T.B., "Uçucu Kül ile Stabilize Edilen Yumuşak Zeminlerin CBR Sonuçlarının Değerlendirilmesi", **Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi**, İstanbul, 275-280 (2004).
22. Dallas, N.L., "Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime", **Kendall/Hunt**, USA 7-19, 29-43, 50-53, 75-87, (1995).
23. British Lime Association, "Lime In Soil Stabilization Presentation Manual", **NLA, FHA, AASHTO**, London, 60-79 (1990).
24. "Karayolu Teknik Şartnamesi", **KGM**, Ankara, 35, 59-61, 82-92 (2006).
25. Transportation Research Board, "Lime Stabilization", **TRB State of Art Report 5**, Washington, 3-14, 25-32 (1987).
26. KGM, "Kesin Proje Jeoloji-Jeoteknik Etüt Raporu, (Ordu-Ulubey) Ayr.-Topçam (1. Kısım) Yolu", **Ataç Müh.** Ankara, (2009).
27. Sherr, G. A., "Consolid Sistem Zemin Stabilizasyonu Teknik Katalogu", **Consolid A.G.**, 1-30 (2006).

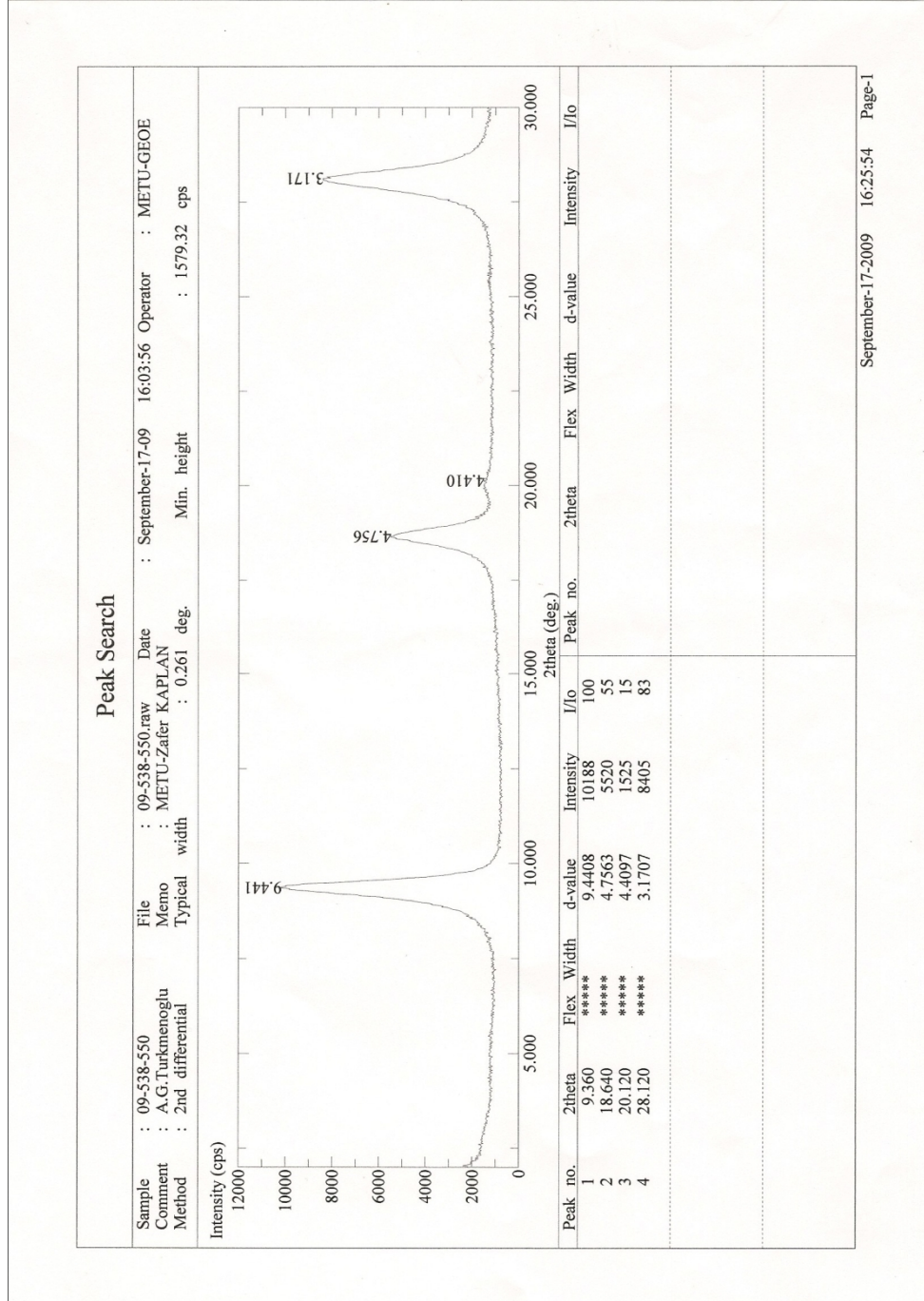
28. Mallela, J. ,Quintus,H.V. ,Smith, K.L., “Consideration of Lime –Stabilized Layers in Mechanistic-Empirical Pavement Design”, **NLA**, Virginia, 5-9 (2004).
29. Geiman, C.M., “Stabilization of Soft Clay Subgrades in Virginia Phase I Laboratory Study” Master of Science in Civil Engineering, **Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University**, Virginia, 10-16 (2005).
30. British Lime Association, “Lime In Soil Stabilization Presentation Manual”, **NLA, FHA, AASHTO**, London, 27 (1990).
31. Özaydın, V.,“ Zemin Mekaniği Laboratuvar Deney Yöntemleri” **DSİ** Ankara 105-120 (2007).
32. Güngör, A.G., Özay, O.,“Esneklik Modülü Deneyi”, **KGM**, Ankara, 1-9 (2008).
33. Refeai, T.O.Al.,“Resilient Behaviour of Fine-Grained Soil Treated With Lime”, **Proceedings of the fourteenth International Conference on SoilMechanicsand foundation engineering**, Hamburg 1561-1564 (1997).
34. Güngör, A.G., Sağlık, A. “Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi”, **TADB Üstyapı Şubesi Müdürlüğü**, Ankara, 3-16,19,34 (2008).
35. İnternet:Karayolları Genel Müdürlüğü “2008 Yılı Trafik Hacim Haritası” <http://www.kgm.gov.tr/images/trafikharita2008.jpg> (2009).
36. TC Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, “**2009 Yılı Yol, Köprü, Bitümlü Kaplamalar, Bakım ve Trafik İşlerine Ait Birim Fiyat Listesi**” Ankara 11 (2009).
37. TC Bayındırlık Bakanlığı “**İnşaat ve Tesisat Analiz Birim Fiyatları**”, www.bayindirlik.gov.tr/birimfiyat/ (2009).

EKLER

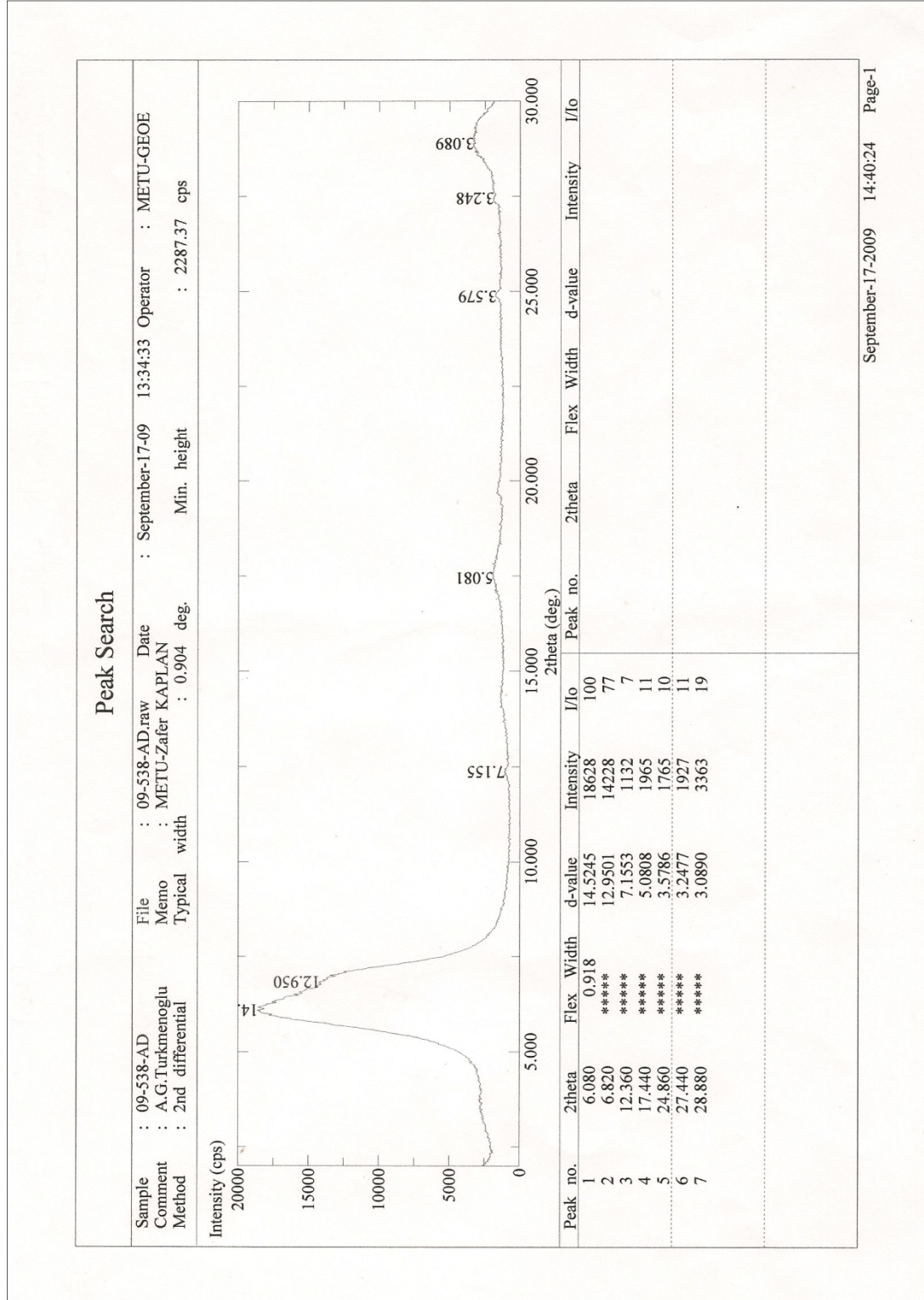
EK-1 X-ray sonuçları



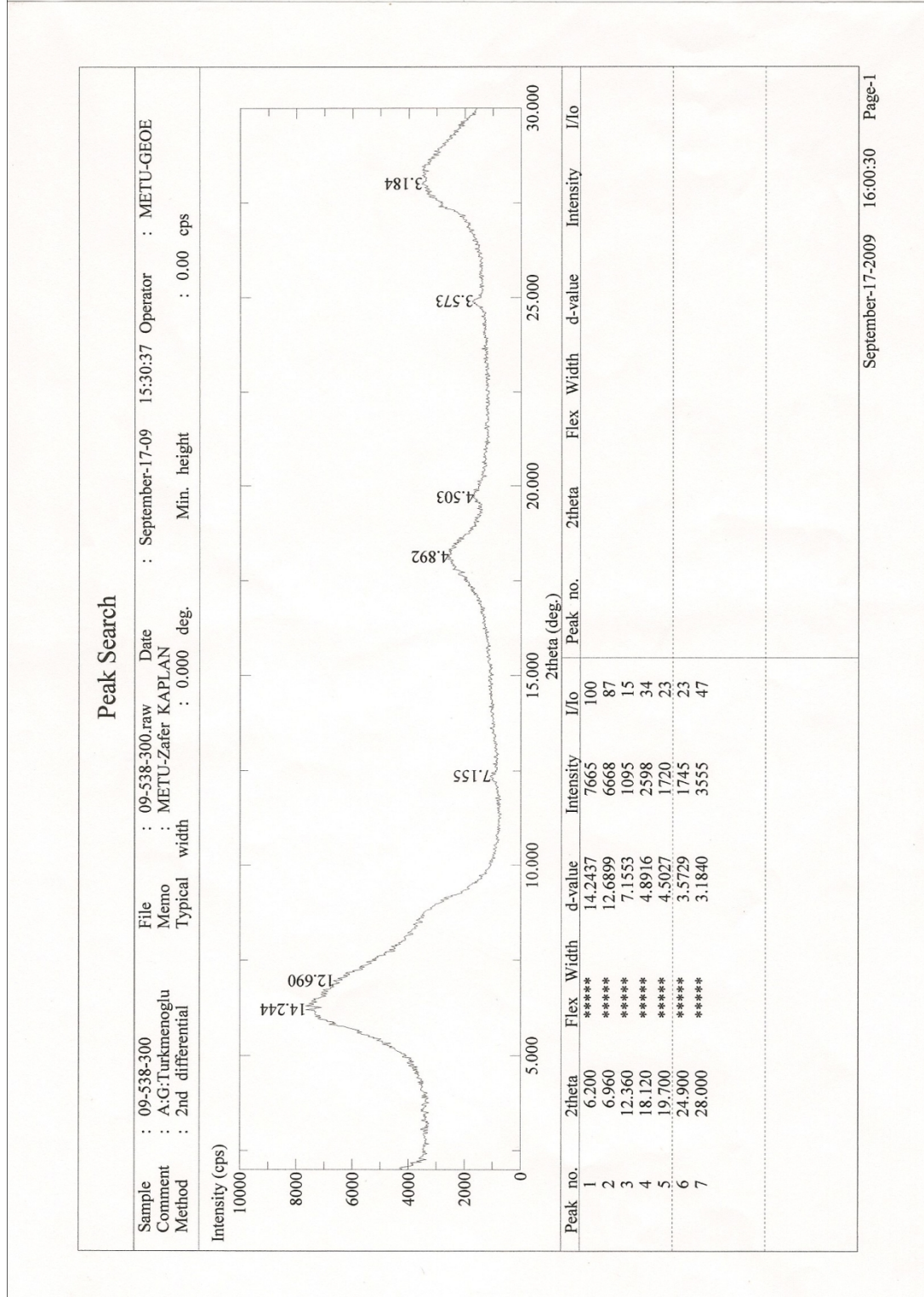
EK-1 (Devam) X-ray sonuçları



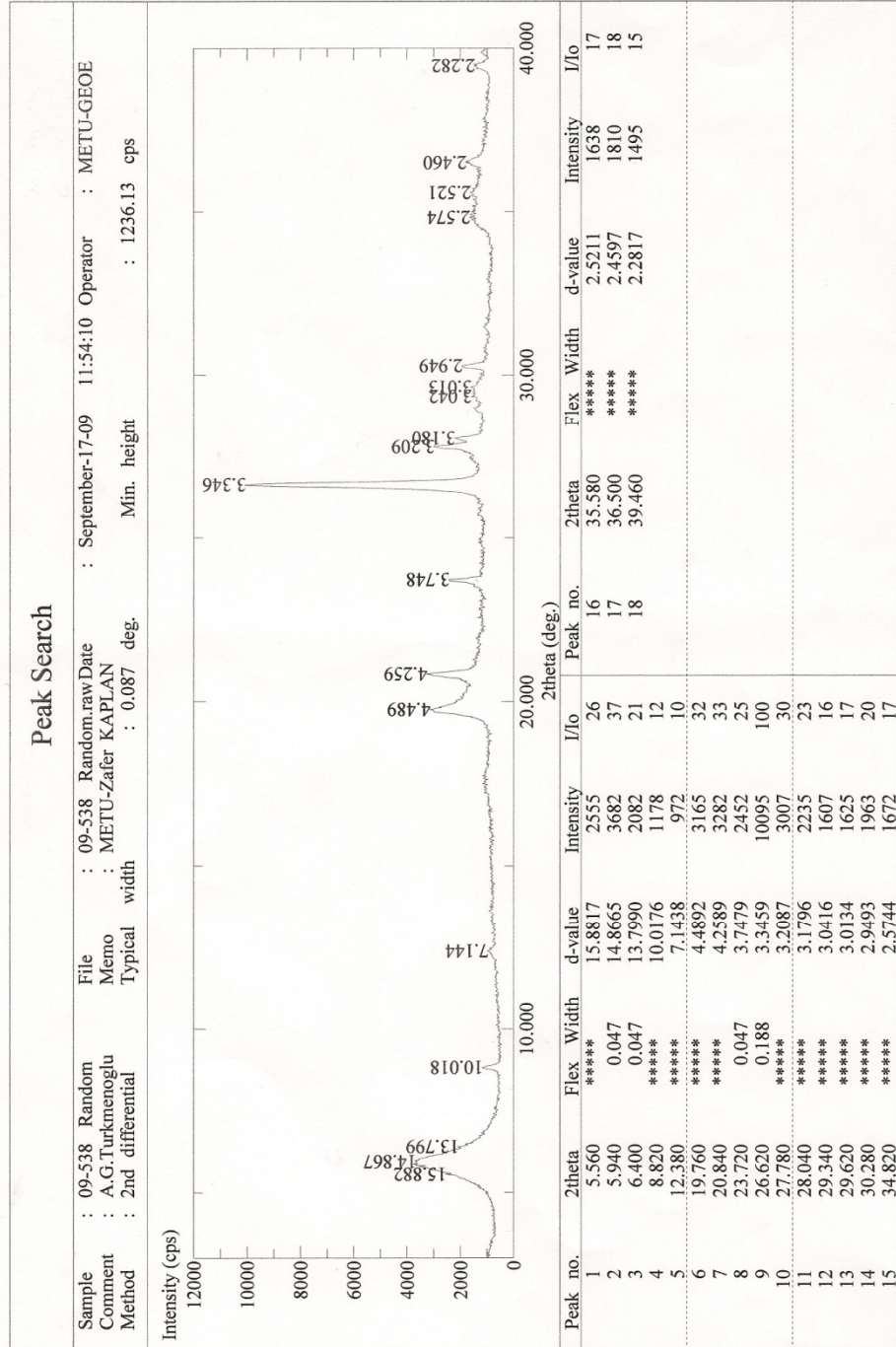
EK-1 (Devam) X-ray sonuçları



EK-1 (Devam) X-ray sonuçları



EK-1 (Devam) X-ray sonuçları



EK-2 Sondaj Logu 1/3

SONDAJ LOGU / BORING LOG						BÖLGE/District No 07									
						SONDAJ/Borehole No T-1-SK2									
						SAYFA/Page No 1/3									
						SONDÖR/Driller Metin Soydan									
PROJE ADI/Project Name : Ordu-Ülubeç Ar. Topçam				DELİK ÇAPI/Hole Diameter : 60 mm											
SONDAJ YERİ/Boring Location : T-1 Tüneli				YERALTI SUYU/Groundwater : 34.00 m											
KİLOMETRE/Chainage : 6+310				MUH.BOR.DER./Casing Depth : 9.00 m											
SONDAJ DER./Boring Depth : 60.00 m				BAŞ.-BIT.TARİHİ/Start-Finish Date : 03 / 11 / 2007.. 14 / 11 / 2007											
SONDAJ KÖTÜ/Elevation : 183.68 m				KOORDİNAT/Coordinate(Northing) : 400 170.246											
SON. MAK.ŞYÖNT./D. Rig & Met. : Crealious Dizel				KOORDİNAT/Coordinate(Easting) : 452 5107.807											
DAYANIMLILIK/Strength		AYRIŞMA/Weathering		İNCE DANELİ/Fine Grained		İRİ DANELİ/Coarse Grained									
I. ÇOK DAYANIMLI Strong		I. FAZE Fresh		N : 0-2 ÇOK YUMUŞAK Very Soft		N : 0-4 ÇOK GEYSEK Very Loose									
II. DAYANIMLI M Strong		II. AZ AYRIŞMIŞ Slightly W.		N : 3-4 YUMUŞAK Soft		N : 5-10 GEYSEK Loose									
III. ORTA D. AYR. M Weak		III. ORTA D. AYR. Mod. Weather		N : 5-8 ORTA KATI Moderately Stiff		N : 11-30 ORTA SIK Moderately Dense									
IV. ZAYIF Weak		IV. ÇOK AYR. Highly W.		N : 9-15 KATI Stiff		N : 31-50 SIK Dense									
V. ÇOK ZAYIF V Weak		V. TÜMÜLE AYR. Comp. W.		N : 16-30 ÇOK KATI Very Stiff		N : 51-100 ÇOK SIK Very Dense									
KAYA KALİTESİ TANIIMI/ROQ		KIRIKLAR-30 cm/Fractures		ÖRANLAR/Proportions											
% 0-25 ÇOK ZAYIF Very Poor		1. SEYREK Sparse		% 5 PEK AZ Slightly		% 5 PEK AZ Slightly									
% 25-50 ZAYIF Poor		2. ORTA Moderate (M)		% 5-15 AZ Little		% 5-20 AZ Little									
% 50-75 ORTA Fair		3. SIK Dense (D)		% 15-30 ÇOK Very		% 20-30 ÇOK Very									
% 75-90 İYİ Good		4. ORTA SIK Moderate (D)		% 35 VE And											
% 90-100 ÇOK İYİ Excellent		5. PARÇALI Crushed (C)													
SPT STANDARD PENETRASYON DENEYİ Standard Penetration Test				P PRESİYOMETRİK DENEYİ Pressuremeter Test											
D ORİJİNEL NÜMUNE Undisturbed Sample				VS VİSKÖZİTE DENEYİ Viscosity Test											
K KARIOT NÜMUNE Core Sample															
Borings Depth (m) SONDAJ DERİNLİĞİ	NÜMUNE NO Sample No	STANDARD PENETRASYON DENEYİ Standard Penetration Test				JEOTEKNİK TANIMLAMA Geotechnical Description	KOT / Level	PROFİL Profile	DAYANIMLILIK/Strength	AYRIŞMA/Weathering	HİPİ/ Fracture (30 cm)	KARIOT % (TC-PT) Core P.	KARIOT % (GP) Core P.	ROQ %	ÇİPHE NO / Sample No.
		DARBE SAYISI Numb. of Blows													
		GRAFIK Graph													
		0-15 cm.													
		15-30 cm.													
		30-45 cm.													
		N				10 20 30 40 50 60									
0,0						(0,00, 6,00)									
1,0	K-1	3,00 m				KIRMIZIMSİ KAHVE RENKLİ, BÜTÜNÜYLE AYRIŞMIŞ, ÇOK ZAYIF DAYANIMLI TUF									
2,0		1,50 m													
3,0	K-2	1,50 m													
4,0		1,50 m													
5,0	K-3	1,50 m													
6,0		3,00 m				(6,00, 34,50)									
7,0	K-4	3,00 m													
8,0		3,00 m													
9,0	K-5	3,00 m				KIRMIZIMSİ KAHVE RENKLİ, AZ AYRIŞMIŞ, ORTA DAYANIMLI TUF									
10,0		3,00 m													
11,0	K-6	3,00 m				YOĞUN GAZ BOŞLUKLU ÇATLAK DÜZLEMLERİ FeO2 BOYALI KİL SIVAMALI, 26,00-29,00 M ARASI ÇOK KİLLEŞMİŞ									
12,0		3,00 m													
13,0	K-7	3,00 m													
14,0		3,00 m													
15,0	K-8	3,00 m													
16,0		3,00 m													
17,0		3,00 m													
18,0		3,00 m													
19,0		3,00 m													
20,0		3,00 m													
21,0		3,00 m													
LOGU DÜZENLEYEN/Revised by						TARİH / Date		İMZA / Sign							
Şenda SARIALIOĞLU						01 / 01 / 2009									

EK-2 (Devam) Sondaj Logu 2/3

SONDAJ LOGU / BORING LOG										BÖLGE/District No 07 SONDAJ/Borehole No T-1-SK2 SAYFA/Page No 2 / 3 SONDÖR/Driller Metin Soydan			
Boring Depth (m) SONDAJ DERİNLİĞİ	HURUCİNCESİ Sample Type	BAŞA İTİRA RYU FTH	STANDART PENETRASYON DENEYİ Standard Penetration Test				JEOTEKNİK TANIMLAMA Geotechnical Description	PROFİL Profile	DAYANIMLI ÇEYREK AVERAGE STRENGTH	AYRILMA GÜCÜ (30 cm) HRM/FRACTURE (30 cm)	HAPOT % TC P/T CORP. HAPOT % GC P/G CORP.	ROD % CORP NO./Sample No.	
			DARBE SAYISI Numb. of Blows		GRAFIK Graph								
			0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	N							10
21,0		↑											
22,0	K-9	↓	3,00 m										
23,0		↑											
24,0		↓											
25,0		↑											
26,0	K-10	↓	3,00 m										
27,0		↑											
28,0		↓											
29,0	K-11	↓	3,00 m										
30,0		↑											
31,0		↓											
32,0	K-12	↓	3,00 m										
33,0		↑											
34,0	K-13	↓	1,50 m										
35,0	K-14	↓	1,50 m										
36,0		↑											
37,0		↓											
38,0	K-15	↓	3,00 m										
39,0		↑											
40,0		↓											
41,0	K-16	↓	3,00 m										
42,0		↑											
43,0		↓											
44,0	K-17	↓	3,00 m										
45,0		↑											
46,0		↓											
47,0	K-18	↓	3,00 m										
48,0		↑											
49,0		↓											
50,0	K-19	↓	3,00 m										
51,0		↑											
52,0		↑											

LOGU DÜZENLEYEN/Revised by	TARİH / Date	İMZA / Sign
Şenda SARIALIOĞLU	01 / 01 / 2009	

EK-2 (Devam) Sondaj Logu 3/3

SONDAJ LOGU / BORING LOG										BÖLGE/District No 07						
										SONDAJ/Borehole No T-1-SK2						
										SAYFA/Page No 3 / 3						
										SONDÖR/Driller Metin Soydan						
Sonda Derinliği SONDAJ DERİNLİĞİ Sample Type	KUBUNCEKİ Sample Type	BAŞEĞE BOYU Rm	STANDART PENETRASYON DENEYİ Standard Penetration Test				JEOTEKNİK TANIMLAMA Geotechnical Description	PROFİL Profile	DAYANIMLILIK/Strength	AYRILMA/Weathering	KURULUŞ/Structure (30 cm)	KAROT % TC R./TCOR R.	KAROT % GC R./GCOR R.	POD %	ÖRNEK NO./Sample No.	
			DARBE SAYISI Numb. of Blows			N										GRAFIK Graph
			0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm											
						10	20	30	40	50	60					
52,0	K-20	3,00 m														20
53,0		↓														
54,0		↑														
55,0	K-21	3,00 m														21
56,0		↓														
57,0		↑														
58,0	K-22	3,00 m														22
59,0		↓														
60,0																
61,0																
62,0																
63,0																
64,0																
65,0																
66,0																
67,0																
68,0																
69,0																
70,0																
71,0																
72,0																
73,0																
74,0																
75,0																
76,0																
77,0																
78,0																
79,0																
80,0																
81,0																
82,0																

MAVİMSİ BEYAZ
RENKLİ, AZ ÇAKILLI,
YOĞUN BİYOTİT KUMU
İÇERİKLİ, AZ SİTLİ,
YÜKSEK PLASTİSİTELİ
BENTONİT KİLİ

KUYU SONU 60,00

LOGU DÜZENLEYEN/Revised by	TARİH / Date	İMZA / Sign
Şenda SARIALIOĞLU	01 / 01 / 2009	

EK-3 Hidrometre analizi sonucu

Tarih :09.09.2009

Başlama

Zamanı (T) :09:00

ELEKLER		KALAN g	Σ KALAN g	Σ KALAN %	Σ GEÇEN %	Σ NUMUNEDE % GEÇEN
No.	mm					
No.10	2,00	0,00	0,00	0,00	99,6	99,6
No.40	0,42	3,09	3,09	6,18	92,6	92,2
No.200	0,075	7,62	10,71	21,42	80,8	80,5

Özgül Ağırlık

Kuru Num. Ağır.

Özg. Ağ. D.Fakt

(y)=

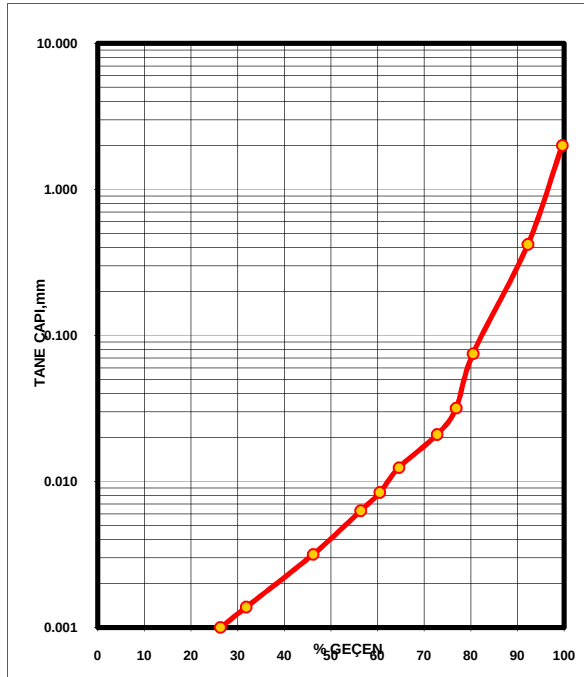
2,540

(W)=

50

(a)= 1,03

OKUMA ARALIKLARI,dk	OKUMA ZAMANI	HİDROMETRE OKUMASI,g/lt	OKUMA SICAKLIĞI,°C	SICAKLIK DÜZ. KATSAYISI	DÜZELTİLMİŞ OKUMA	SUSPANSİYON %'si	Σ NUMUNEN SUSP. %'si	MAKSİMUM TANE ÇAPI,mm	TANE ÇAPI DÜZ. KATSAYILARI			DÜZELTİLMİŞ TANE ÇAPI
f	T=t+f	r	S	±M	R=r±M	P	P1	d ₁	k _n	k _i	k _g	d=d ₁ ×k _n ×k _i ×k _g
2	09:02	40	22	-2,4	37,6	77,2	76,8	0,0400	0,97	0,78	1,04	0,0318
5	09:10	38	22	-2,4	35,6	73,0	72,8	0,0260	0,97	0,80	1,04	0,0210
15	09:20	34	22	-2,4	31,6	64,8	64,6	0,0150	0,97	0,82	1,04	0,0124
30	09:35	32	22	-2,4	29,6	60,7	60,5	0,0100	0,97	0,83	1,04	0,0084
60	10:05	30	22	-2,4	27,6	56,6	56,4	0,0074	0,97	0,84	1,04	0,0063
250	13:15	25	22	-2,4	22,6	46,3	46,2	0,0036	0,97	0,87	1,04	0,0032
1440	09:05	18	22	-2,4	15,6	32,0	31,8	0,0015	0,97	0,91	1,04	0,0014



% ÇAKIL (>2 mm)	0,4
% İRİ KUM (2-0,42 mm)	7,4
% İNCE KUM (0,42-0,075 mm)	11,8
% SİLT (0,075-0,002 mm)	42,2
% KİL (0,002-0,001 mm)	11,9
% KOLLOİD KİL (< 0,001 mm)	26,3
	100,00

EK-4 pH deneyleri



Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı
İnönü Bulvarı 06100 Yücetepe/ANKARA

AB-0059-T

289-1697

09-09

Sayfa 2/2
Page 2 of 2

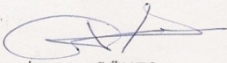
TOPRAK NUMUNESİ DENEY RAPORU

NUMUNEYİ GÖNDEREN:	Üstyapı Şubesi Müdürlüğü-Toprak Lab.	NUMUNE NO:	M/KY/2009-319-320
FİRMA ADI:	"	BÜRO KAYIT:	289-1697
İLGİ:	09.09.2009 gün ve B.11.1.TCK.0.12.03-273.01/1486 sayılı yazı	NUMUNE CİNSİ:	Toprak (2 adet)
DENEY STANDARTI:	TS 6166/ Aralık 1988	RAPOR TARİHİ:	10.09.2009
CİHAZ NO:	M/KY/ 083 ; M/KY/ 079 ;M/KY/003; M/KY/ 001 ;M/KY/084; M/KY/ 089;M/KY/060		

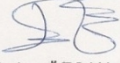
DENEY ADI	DENEY SONUCU	
TOPRAK NUMUNESİNDE;	M/KY/2009-319	M/KY/2009-320
	% 5 Kireçli	% 7 Kireçli
1- pH (25 °C), (TS 6166/ Aralık 1988)	12.01 (**)	12.08 (**)

AÇIKLAMALAR:
Üstyapı Şubesi Müdürlüğü-Toprak Lab. tarafından, 09.09.2009 gün ve B.11.1.TCK.0.12.03-273.01/1486 sayılı yazısı ile laboratuvarımıza elden getirilen, (Ordu-Ulubey) Ayrım-Topçam Yolu T-1 tüneli ve yaklaşım yollarının üstyapı iyileştirilmesi araştırma çalışması kapsamında kullanılacak olan, **Toprak numuneleri** üzerinde istenilen kimyasal deneyler, ilgili standartlara göre yapılmış olup, sonuçlar yukarıda verilmiştir.

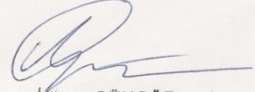
Not: () İşareti akredite deney sonucunu göstermektedir.**
Bu rapor yalnızca Üstyapı Şubesi Müdürlüğü-Toprak Lab.'na ait, 08-09/09/2009 tarihlerinde gerçekleştirilen 319 ve 320 numaralı Toprak numunelerinde, pH tayini deneyi için geçerli olup, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı'nın yazılı onayı olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürlü raporlar geçersizdir. Deney sonuçları, sadece deneye tabi tutulan numuneler için geçerlidir. Laboratuvarımıza elden getirilen deneye tabi söz konusu numunelerin temsil özelliğinden laboratuvarlarımız sorumlu değildir. Deneye tabi tutulan numunelerin laboratuvarımızda saklı tutulma süresi (1) aydır.



İbrahim GÜNEŞ
Kimya Lab. Tek.



Emine ÖZCAN
Kimya Lab. Şefi



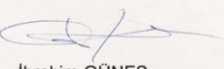
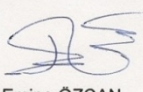
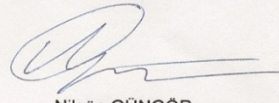
Nilgün GÜNGÖR
Malz. Lab. Şb. Md. Yrd.

Karayolları Genel Müdürlüğü
Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı
06100-Yücetepe/ANKARA

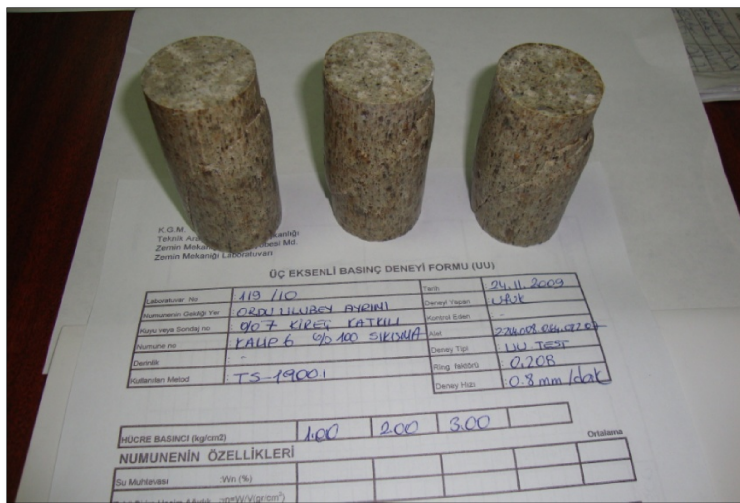



Tel: 0312 4158502
Fax: 0312 4157854
E-mail: tek.aras-d-b-askanlik@kgm.gov.tr

EK-4 (Devam) pH deneyleri

 Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı İnönü Bulvarı 06100 Yücetepe/ANKARA		AB-0059-T	
		289-1786	
		09-09	
Sayfa 2/2 Page 2 of 2			
TOPRAK NUMUNESİ DENEY RAPORU			
NUMUNEYİ GÖNDEREN:	Üstyapı Şubesi Müdürlüğü-Toprak Lab.	NUMUNE NO:	M/KY/2009-348-349
FİRMA ADI:	"	BÜRO KAYIT:	289-1786
İLGİ:	24.09.2009 gün ve B.11.1.TCK.0.12.03-273.01/1563 sayılı yazı	NUMUNE CİNSİ:	Toprak (2 adet)
DENEY STANDARTI:	TS 6166/ Aralık 1988	RAPOR TARİHİ:	29.09.2009
CİHAZ NO:	M/KY/ 083 ; M/KY/ 079 ;M/KY/003; M/KY/ 001 ;M/KY/084; M/KY/ 089;M/KY/060		
DENEY ADI		DENEY SONUCU	
TOPRAK NUMUNESİNDE;		M/KY/2009-348	M/KY/2009-349
1- pH (25 °C), (TS 6166/ Aralık 1988)		KİREÇSİZ	% 10 Kireçli
		8.58 (**)	12.10 (**)
AÇIKLAMALAR: Üstyapı Şubesi Müdürlüğü-Toprak Lab. tarafından, 24.09.2009 gün ve B.11.1.TCK.0.12.03-273.01/1563 sayılı yazısı ile laboratuvarımıza elden getirilen, (Ordu-Ulubey) Ayırım-Topçam Yolu T-1 tüneli ve yaklaşım yollarının üstyapı iyileştirilmesi araştırma çalışması kapsamında kullanılacak olan, Toprak numuneleri üzerinde istenilen kimyasal deneyler, ilgili standartlara göre yapılmış olup, sonuçlar yukarıda verilmiştir.			
Not: (**) İşareti akredite deney sonucunu göstermektedir. Bu rapor yalnızca Üstyapı Şubesi Müdürlüğü-Toprak Lab.'na ait, 15-23/09/2009 tarihlerinde gerçekleştirilen 348 ve 349 numaralı Toprak numunelerinde, pH tayini deneyi için geçerli olup, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı'nın yazılı onayı olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürlü raporlar geçersizdir. Deney sonuçları, sadece deneye tabi tutulan numuneler için geçerlidir. Laboratuvarımıza elden getirilen deneye tabi söz konusu numunelerin temsil özelliğinden laboratuvarımız sorumlu değildir. Deneye tabi tutulan numunelerin laboratuvarımızda saklı tutulma süresi (1) aydır.			
 İbrahim GÜNEŞ Kimya Lab.Tek.		 Emine ÖZCAN Kimya Lab.Şefi	
		 Nilgün GÜNGÖR Malz. Lab. Şb. Md. Yrd.	
Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı 06100-Yücetepe/ANKARA		  Tel: 0312 4158502 Fax: 0312 4157854 E-mail: tek.aras-d-b-askanlik@kgm.gov.tr	

EK-5 Katkısız ve kireç katkılı malzemelerin üç eksenli basınç deney numuneleri



EK-5 (Devam) Katkısız ve kireç katkılı malzemelerin üç eksenli basınç deney numuneleri



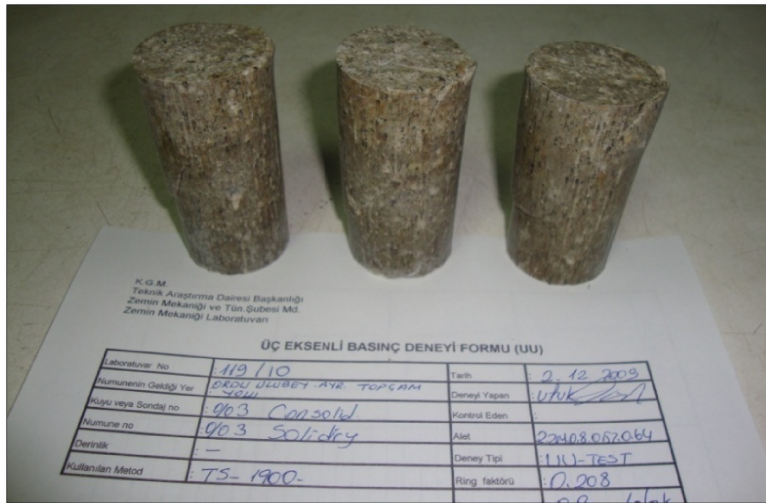
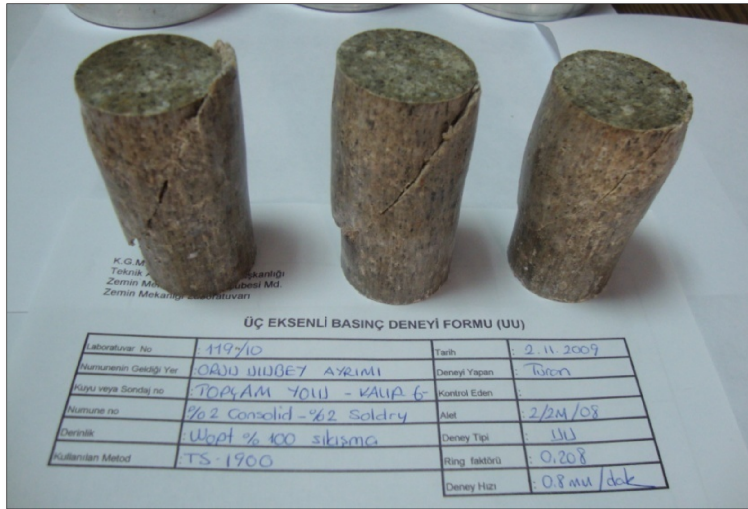
K.G.M.
Teknik A
Zemin Mek
Zemin Mek

ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ FORMU (UU)

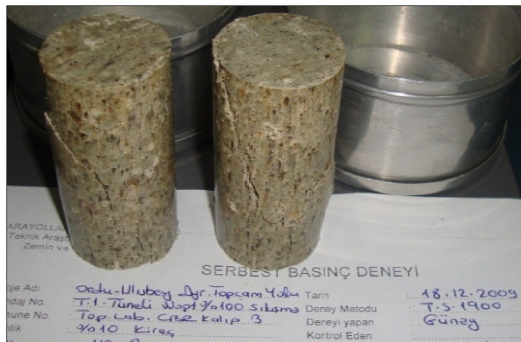
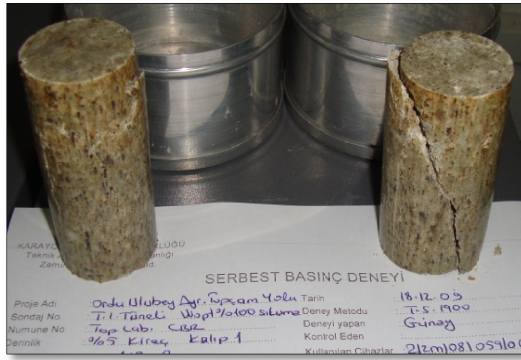
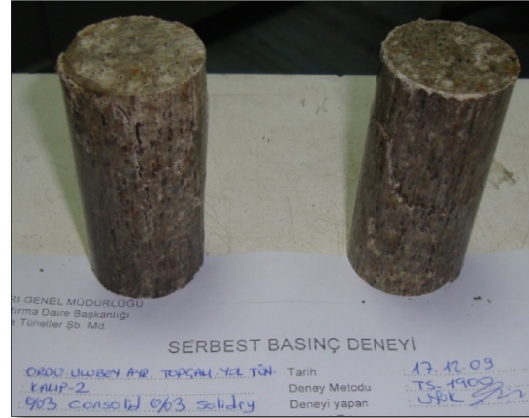
Laboratuvar No	119/10	Tarih	25.11.2009
Numunenin Getirdiği Yer	ORDU DÜĞEY AYR.	Deneyi Yapan	TURAN
Kuyu veya Sondaj no	TOPKANI YOLU	Kontrol Eden	
Numune no	%10 KIREÇ KATKILI	Alet	2/2M/08
Deneyik	Uçort + %100 SIKIŞMA	Deney Tipi	III
Kullanılan Metod	TS-1900	Ring faktörü	0.208
		Deney Hızı	0.8 mm/dak

HÜCRE BASINCI (kg/cm ²)	1.00	2.00	3.00	
-------------------------------------	------	------	------	--

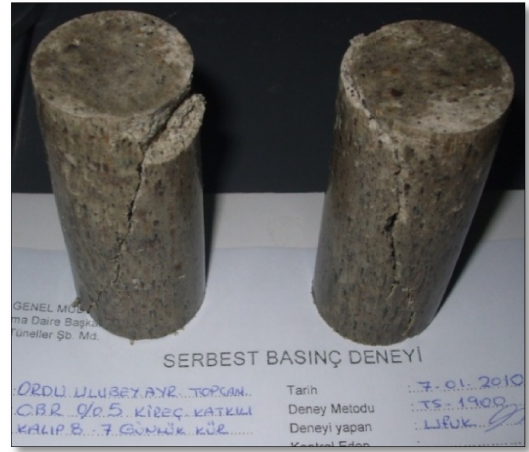
EK-6 C+S katkılı malzemelerin üç eksenli basınç deneyi numuneleri



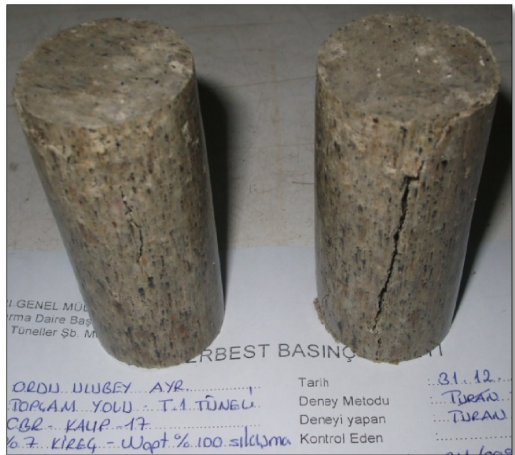
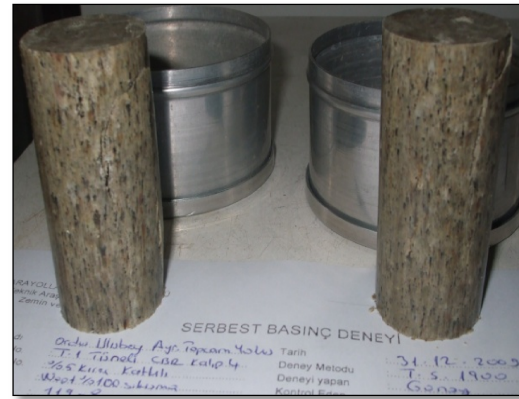
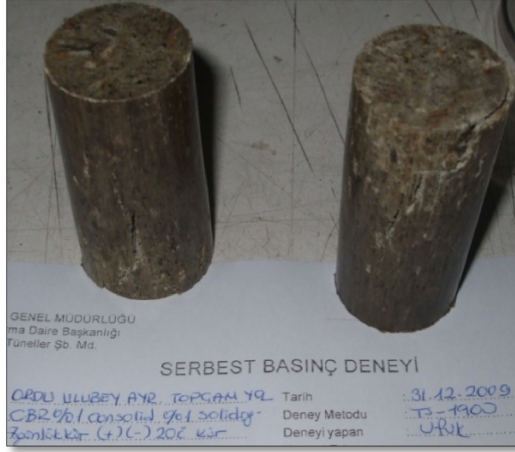
EK-7 Kürsüz serbest basınç dayanımı deney numuneleri sırayla
katkısız %1-2-3- C+S ve %5-7-10 Kireç



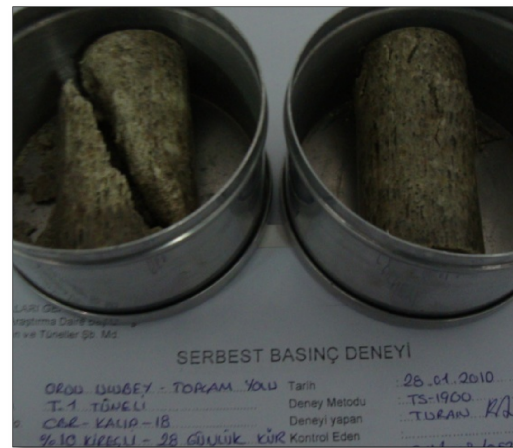
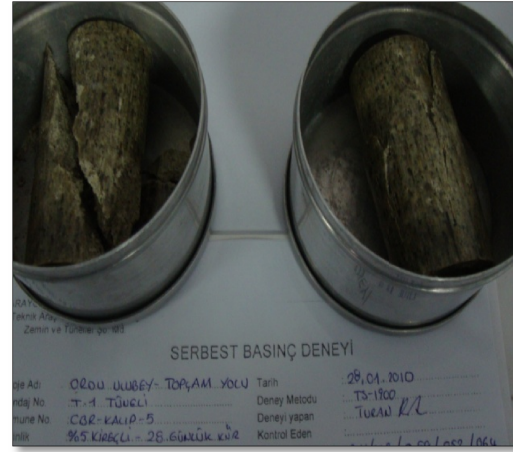
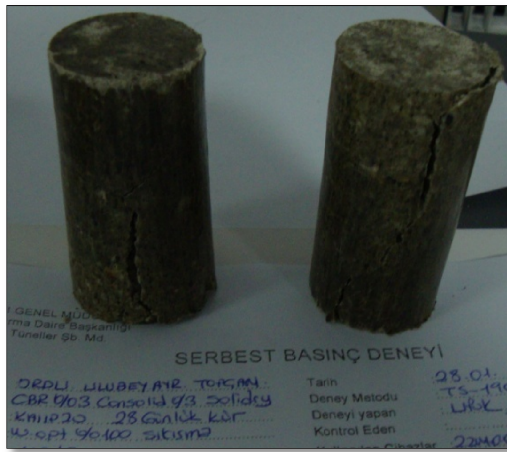
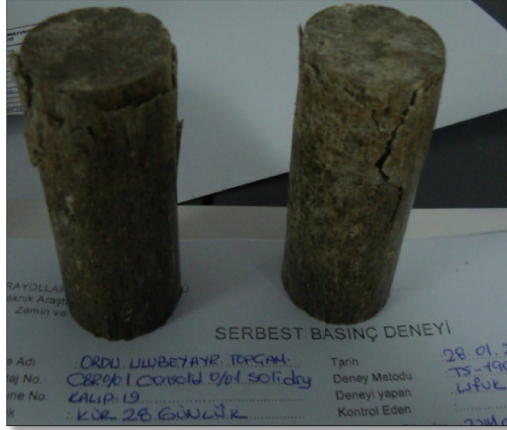
EK-8 7 gün kürlü serbest basınç deney numuneleri sırasıyla %1-2-3 C+S ve %5-7-10 Kireç



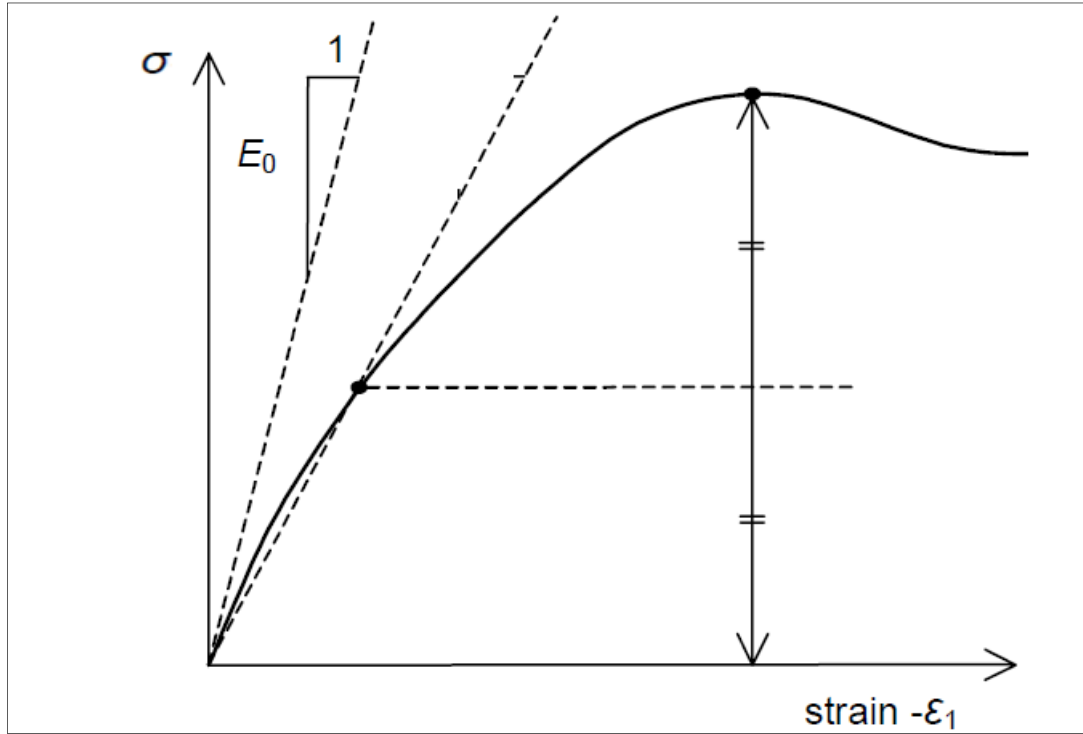
EK-9 7+5 gün kürlü serbest basınç deney numuneleri sırasıyla %1-2-3 C+S ve %5-7-10 Kireç



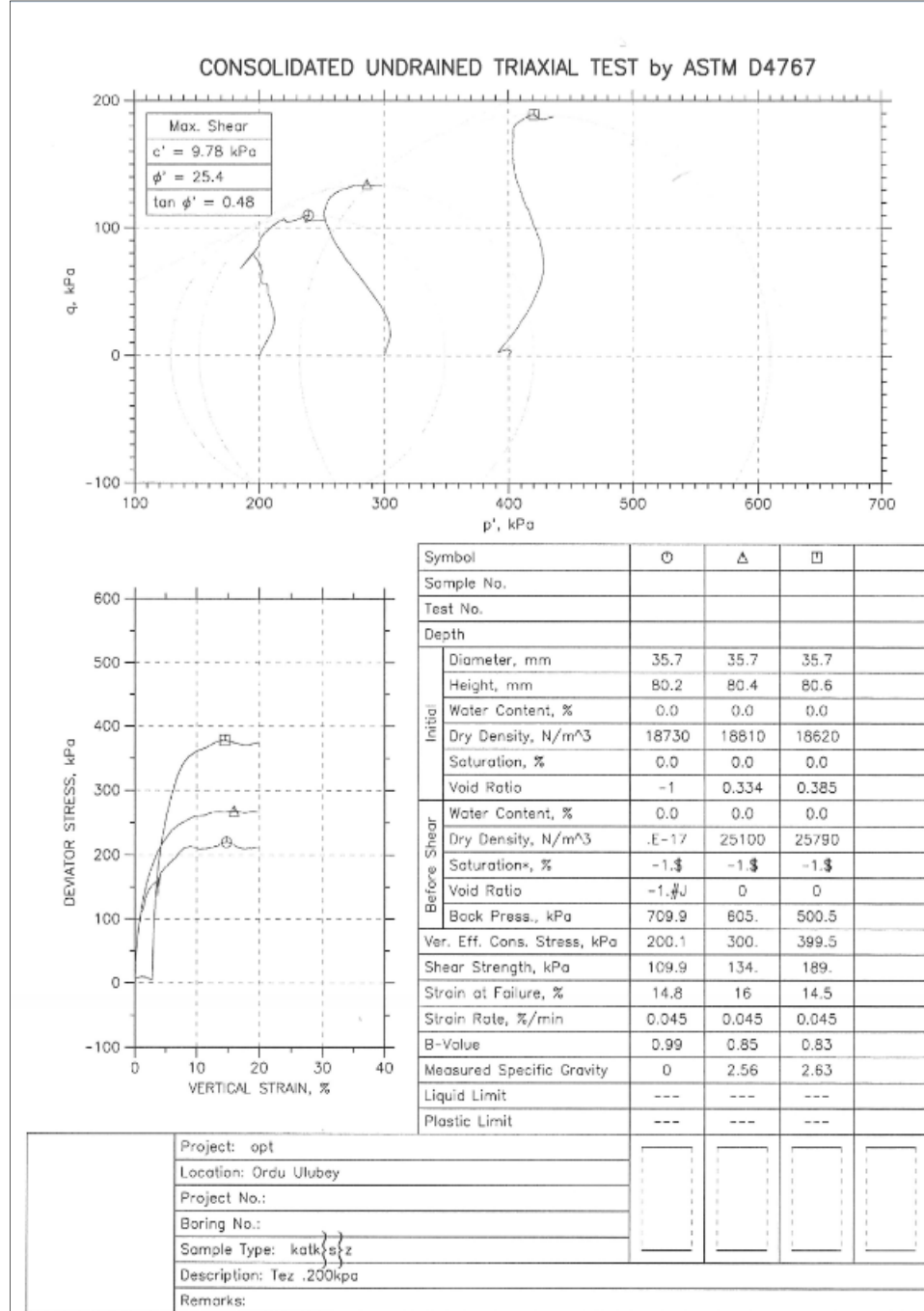
EK-10 28 gün kürlü serbest basınç deney numuneleri sırasıyla %1-2-3 C+S ve %5-7-10 Kireç



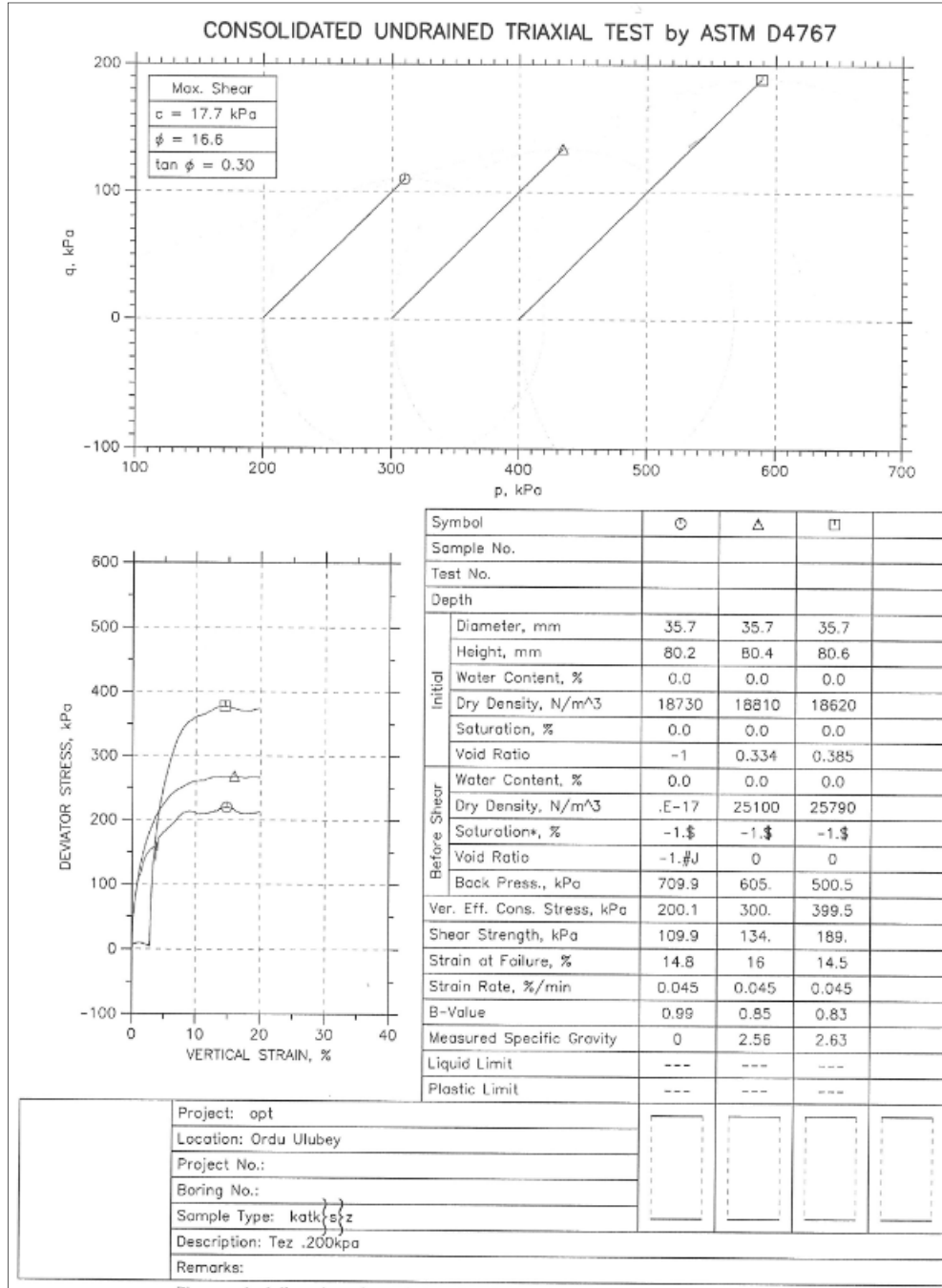
EK-11 Elastisite modülü (tanjant modülü) örnek gösterimi



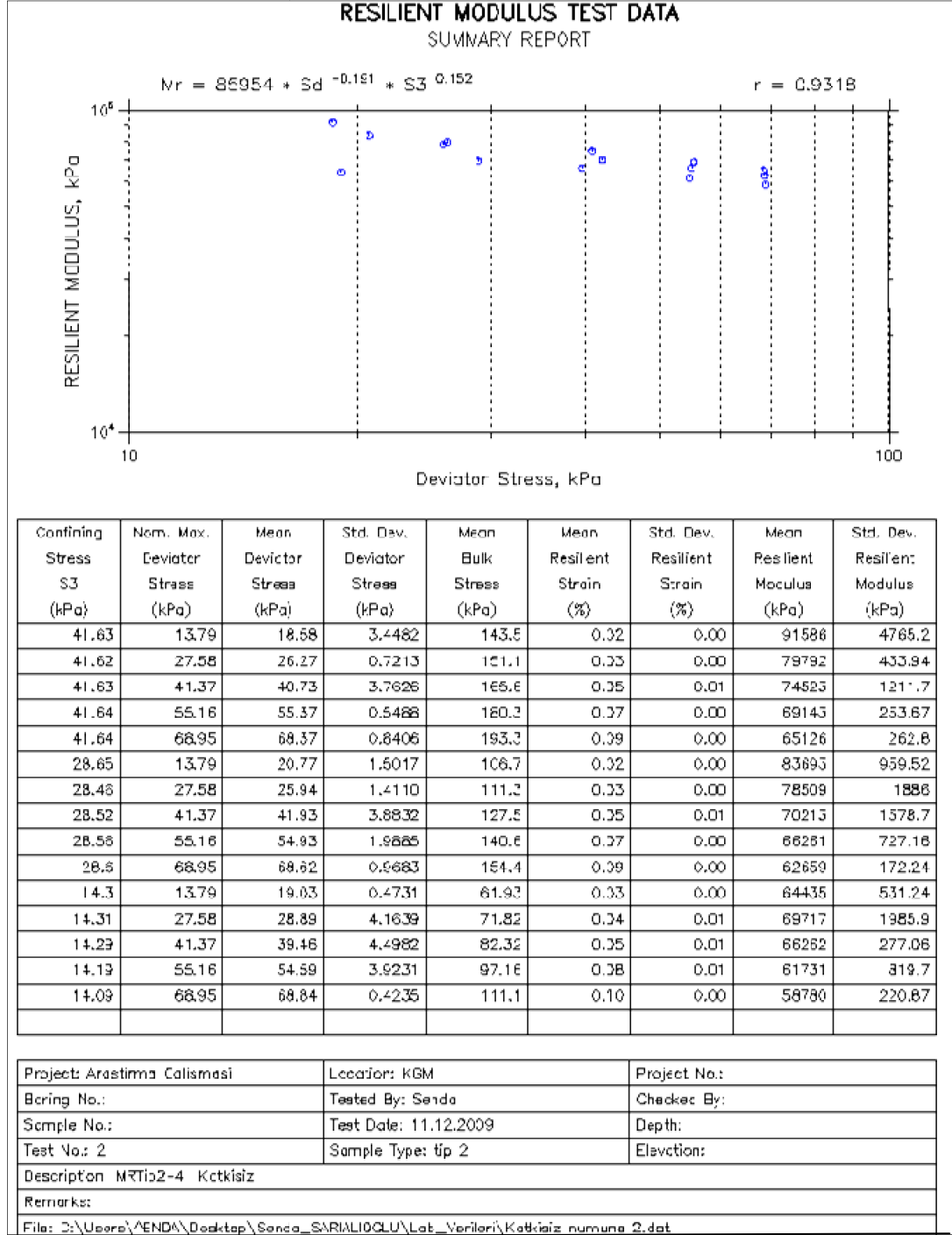
EK-12 Üç eksenli basınç (CU) Deneye sonuçları



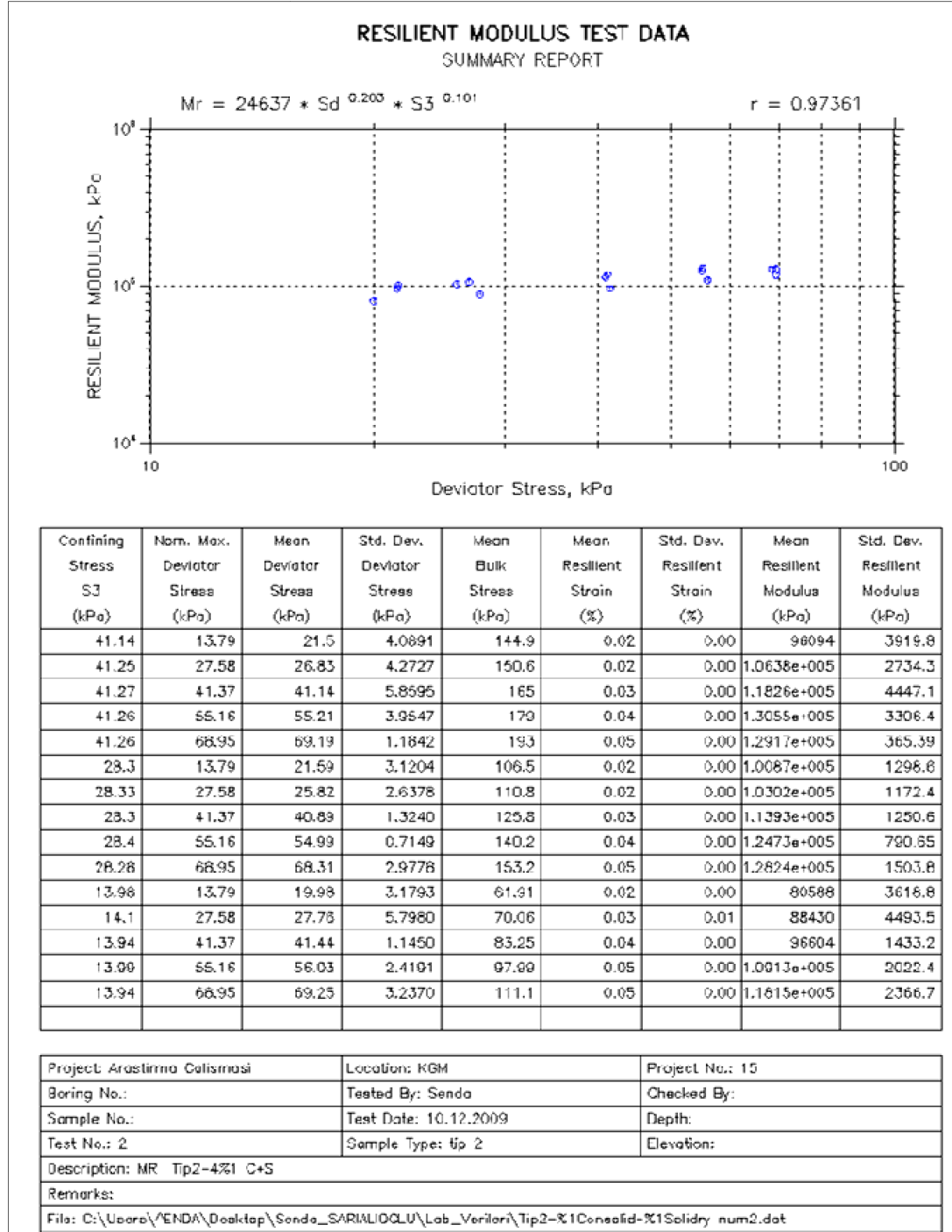
EK-12 (Devam) Üç eksenli basınç (CU) Deneye sonuçları



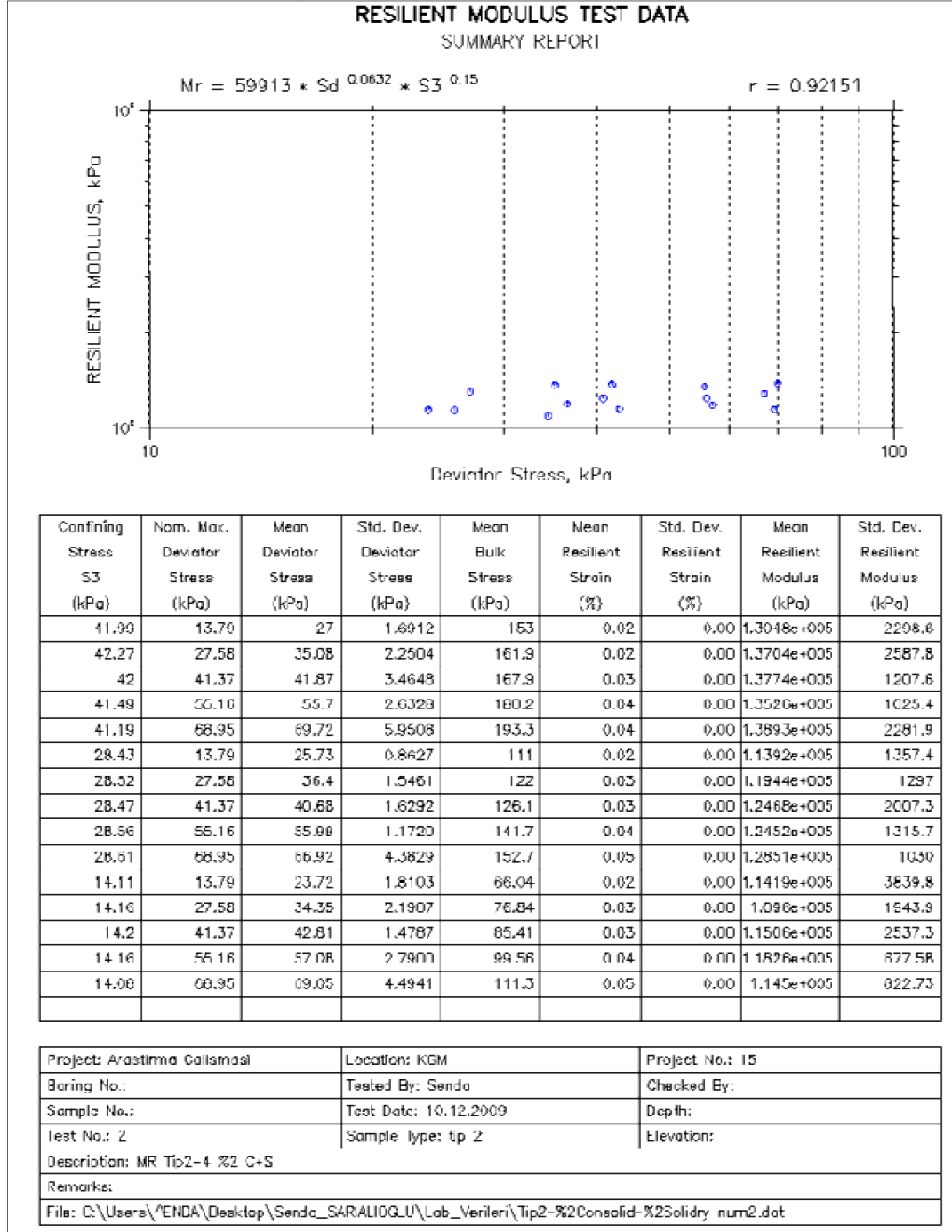
EK-13 Esneklik modülü deney sonuçları



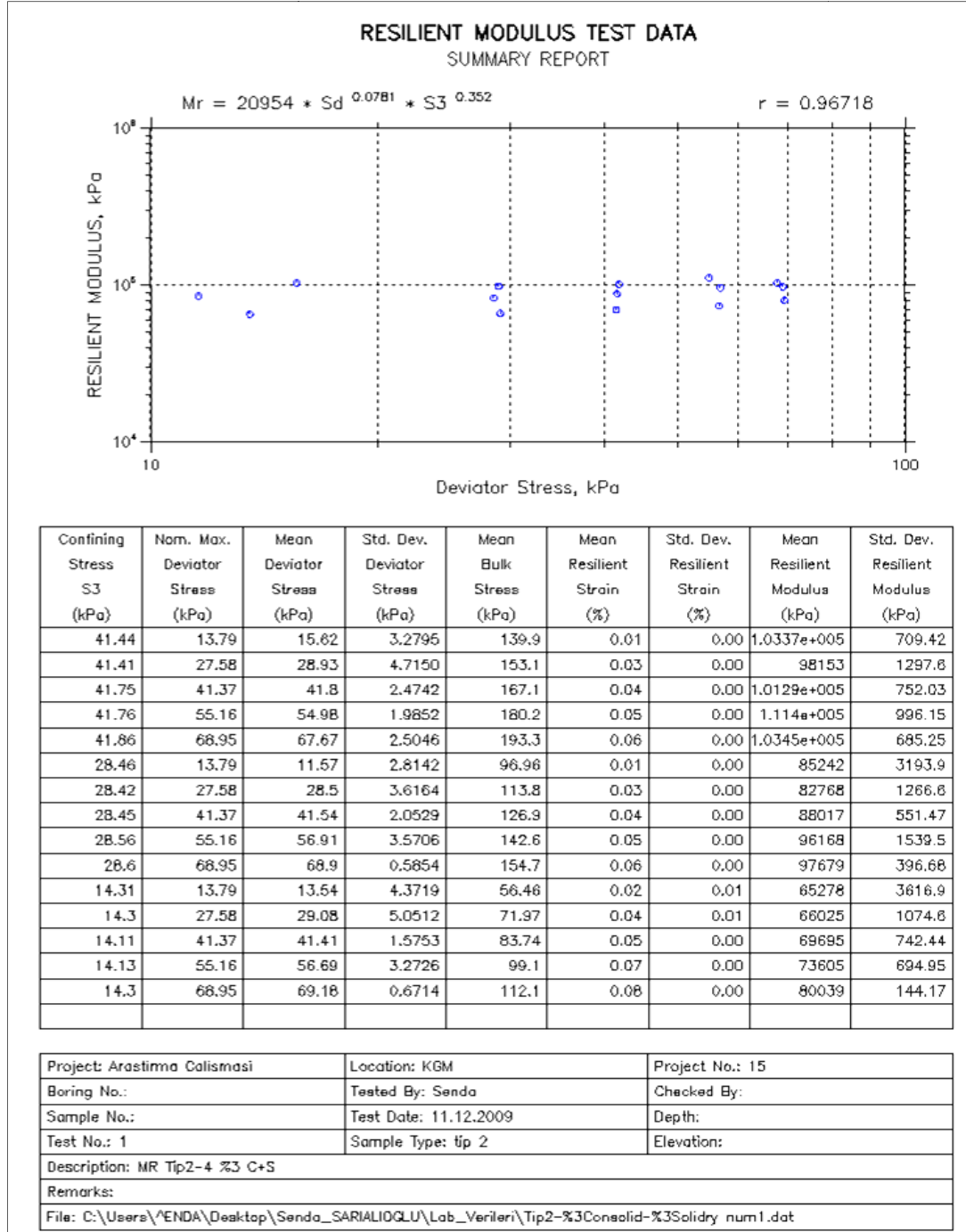
EK-13 (Devam) Esneklik modülü deney sonuçları



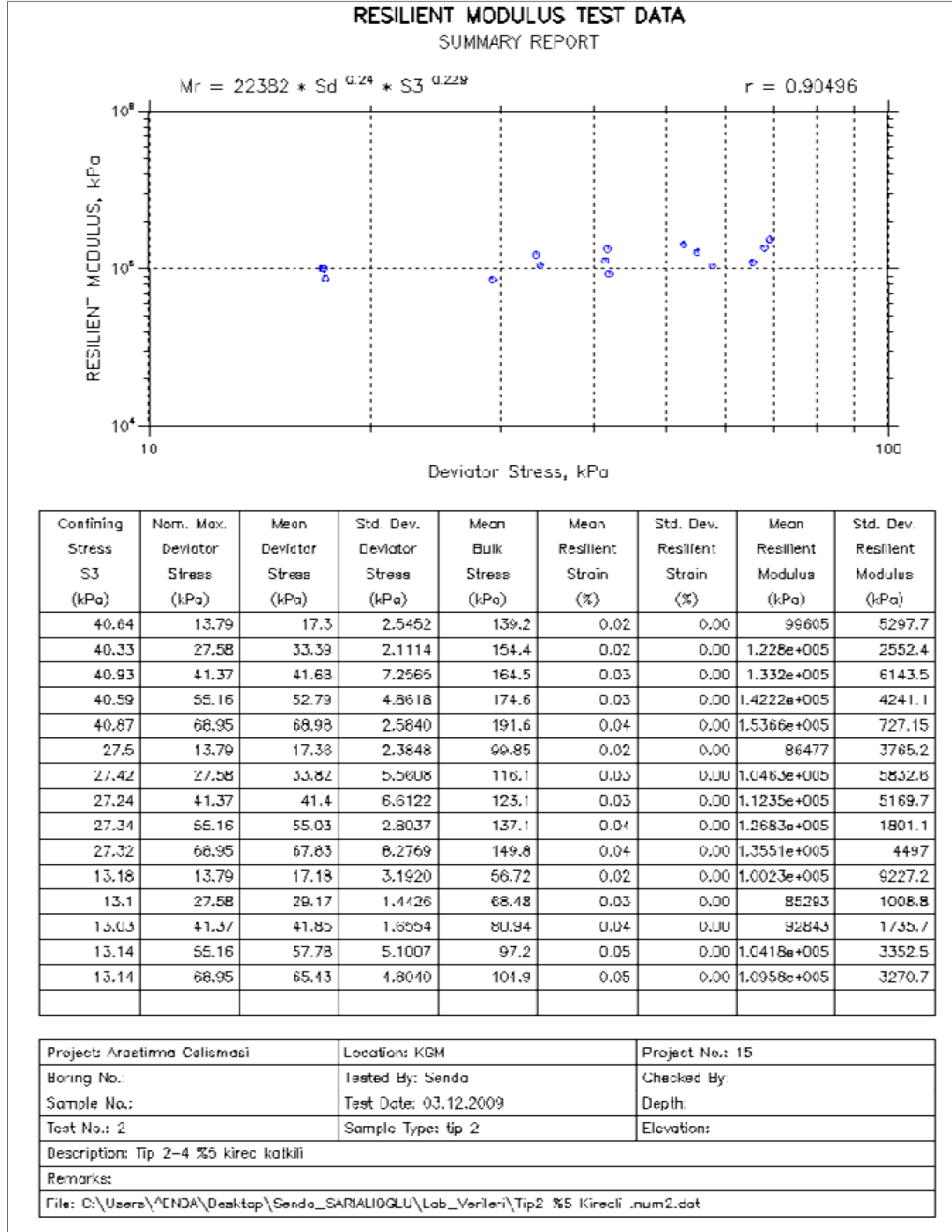
EK-13 (Devam) Esneklik modülü deney sonuçları



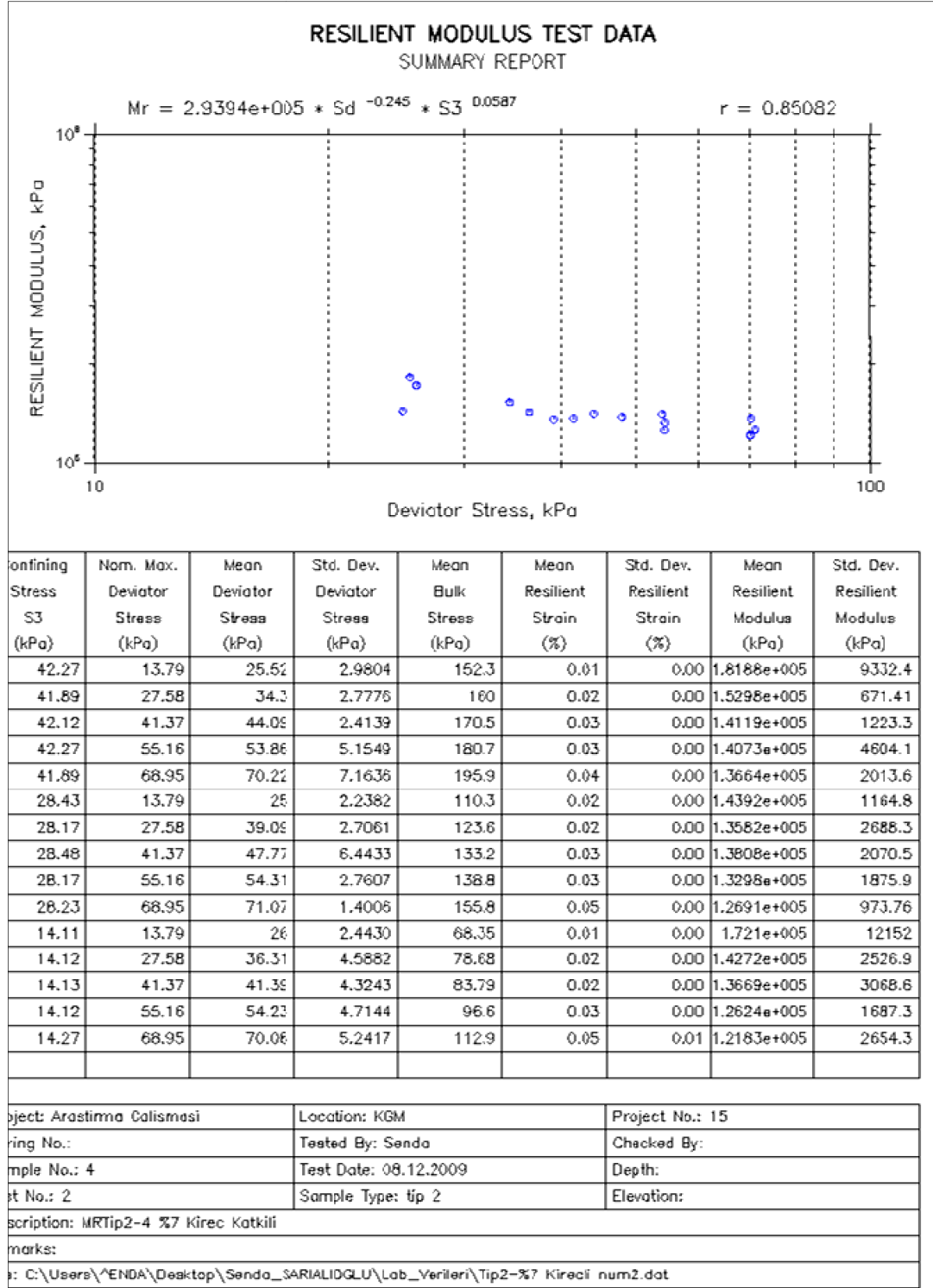
EK-13 (Devam) Esneklik modülü deney sonuçları



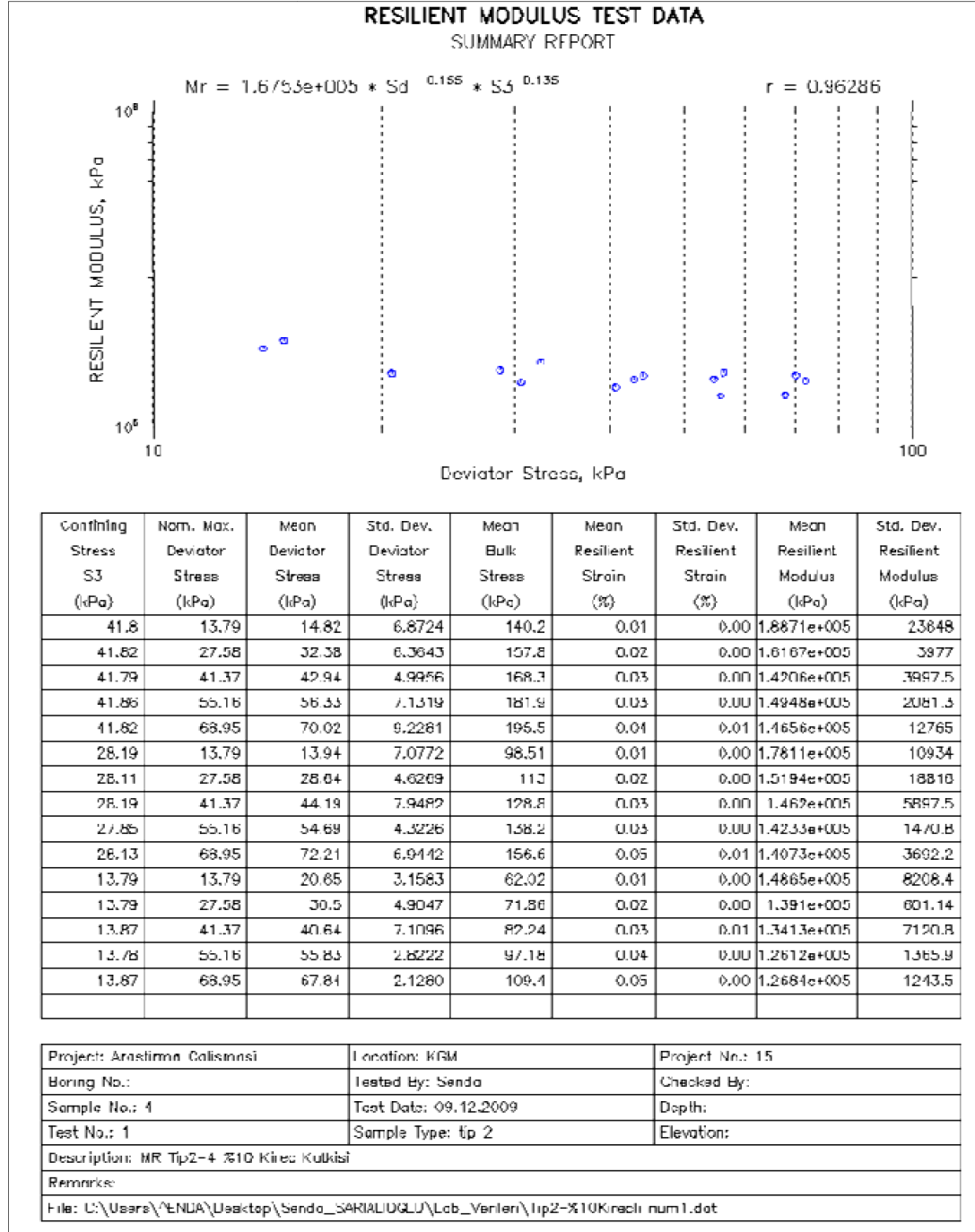
EK-13 (Devam) Esneklik modülü deney sonuçları



EK-13 (Devam) Esneklik modülü deney sonuçları



EK-13 (Devam) Esneklik modülü deney sonuçları



EK-14 Esnek üst yapı projelendirme program çıktısı

ESNEK ÜSTYAPI PROJELENDİRME FORMU										
DEVLET YOLU (GÜVENİLİRLİK % 85)										
Yolun Adı		: (Ordu-Ulubey) Ayr.-Topçam Yolu								
Yolun Km		: 6+015-6+375		Bölgesi		: 7		K.K.No. :		
Yol Sınıfı		2		Şerit Sayısı i x j =		2		proje süresi		
Pt		2,5		Yön Sayısı i =		2		20		
n		1		Aynı Yönde Şerit Sayısı j =		1				
TRAFİK GRUPLARI		Treyler		Kamyon		Otobüs		O.Y.T.A. Otomobil		
VOGT sayım yılı:		2008		57		939		10		
Trafik Aruş Katsayısı, r (%) :		4		4		5		5		
İlk Trafik T ₁ :		2009		59		977		11		
Son Trafik T ₂ :		2029		130		2140		28		
				90		1483		18		
Taşıt Eşdeğerlik Faktörü, TEF :		4,1		2,9		3,2		0,6		
Hesap Şendine Döşen Gerekli Standart Dengel Yolcu Tekeörir Sayısı (Wg)=T ₁ xTEF ₁		185		2150		28		362		
Toplam Standart Dengel T ₂ 2 Tekeörir Sayısı T ₂ 2=Wg/366x20				19.912.391				2		
İstisna İlkin Özellikleri	Yüksek Ort. Yağı (mm)			Ortalama Yar İriliği °C				Yüksek İstisna Taban Yüzeyinden Derinliği (cm)		
	Yağı Gölle Sayısı			Ortalama Kıp İriliği °C				Derin İstisna Taban Yüzeyinden Derinliği (cm)		
	Karlı Gölle Sayısı			Derin Gölle Sayısı				BOLGE FAKTORU, R		
	Minimum Kar Kalınlığı (cm)			Minimum Döş Derinliği (cm)				1		
ÜSTYAPI TABAKALARI		İLGİLİ ŞARTNAME						a	D	axD (cm)
Asfalt Betonlu Aşınma Tabakası		K.T.Ş. 407. KISIM						0,42	5	2,10
Asfalt Betonlu Binder Tabakası		K.T.Ş. 407. KISIM						0,40	7	2,80
Bitümlü Temel Tabakası		K.T.Ş. 406. KISIM						0,36	8	2,88
Plentmiks Temel Tabakası		K.T.Ş. 402. KISIM						0,15	20	3,00
Alttemel Tabakası		K.T.Ş. 401. KISIM						0,13		
								Mevcut SN		10,78

EK-15 Üstyapı kalınlık tespit abağı

TABLO 12.2 R=%85 GÜVENİLİRLİK İÇİN ASFALT BETONU KAPLAMALI YOLLARDA UYGULANACAK ÜSTYAPI KALINLIKLARI

ÜSTYAPI TABAKALARI	TRAFİK KATEGORİLERİ (MİLYON)														
	3-15	15-20	20-25	25-35	35-45	45-60	60-75	75-100	100-125	125-150	150-200	200-250	> 250		
AŞINMA**	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5		
BİNDER	6	7	7	7	8	8	8	10	10	10	10	11	12		
BITÜMLÜ TEMEL	8	8	9	10	10	11	12	11	12	13	14	14	14		
PMT VEYA KIRMATAŞ TEMEL	15	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20		
TOPLAM MEVCUT SN	9.63	10.78	11.14	11.50	11.90	12.26	12.62	13.06	13.42	13.78	14.14	14.54	14.94		
MR (psi)															
5800	30/35	35/40	30/35	30/35	30/35	35/40	35/40	35/40	35/45	40/45	40/45	40/50	40/50		
6750	25/30	30/35	25/30	25/30	25/30	30/35	30/35	30/35	30/35	30/40	35/40	35/40	35/40		
7500	20/25	25/30	20/25	20/25	20/25	25/30	25/30	25/30	25/30	30/35	30/35	30/35	30/35		
8300	20/25	20/25	15/20	20/25	20/25	20/25	20/25	20/25	25/30	25/30	25/30	25/30	25/30		
8900	15/20	20/25	15/20	15/20	15/20	20/20	20/20	20/25	20/25	20/25	20/25	25/30	25/30		
9500	15/20	20/20	15/20	15/20	15/20	15/20	15/20	20/20	20/20	20/20	20/25	20/25	20/25		
10000	15/20	15/20	15/20	15/20	15/20	15/20	15/20	15/20	15/20	20/20	20/20	20/20	20/20		
10650-14000	15/20	15/20	15/20	15/20	15/20	15/20	15/20	15/20	15/20	15/20	15/20	15/20	15/20		
14630	* /20	* /20	* /20	* /20	* /20	* /20	* /20	* /20	15/20	15/20	15/20	15/20	15/20		
15300	* /20	* /20	* /20	* /20	* /20	* /20	* /20	* /20	* /20	15/20	15/20	15/20	15/20		
16000	* /20	* /20	* /20	* /20	* /20	* /20	* /20	* /20	* /20	* /20	15/20	15/20	15/20		
16350-18650	* /20	* /20	* /20	* /20	* /20	* /20	* /20	* /20	* /20	* /20	* /20	* /20	* /20		
19000	***	***	***	***	***	***	***	***	***	* /20	* /20	* /20	* /20		
19400	***	***	***	***	***	***	***	***	***	* /20	* /20	* /20	* /20		
≥20000															
GEREKMEZ															

* Üstyapı tabanının Tablo 14.1'e uygun olması ve 75 mm'den büyük çapta malzeme içermemesi kaydıyla PMT kalınlığı 5 cm artırılabilecektir.

** Taş Maslık Asfalt (TMA) kullanılması durumunda aşınma tabakasının kalınlığı 4 cm olacak, bitümlü temel kalınlığı 1 cm artırılabilecektir.

*** Üstyapı tabanının Tablo 14.1'e uygun olması ve 75 mm'den büyük çapta malzeme içermemesi kaydıyla alttemel verilemeyecektir.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : SARIALIOĞLU, Şenda
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 18.05.1973 Trabzon
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 387 25 56
 e-mail : ssarialioglu@gmail.com.tr

Eğitim

Derece	Eğitim	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /İnşaat Müh.	2010
Lisans	Karadeniz Teknik Ü./ İnşaat Müh.	1998
Lise	Trabzon Lisesi	1991

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1998- 2000	Ky.12. Bölge Müdürlüğü	Zem. Mek. Müh.
2000- 2007	Karayolları Genel Müdürlüğü	Zem. Mek. Müh.
2007-	Karayolları Genel Müdürlüğü	Zem. Mek. Şefi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Resim, Seyahat, Animasyon