

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**C SINIFI UÇUCU KÜL KATKILI SİLTLERİN
DAYANIM VE DONMA-ÇÖZÜLME
DİRENCİNİN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

Alper EROL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu: 624.01.00

Sunuş Tarihi: 13/02/2007

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Selim Altun

Bornova-İZMİR

III

Sayın Alper EROL tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak sunulan “ C Sınıfı Uçucu Kül Katkılı Siltlerin Dayanım ve Donma-Çözülme Direncinin Deneysel Olarak İncelenmesi” adlı bu çalışma, Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’nin ve Enstitü yönergesinin ilgili hükümleri dikkate alınarak,

Jüri Başkanı : **Yrd. Doç. Dr. Selim ALTUN**

Üye : **Doç. Dr. H. Recep YILMAZ**

Üye : **Yrd. Doç. Dr. Bahadır YAVUZ**

tarafından değerlendirilmiş olup yapılan Tez Savunma Sınavında aday oy ile başarılı bulunmuştur.

ÖZET**C SINIFI UÇUCU KÜL KATKILI SİLTLERİN DAYANIM
VE DONMA-ÇÖZÜLME DİRENCİNİN DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

EROL, Alper

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Tez Yöneticisi: Yrd. Doç. Dr. Selim ALTUN

Şubat 2007, 105 sayfa

Uçucu kül, termik santrallerden elde edilen bir atık malzeme olup son yıllarda özellikle inşaat sektöründe yaygın kullanım alanı bulmuştur. Puzolanik özelliğe sahip olması ve ekonomik olması, uçucu külün geoteknik uygulamalarında kullanılmasını sağlamıştır. Yapılan çalışmalar sonucu uçucu külün zemin stabilizasyonunda kullanımının faydalı olacağı görülmektedir.

Kış koşullarında don olayı zemin boşluklarında yer alan suların donarak zeminin hacimsel olarak artışına, dolayısıyla zeminde çatlakların oluşmasına yol açmaktadır. Sıcaklığın artmasıyla buzlar eriyerek zeminin büzülmesine sebep olmaktadır. Bu döngü sayısı arttıkça zeminde çatlaklar artmakta, dayanım miktarı düşmektedir. Bu fiziksel etkinin zemine verdiği hasarı en aza indirmek maksadıyla uçucu kül ilave edilmiş zeminin donma-çözülme direnci inceleme konusu olarak ele alınmıştır.

Bu çalışmada Turgutlu yöresinden temin edilen silt zeminin mekanik özelliklerinin uçucu kül ile iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Zemin karışımları farklı kür sürelerinde serbest basınç deneyine, farklı çevrimlerle donma-çözülme deneyine tabi tutulmuştur. Ayrıca deneysel çalışmalarda çimento da kullanılarak en iyi performans yakalanmaya çalışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Uçucu kül, silt zemin, serbest basınç dayanımı, donma-çözülme.

ABSTRACT

**INVESTIGATION OF STRENGTH AND FREEZE - THAW
RESISTANCE OF SILTS STABILIZED WITH CLASS - C
FLY ASH**

EROL, Alper

MSc. in Civil Engineering

Supervisor: Asist. Prof. Dr. Selim Altun

February 2007, 105 pages

Fly ash is a residual material obtained from thermal power plants has a widespread usage area especially in civil engineering since decades. Having pozzolanic characteristics and its being economical provide fly ash to be used in geotechnical applications. As a result of previous studies it is seen that fly ash is useful in soil stabilization.

In winter conditions freezing of water in soil pores increases soil volume; so this causes soil cracks. With increasing temperature ice thaws and this causes shrinkage of soil. With increasing number of cycles, cracks in soil increase and strength decrease. To minimize the physical effect on soil, freeze-thaw resistance of fly ash added soil is investigated.

In this study it is aimed to improve the mechanical properties of silty soil from Turgutlu region by stabilizing by adding fly ash. Soil mixtures are subjected to unconfined compression test for various cure periods and freeze-thaw test for various cycles. Additionally, cement is utilized in experimental studies to get the best performance.

Key words: Fly ash, silty soil, unconfined compressive strength, freeze-thaw.

TEŞEKKÜR

Çalışmam süresince bana yol gösteren ve değerli bilgilerinden faydalandığım Yrd. Doç. Dr. Selim Altun'a, yardımları için Araştırma Görevlileri Alper Sezer, Pelin Akkık ve Tuğba Eskişar'a; bana her zaman destek olan İnş. Müh. Fırat Bağcı ve Damla Karadeniz'e ve aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	V
ABSTRACT.....	VII
TEŞEKKÜR.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XIII
SİMGELER DİZİNİ.....	XXV
KISALTMALAR DİZİNİ.....	XXVII
1. GİRİŞ	I
2. UÇUCU KÜLLER VE GENEL ÖZELLİKLERİ.....	3
2.1 Uçucu Külün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	4
2.2. Uçucu Külün Sınıflandırılması	7
3. UÇUCU KÜLLERİN GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE KULLANIMI	8
4. DENEYLERDE KULLANILAN MALZEMELER	11
4.1 Zemin	11
4.2 Uçucu kül	13
4.3 Çimento	13
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	15
5.1 Amaç	15

İÇİNDEKİLER

Sayfa

5.2 Kapsam	15
5.3 Kıvam Limitleri (Atterberg Limitleri)	16
5.4 Standart Proktor Deneyi.....	22
5.5 Serbest Basınç Deneyi	27
5.6 Donma – Çözülme Deneyi.....	44
 6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	 66
 KAYNAKLAR	 68
 EKLER.....	 74
 ÖZGEÇMİŞ	 105

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil

Sayfa

ŞEKİL 2. 1 UÇUCU KÜL DANELERİ 2000 KAT BÜYÜTÜLMÜŞ HALİYLE 3

ŞEKİL 4. 1 KULLANILAN ZEMİNİN DANE BOYU DAĞILIMININ DEĞİŞİMİ
.....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

ŞEKİL 5. 1 LİKİT LİMİT DENEY ALETİ 17

ŞEKİL 5. 2 TÜM ZEMİN NUMUNELERİNİN LİKİT LİMİT DEĞERLERİ **HATA!
YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

ŞEKİL 5. 3 TÜM ZEMİN NUMUNELERİNİN PLASTİK LİMİT DEĞERLERİ . **HATA!
YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

ŞEKİL 5. 4 TÜM ZEMİN NUMUNELERİNİN PLASTİSİTE İNDİSİ DEĞERLERİ
.....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

ŞEKİL 5. 5 STANDART PROKTOR DENEYİ UYGULAMASI 22

ŞEKİL 5. 6 TÜM ZEMİNLERİN MAKSİMUM KURU BİRİM HACİM AĞIRLIKLARI
.....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

ŞEKİL 5. 7 TÜM ZEMİNLERİN OPTİMUM SU MUHTEVALARI..... **HATA! YER
İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

ŞEKİL 5. 8 SERBEST BASINÇ DENEYİ ALETİ 28

ŞEKİL 5. 9 DOĞAL ZEMİN VE SADECE UÇUCU KÜL KATKILI ZEMİNLERİN
ARTAN KÜR SÜRESİYLE SERBEST BASINÇ DAYANIMLARININ DEĞİŞİMİ
..... 33

ŞEKİL 5. 10 DOĞAL ZEMİN VE SADECE ÇİMENTO KATKILI ZEMİNLERİN
ARTAN KÜR SÜRESİYLE SERBEST BASINÇ DAYANIMLARININ DEĞİŞİMİ
..... 34

ŞEKİL 5. 11 DOĞAL ZEMİN İLE %2 SABİT ÇİMENTO ORANINA UÇUCU KÜL İLAVE EDİLEN ZEMİNLERİN ARTAN KÜR SÜRESİYLE SERBEST BASINÇ DAYANIMLARININ DEĞİŞİMİ	34
---	----

ŞEKİLLER DİZİNİ (DEVAM)

Şekil

Sayfa

ŞEKİL 5. 12 DOĞAL ZEMİN İLE %5 SABİT ÇİMENTO ORANINA UÇUCU KÜL İLAVE EDİLEN ZEMİNLERİN ARTAN KÜR SÜRESİYLE SERBEST BASINÇ DAYANIMLARININ DEĞİŞİMİ	35
ŞEKİL 5. 13 DOĞAL ZEMİN İLE %8 SABİT ÇİMENTO ORANINA UÇUCU KÜL İLAVE EDİLEN ZEMİNLERİN ARTAN KÜR SÜRESİYLE SERBEST BASINÇ DAYANIMLARININ DEĞİŞİMİ	35
ŞEKİL 5. 14 1 GÜN KÜRE BIRAKILMIŞ NUMUNELERDE SABİT ORANDA ÇİMENTOYA UÇUCU KÜL EKLENDİKÇE SERBEST BASINÇ DAYANIMINDA GÖRÜLEN DEĞİŞİM.....	37
ŞEKİL 5. 15 1 GÜN KÜRE BIRAKILMIŞ NUMUNELERDE SABİT ORANDA UÇUCU KÜLE ÇİMENTO EKLENDİKÇE SERBEST BASINÇ DAYANIMINDA GÖRÜLEN DEĞİŞİM.....	38
ŞEKİL 5. 16 7 GÜN KÜRE BIRAKILMIŞ NUMUNELERDE SABİT ORANDA ÇİMENTOYA UÇUCU KÜL EKLENDİKÇE SERBEST BASINÇ DAYANIMINDA GÖRÜLEN DEĞİŞİM.....	38
ŞEKİL 5. 17 7 GÜN KÜRE BIRAKILMIŞ NUMUNELERDE SABİT ORANDA UÇUCU KÜLE ÇİMENTO EKLENDİKÇE SERBEST BASINÇ DAYANIMINDA GÖRÜLEN DEĞİŞİM.....	39
ŞEKİL 5. 18 28 GÜN KÜRE BIRAKILMIŞ NUMUNELERDE SABİT ORANDA ÇİMENTOYA UÇUCU KÜL EKLENDİKÇE SERBEST BASINÇ DAYANIMINDA GÖRÜLEN DEĞİŞİM.....	39
ŞEKİL 5. 19 28 GÜN KÜRE BIRAKILMIŞ NUMUNELERDE SABİT ORANDA UÇUCU KÜLE ÇİMENTO EKLENDİKÇE SERBEST BASINÇ DAYANIMINDA GÖRÜLEN DEĞİŞİM.....	40

ŞEKİLLER DİZİNİ (DEVAM)

Sekil

Sayfa

ŞEKİL 5. 20 TÜM ZEMİNLERİN KÜR SÜRELERİNE GÖRE DAYANIMLARININ DEĞİŞİMİ **HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

ŞEKİL 5. 21 TÜM NUMUNELERİN KÜR SÜRELERİNE GÖRE REZİDÜEL GERİLMELERİNİN DEĞİŞİMİ.... **HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

ŞEKİL 5. 22 BİRİNCİ GRUP ZEMİN KARIŞIMLARININ ARTAN ÇEVİRİM SAYISIYLA SERBEST BASINÇ DAYANIMLARININ DEĞİŞİMİ 49

ŞEKİL 5. 23 1 DONMA-ÇÖZÜLME ÇEVİRİMİNE BIRAKILAN BİRİNCİ GRUP NUMUNELERDE SABİT ORANDA ÇİMENTOYA UÇUCU KÜL EKLENDİKÇE SERBEST BASINÇ DAYANIMINDA GÖRÜLEN DEĞİŞİM.....50

ŞEKİL 5. 24 1 DONMA-ÇÖZÜLME ÇEVİRİMİNE BIRAKILAN BİRİNCİ GRUP NUMUNELERDE SABİT ORANDA UÇUCU KÜLE ÇİMENTO EKLENDİKÇE SERBEST BASINÇ DAYANIMINDA GÖRÜLEN DEĞİŞİM.....51

ŞEKİL 5. 25 3 DONMA-ÇÖZÜLME ÇEVİRİMİNE BIRAKILAN BİRİNCİ GRUP NUMUNELERDE SABİT ORANDA ÇİMENTOYA UÇUCU KÜL EKLENDİKÇE SERBEST BASINÇ DAYANIMINDA GÖRÜLEN DEĞİŞİM.....51

ŞEKİL 5. 26 3 DONMA-ÇÖZÜLME ÇEVİRİMİNE BIRAKILAN BİRİNCİ GRUP NUMUNELERDE SABİT ORANDA UÇUCU KÜLE ÇİMENTO EKLENDİKÇE SERBEST BASINÇ DAYANIMINDA GÖRÜLEN DEĞİŞİM.....52

ŞEKİL 5. 27 7 DONMA-ÇÖZÜLME ÇEVİRİMİNE BIRAKILAN BİRİNCİ GRUP NUMUNELERDE SABİT ORANDA ÇİMENTOYA UÇUCU KÜL EKLENDİKÇE SERBEST BASINÇ DAYANIMINDA GÖRÜLEN DEĞİŞİM.....52

ŞEKİL 5. 28 7 DONMA-ÇÖZÜLME ÇEVİRİMİNE BIRAKILAN BİRİNCİ GRUP NUMUNELERDE SABİT ORANDA UÇUCU KÜLE ÇİMENTO EKLENDİKÇE SERBEST BASINÇ DAYANIMINDA GÖRÜLEN DEĞİŞİM.....53

ŞEKİLLER DİZİNİ (DEVAM)

Sekil

Sayfa

ŞEKİL 5. 29 DONMA-ÇÖZÜLMEME 1-3 VE 7 ÇEVİRİMLE MARUZ BIRAKILAN 1. GRUP NUMULER İLE BU ETKİYE BIRAKILMAYAN NUMUNELERİN SERBEST BASINÇ DAYANIMLARININ KIYASLANMASI..... **HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

ŞEKİL 5. 30 DONMA-ÇÖZÜLMEME 1-3 VE 7 ÇEVİRİMLE MARUZ BIRAKILAN 1. GRUP NUMULER İLE BU ETKİYE BIRAKILMAYAN NUMUNELERİN REZİDÜEL GERİLMELERİNİN KIYASLANMASI..... **HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

ŞEKİL 5. 31 İKİNCİ GRUP ZEMİN KARIŞIMLARININ ARTAN ÇEVİRİM SAYISIYLA SERBEST BASINÇ DAYANIMLARININ DEĞİŞİMİ 58

ŞEKİL 5. 32 1 DONMA-ÇÖZÜLMEME ÇEVİRİMİNE BIRAKILAN İKİNCİ GRUP NUMUNELERDE SABİT ORANDA ÇİMENTOYA UÇUCU KÜL EKLENDİKÇE SERBEST BASINÇ DAYANIMINDA GÖRÜLEN DEĞİŞİM..... 60

ŞEKİL 5. 33 1 DONMA-ÇÖZÜLMEME ÇEVİRİMİNE BIRAKILAN İKİNCİ GRUP NUMUNELERDE SABİT ORANDA UÇUCU KÜLE ÇİMENTO EKLENDİKÇE SERBEST BASINÇ DAYANIMINDA GÖRÜLEN DEĞİŞİM..... 60

ŞEKİL 5. 34 3 DONMA-ÇÖZÜLMEME ÇEVİRİMİNE BIRAKILAN İKİNCİ GRUP NUMUNELERDE SABİT ORANDA ÇİMENTOYA UÇUCU KÜL EKLENDİKÇE SERBEST BASINÇ DAYANIMINDA GÖRÜLEN DEĞİŞİM..... 61

ŞEKİL 5. 35 3 DONMA-ÇÖZÜLMEME ÇEVİRİMİNE BIRAKILAN İKİNCİ GRUP NUMUNELERDE SABİT ORANDA UÇUCU KÜLE ÇİMENTO EKLENDİKÇE SERBEST BASINÇ DAYANIMINDA GÖRÜLEN DEĞİŞİM..... 61

ŞEKİL 5. 36 7 DONMA-ÇÖZÜLMEME ÇEVİRİMİNE BIRAKILAN İKİNCİ GRUP NUMUNELERDE SABİT ORANDA ÇİMENTOYA UÇUCU KÜL EKLENDİKÇE SERBEST BASINÇ DAYANIMINDA GÖRÜLEN DEĞİŞİM..... 62

ŞEKİLLER DİZİNİ (DEVAM)

Şekil

Sayfa

ŞEKİL 5. 37 7 DONMA-ÇÖZÜLME ÇEVİRİMİNE BIRAKILAN İKİNCİ GRUP NUMUNELERDE SABİT ORANDA UÇUCU KÜLE ÇİMENTO EKLENDİKÇE SERBEST BASINÇ DAYANIMINDA GÖRÜLEN DEĞİŞİM.....	62
ŞEKİL 5. 38 DONMA-ÇÖZÜLMEYE 1-3 VE 7 ÇEVİRİMLE MARUZ BIRAKILAN 2. GRUP NUMUNELER İLE BU ETKİYE BIRAKILMAYAN NUMUNELERİN EKSENEL GERİLMELERİNİN KIYASLANMASI HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.	
ŞEKİL 5. 39 DONMA-ÇÖZÜLMEYE 1-3 VE 7 ÇEVİRİMLE MARUZ BIRAKILAN 2. GRUP NUMUNELER İLE BU ETKİYE BIRAKILMAYAN NUMUNELERİN REZİDÜEL GERİLMELERİNİN KIYASLANMASI..... HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.	
ŞEKİL A. 1 DOĞAL ZEMİNİN STANDART PROKTOR EĞRİSİ.....	74
ŞEKİL A. 2 10UK NUMUNESİNİN STANDART PROKTOR EĞRİSİ.....	74
ŞEKİL A. 3 10UK2C NUMUNESİNİN STANDART PROKTOR EĞRİSİ.....	75
ŞEKİL A. 4 10UK5C NUMUNESİNİN STANDART PROKTOR EĞRİSİ.....	75
ŞEKİL A. 5 10UK8C NUMUNESİNİN STANDART PROKTOR EĞRİSİ.....	76
ŞEKİL A. 6 20UK NUMUNESİNİN STANDART PROKTOR EĞRİSİ.....	76
ŞEKİL A. 7 20UK2C NUMUNESİNİN STANDART PROKTOR EĞRİSİ.....	77
ŞEKİL A. 8 20UK5C NUMUNESİNİN STANDART KOMPAKSİYON EĞRİSİ	77

ŞEKİLLER DİZİNİ (DEVAM)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
ŞEKİL A. 9 20UK8C NUMUNESİNİN STANDART PROKTOR EĞRİSİ	78
ŞEKİL A. 10 30UK NUMUNESİNİN STANDART PROKTOR EĞRİSİ	78
ŞEKİL A. 11 30UK2C NUMUNESİNİN STANDART PROKTOR EĞRİSİ	79
ŞEKİL A. 12 30UK5C NUMUNESİNİN STANDART PROKTOR EĞRİSİ	79
ŞEKİL A. 13 30UK8C NUMUNESİNİN STANDART PROKTOR EĞRİSİ	80
ŞEKİL A. 14 2C NUMUNESİNİN STANDART PROKTOR EĞRİSİ	80
ŞEKİL A. 15 5C NUMUNESİNİN STANDART PROKTOR EĞRİSİ	81
ŞEKİL A. 16 8C NUMUNESİNİN STANDART PROKTOR EĞRİSİ	81
ŞEKİL B. 1 DOĞAL ZEMİN, 2C, 5C VE 8C NUMUNELERİNİN 1 GÜNLÜK KÜR SÜRESİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ	82
ŞEKİL B. 2 DOĞAL ZEMİN, 10UK, 20UK VE 30UK NUMUNELERİNİN 1 GÜNLÜK KÜR SÜRESİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ ...	82
ŞEKİL B. 3 DOĞAL ZEMİN, 10UK2C, 20UK2C VE 30UK2C NUMUNELERİNİN 1 GÜNLÜK KÜR SÜRESİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ	83

ŞEKİLLER DİZİNİ (DEVAM)

ŞEKİL B. 4 DOĞAL ZEMİN, 10UK5C, 20UK5C ve 30UK5C KATKILI ZEMİN ÖRNEKLERİNİN 1 GÜNLÜK KÜR SÜRESİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ.....	83
ŞEKİL B. 5 DOĞAL ZEMİN, 10UK8C, 20UK8C ve 30UK8C NUMUNELERİNİN 1 GÜNLÜK KÜR SÜRESİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ.....	84
ŞEKİL B. 6 DOĞAL ZEMİN, 2C, 5C ve 8C NUMUNELERİNİN 7 GÜNLÜK KÜR SÜRESİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ.....	84
ŞEKİL B. 7 DOĞAL ZEMİN, 10UK, 20UK ve 30UK NUMUNELERİNİN 7 GÜNLÜK KÜR SÜRESİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ	85
ŞEKİL B. 8 DOĞAL ZEMİN, 10UK2C, 20UK2C ve 30UK2C NUMUNELERİNİN 7 GÜNLÜK KÜR SÜRESİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ.....	85
ŞEKİL B. 9 DOĞAL ZEMİN, 10UK5C, 20UK5C ve 30UK5C NUMUNELERİNİN 7 GÜNLÜK KÜR SÜRESİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ.....	86
ŞEKİL B. 10 DOĞAL ZEMİN, 10UK8C, 20UK8C ve 30UK8C NUMUNELERİNİN 7 GÜNLÜK KÜR SÜRESİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ.....	86
ŞEKİL B. 11 DOĞAL ZEMİN, 2C, 5C ve 8C NUMUNELERİNİN 28 GÜNLÜK KÜR SÜRESİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ	87
ŞEKİL B. 12 DOĞAL ZEMİN, 10UK, 20UK ve 30UK NUMUNELERİNİN 28 GÜNLÜK KÜR SÜRESİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ	87

ŞEKİLLER DİZİNİ (DEVAM)SekilSayfa

ŞEKİL B. 13 DOĞAL ZEMİN, 10UK2C, 20UK2C VE 30UK2C NUMUNELERİNİN 28 GÜNLÜK KÜR SÜRESİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ	88
ŞEKİL B. 14 DOĞAL ZEMİN, 10UK5C, 20UK5C VE 30UK5C NUMUNELERİNİN 28 GÜNLÜK KÜR SÜRESİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ	88
ŞEKİL B. 15 DOĞAL ZEMİN, 10UK8C, 20UK8C VE 30UK8C NUMUNELERİNİN 28 GÜNLÜK KÜR SÜRESİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ	89
ŞEKİL B. 16 DOĞAL ZEMİN NUMUNESİNİN 1 GÜN, 7 GÜN VE 28 GÜN KÜR SÜRELERİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ.....	89
ŞEKİL B. 17 2C NUMUNESİNİN 1 GÜN, 7 GÜN VE 28 GÜN KÜR SÜRELERİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ	90
ŞEKİL B. 18 5C NUMUNESİNİN 1 GÜN, 7 GÜN VE 28 GÜN KÜR SÜRELERİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ	90
ŞEKİL B. 19 8C NUMUNESİNİN 1 GÜN, 7 GÜN VE 28 GÜN KÜR SÜRELERİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ	91
ŞEKİL B. 20 10UK NUMUNESİNİN 1 GÜN, 7 GÜN VE 28 GÜN KÜR SÜRELERİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ.....	91
ŞEKİL B. 21 20UK NUMUNESİNİN 1 GÜN, 7 GÜN VE 28 GÜN KÜR SÜRELERİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ.....	92
ŞEKİL B. 22 30UK NUMUNESİNİN 1 GÜN, 7 GÜN VE 28 GÜN KÜR SÜRELERİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ.....	92

ŞEKİLLER DİZİNİ (DEVAM)SekilSayfa

ŞEKİL B. 23 10UK2C NUMUNESİNİN 1 GÜN, 7 GÜN VE 28 GÜN KÜR SÜRELERİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ.....	93
ŞEKİL B. 24 10UK5C NUMUNESİNİN 1 GÜN, 7 GÜN VE 28 GÜN KÜR SÜRELERİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ.....	93
ŞEKİL B. 25 10UK8C NUMUNESİNİN 1 GÜN, 7 GÜN VE 28 GÜN KÜR SÜRELERİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ.....	94
ŞEKİL B. 26 20UK2C NUMUNESİNİN 1 GÜN, 7 GÜN VE 28 GÜN KÜR SÜRELERİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ.....	94
ŞEKİL B. 27 20UK5C NUMUNESİNİN 1 GÜN, 7 GÜN VE 28 GÜN KÜR SÜRELERİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ.....	95
ŞEKİL B. 28 20UK8C NUMUNESİNİN 1 GÜN, 7 GÜN VE 28 GÜN KÜR SÜRELERİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ.....	95
ŞEKİL B. 29 30UK2C NUMUNESİNİN 1 GÜN, 7 GÜN VE 28 GÜN KÜR SÜRELERİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ.....	96
ŞEKİL B. 30 30UK5C NUMUNESİNİN 1 GÜN, 7 GÜN VE 28 GÜN KÜR SÜRELERİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ.....	96
ŞEKİL B. 31 30UK8C NUMUNESİNİN 1 GÜN, 7 GÜN VE 28 GÜN KÜR SÜRELERİNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ	97
ŞEKİL C. 1 1 ÇEVİRİMLİK DONMA-ÇÖZÜLMEME BIRAKILAN BİRİNCİ GRUP NUMUNELERİN EKSENEL GERİLME-BİRİM DEFORMASYON EĞRİLERİ..	98
ŞEKİL C. 2 3 ÇEVİRİMLİK DONMA-ÇÖZÜLMEME BIRAKILAN BİRİNCİ GRUP NUMUNELERİN EKSENEL GERİLME-BİRİM DEFORMASYON EĞRİLERİ..	98

ŞEKİLLER DİZİNİ (DEVAM)SekilSayfa

ŞEKİL C. 3 7 ÇEVİRİMLİK DONMA-ÇÖZÜLMEMEYE BIRAKILAN BİRİNCİ GRUP NUMUNELERİN EKSENEL GERİLME-BİRİM DEFORMASYON EĞRİLERİ .	99
ŞEKİL C. 4 1 ÇEVİRİMLİK DONMA-ÇÖZÜLMEMEYE BIRAKILAN İKİNCİ GRUP NUMUNELERİN EKSENEL GERİLME-BİRİM DEFORMASYON EĞRİLERİ .	99
ŞEKİL C. 5 3 ÇEVİRİMLİK DONMA-ÇÖZÜLMEMEYE BIRAKILAN İKİNCİ GRUP NUMUNELERİN EKSENEL GERİLME-BİRİM DEFORMASYON EĞRİLERİ	100
ŞEKİL C. 6 7 ÇEVİRİMLİK DONMA-ÇÖZÜLMEMEYE BIRAKILAN İKİNCİ GRUP NUMUNELERİN EKSENEL GERİLME-BİRİM DEFORMASYON EĞRİLERİ	100
ŞEKİL C. 7 DOĞAL ZEMİN NUMUNESİNİN ÇEVİRİM SAYILARINA GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ	101
ŞEKİL C. 8 2C NUMUNESİNİN ÇEVİRİM SAYILARINA GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ	101
ŞEKİL C. 9 10UK NUMUNESİNİN ÇEVİRİM SAYILARINA GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ.....	102
ŞEKİL C. 10 30UK NUMUNESİNİN ÇEVİRİM SAYILARINA GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ.....	102
ŞEKİL C. 11 10UK2C NUMUNESİNİN ÇEVİRİM SAYILARINA GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ.....	103
ŞEKİL C. 12 10UK8C NUMUNESİNİN ÇEVİRİM SAYILARINA GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ.....	103
ŞEKİL C. 13 30UK2C NUMUNESİNİN ÇEVİRİM SAYILARINA GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETLERİ.....	104

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
TABLO 2. 1 UÇUCU KÜLÜN KİMYASAL KOMPOZİSYONU	5
TABLO 4. 1 SOMA UÇUCU KÜLÜNÜN KİMYASAL ÖZELLİKLERİ	14
TABLO 5. 1 SİMGELENDİRİLMİŞ ZEMİN KARIŞIMLARININ AÇILIMLARI	16
TABLO 5. 2 ATTERBERG LİMİTLERİ SONUÇLARI	18
TABLO 5. 3 TÜM NUMUNELERİN KOMPAKSİYON DEĞERLERİ	24
TABLO 5. 4 1 GÜN KÜRE BIRAKILMIŞ TÜM NUMUNELERİN SERBEST BASINÇ DAYANIM VE REZİDÜEL GERİLME DEĞERLERİ.....	29
TABLO 5. 5 7 GÜN KÜRE BIRAKILMIŞ TÜM NUMUNELERİN SERBEST BASINÇ DAYANIM VE REZİDÜEL GERİLME DEĞERLERİ.....	30
TABLO 5. 6 28 GÜN KÜRE BIRAKILMIŞ TÜM NUMUNELERİN SERBEST BASINÇ DAYANIM VE REZİDÜEL GERİLME DEĞERLERİ.....	31
TABLO 5. 7 1 ÇEVİRİMLİK DONMA-ÇÖZÜLMEME BIRAKILMIŞ BİRİNCİ GRUP NUMUNELERİN SERBEST BASINÇ DAYANIM VE REZİDÜEL GERİLME DEĞERLERİ	46
TABLO 5. 8 3 ÇEVİRİMLİK DONMA-ÇÖZÜLMEME BIRAKILMIŞ BİRİNCİ GRUP NUMUNELERİN SERBEST BASINÇ DAYANIM VE REZİDÜEL GERİLME DEĞERLERİ	46
TABLO 5. 9 7 ÇEVİRİMLİK DONMA-ÇÖZÜLMEME BIRAKILMIŞ BİRİNCİ GRUP NUMUNELERİN SERBEST BASINÇ DAYANIM VE REZİDÜEL GERİLME DEĞERLERİ	47
TABLO 5. 10 DONMA-ÇÖZÜLME ÇEVİRİMLERİ SONRASI BİRİNCİ GRUP NUMUNELERİN SU MUHTEVALARI	47

TABLOLAR DİZİNİ (DEVAM)

Çizelge

Sayfa

TABLO 5. 11 1 DONMA-ÇÖZÜLME ÇEVİRİMİNE BIRAKILMIŞ İKİNCİ GRUP NUMUNELERİN SERBEST BASINÇ DAYANIM VE REZİDÜEL GERİLME DEĞERLERİ	56
TABLO 5. 12 3 DONMA-ÇÖZÜLME ÇEVİRİMİNE BIRAKILMIŞ İKİNCİ GUP NUMUNELERİN SERBEST BASINÇ DAYANIM VE REZİDÜEL GERİLME DEĞERLERİ	56
TABLO 5. 13 7 DONMA-ÇÖZÜLME ÇEVİRİMİNE BIRAKILMIŞ İKİNCİ GRUP NUMUNELERİN SERBEST BASINÇ DAYANIM VE REZİDÜEL GERİLME DEĞERLERİ	57
TABLO 5. 14 DONMA-ÇÖZÜLME ÇEVİRİMLERİ SONRASI İKİNCİ GRUP NUMUNELERİN SU MUHTEVALARI.....	57

SİMGELER DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
I_p	Plastisite İndisi
LL	Likit Limit
PL	Plastik Limit
N	Düşüş Sayısı
ω	Su Muhtevası
ω_{opt}	Optimum Su Muhtevası
γ	Doğal Birim Hacim Ağırlık
γ_k	Kuru Birim Hacim Ağırlık
q_u	Serbest Basınç Dayanımı
ε	Birim Deformasyon
G_s	Özgül Ağırlık

SİMGELER DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
C_u	Üniformluk Katsayısı
C_c	Eğrilik Katsayısı

KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
UK	Uçucu Kül
C	Çimento
ASTM	American Standart Test Methods
TS	Türk Standartları
ASSHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
USCS	Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi

1. GİRİŞ

Ülkemizde zamanla giderek artan enerji ihtiyacını karşılayabilmek için yeni enerji kaynakları araştırılmaktadır. Hidroelektrik santrallerinin yapım maliyetinin yüksek olması ve inşaa süresinin uzun olması nedeniyle son dönemde yeterli linyit ve kömür rezervlerine sahip olmamızın da getirdiği avantajla termik santrallerin yapımına öncelik verilmiştir. Elektrik enerjisi üreten termik santrallerde yakıt olarak kömür ve linyit kullanılırken büyük miktarda atık madde açığa çıkmaktadır. Bu atık maddeler taban külü, cüruf ve büyük oranda uçucu küldür.

Uçucu kül en bol bulunan ve en çok yönlü endüstriyel yan ürünlerden birisi olup, elektrofiltre ve siklonlar tarafından tutulan % 70-80'i 200 No'lu elekten geçen silt boyutunda malzemedir. Ülkemizdeki termik santrallerde yılda 55 milyon ton kömürün yakılmasıyla yaklaşık 13 milyon ton uçucu kül açığa çıkmaktadır. Bu atık malzemelerin dışarı atılıp çevre kirliliğine yol açmamaları için boş arazilerde toplanma gereksinimleri doğmaktadır. Ekonomik olarak yük getiren bu seçenek, külün başka alanlarda değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucu uçucu küllerin fiziksel ve kimyasal özellikleri incelendiğinde inşaat endüstrisinde kullanımının teknik ve ekonomik yönden faydaları olacağı görülmektedir. Ferguson (1993), linyitin yakılmasıyla ortaya çıkan C sınıfı uçucu külün kendinden çimentolaşma özelliğine sahip olup 20 yıldan fazla süredir zeminlerin mekanik özelliklerini iyileştirmede kullanıldığını belirtmiştir.

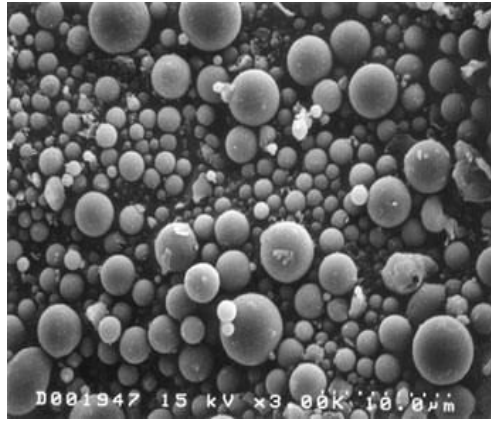
Uçucu külün geoteknik uygulamalarında kullanımı; çimento tüketiminden tasarruf sağlaması, enerji kullanımını azaltması, doğal kaynakların korunmasını sağlaması ve çevre kirliliğini önlemesi gibi faydalar sağlayacaktır.

Bu çalışmada, Soma termik santralinin ürünü olan uçucu külün, bir çeşit portland çimentosunun ve bunların değişik oranlardaki kompozisyonunun silt zeminin dayanımına etkisi bir deneysel çalışma dahilinde araştırılmıştır. Ayrıca uçucu kül ve çimentonun silt zemine belli oranlarda ilave edilmesiyle donma-çözülme etkisine direncinin ne yönde değiştiği deneysel olarak incelenmiştir. En ekonomik ve dayanımlı zemin karışımını tespit edebilmek için elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Çalışmanın birinci bölümünde gerçekleştirilen çalışmanın amacı ve kapsamından kısaca bahsedildikten sonra ikinci bölümde uçucu küller ve genel özelliklerinden bahsedilmiştir. Burada uçucu külün nasıl bir malzeme olduğu, fiziksel-kimyasal özellikleri ve sınıflandırılmaları yer almaktadır. Üçüncü bölümde geçmiş yıllarda konu ile ilgili yapılmış çalışmalardan bahsedilerek uçucu külün zemine etkileri araştırılmıştır. Dördüncü bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan zemin, uçucu kül ve çimento tanıtılmıştır. Beşinci bölümde deneysel çalışmalar ve sonuçları yorumları ile yer almaktadır. Bu kapsamda Atterberg limit deneyleri, standart poktor deneyleri, serbest basınç deneyleri ve donma-çözülme deneyleri sonuçları ile birlikte incelenmiştir. Altıncı bölümde ise genel olarak bu çalışmaların sonuçları ile bu sonuçlara getirilebilecek öneriler yer almaktadır.

2. UÇUCU KÜLLER VE GENEL ÖZELLİKLERİ

Kömür kullanılan termik santrallerde pulverize kömürün buhar üretici kazanlarını ısıtmak üzere yakılmasıyla ortaya çıkan küllerin kaba olan kısmı kazan tabanına düşerken, ince olan kısmı gazlarla birlikte uçarak atmosfere çıkmak üzere hareket etmekte ve elektrofiltreler yardımıyla tutularak bacadan çıkışı önlenmektedir. Yere düşen malzemeye taban külü, filtrelerde tutulan silt boyutlu malzemeye ise uçucu kül denilmektedir (ASTM C618).



Şekil 2. 1 Uçucu kül daneleri 2000 kat büyütülmüş haliyle (American Coal Ash Association)

Türkiye’de günümüzde 15 adet termik santral faaliyet göstermekte olup bunların çoğu linyit kömürü ile çalışmaktadır. 1998 yılı verilerine göre ülkemizde elektrik enerjisinin yaklaşık yarısının üretildiği termik santrallerde yılda 55 milyon ton linyit kömürü yakılarak 13 milyon ton uçucu kül ortaya çıkmaktadır (Tokyay ve Erdoğan, 1998). Gelişmiş ülkelerde atık olarak bulunan uçucu küller büyük oranlarda değerlendirilirken ülkemizde bu oran 1990 yılı verilerine göre ancak % 1’de kalmaktadır (Çakır, 1999).

Uçucu kül hafif dolgu malzemesi olup geoteknik uygulaması olarak yumuşak zeminler üzerinde hafif dolgular oluşturarak taşıma gücü problemlerini çözmekte, kayma potansiyeli yüksek şevlerde dolgu oluşturmakta, istinat yapılarına gelen itkileri azaltmaktadır (Aksoy vd.,

2000). Ayrıca çimento yerine, çimentonun hammaddesi olarak, tuğla, beton, yalıtım malzemesi üretiminde, barajlarda ve yol alt temel tabakaları gibi inşaat endüstrisinin birçok dalında kullanım olanağına sahiptir (Erdoğan, 2003). İnşaat sektörü dışında kimya, seramik, cam, buzlanmanın önlenmesi, tarım sektöründe zemin ıslahı gibi kullanım alanlarına sahiptir.

Uçucu kül 1950'lerden itibaren zemin stabilizasyon malzemesi olarak kullanılmış, bu da daha ziyade F sınıfı uçucu külün kireç ve zemin ile karıştırılması yoluyla olmuştur (Terrel vd. 1976). Kendinden çimentolanan C sınıfı uçucu kül yaygınlaştığından beri şişme potansiyeli, plastisite karakteristikleri ve zayıf zeminlerin dayanıklılığı gibi mühendislik özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılmaktadır (Ferguson and Levenson 1999, Çokça 2001, Misra 1998, Nalbantoğlu ve Güçbilmez 2002, Şenol vd. 2002, Zia and Fox 2000).

Kendinden çimentolanan uçucu kül katkılı zeminin dayanımı genellikle serbest basınç dayanımı ve CBR deneyleriyle tespit edilmektedir (Ferguson and Levenson 1999).

Türk Standartları Enstitüsü'nün uçucu küller ile ilgili olarak hazırlamış olduğu iki standart mevcuttur. TS 639 uçucu küllerin tanımı, özellikleri, sınıflandırılması, deney yöntemleri ve kalite kontrollerinden bahsederken TS 640 uçucu küllü çimentoların fiziksel, kimyasal, mekanik özellikleri ile deney yöntemlerinden bahsetmektedir.

2.1 Uçucu Külün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Uçucu küllerin kimyasal özelliklerini belirlemek için kimyasal analiz; fiziksel özelliklerini belirlemek için sıkışık-gevşek birim hacim ağırlık, spesifik yüzey, özgül ağırlık, dane büyüklüğü dağılımı; stabilite özelliklerinin belirlenmesi içinse serbest basınç, üç eksenli basınç gibi dayanım deneyleri kullanılır (Atanur, 1972).

Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkileyen faktörler şöyle sıralanabilir: kömür çeşidi ve saflığı, yanma sistemi, öğütülme inceliği ile toplama ve depolama metotları (Atanur, 1972).

Uçucu kül daneleri camsı küre şeklinde olup kristalin ve kömürlü malzemeler içermektedir (Barnes 1997). Uçucu kül; silikon, alüminyum ve demir oksit bileşenlerinden oluşan küresel camsı daneli ince toz malzeme olarak tanımlanmaktadır. Bünyesinde kızdırma kaybı olarak da

bilinen yanmamış kömür artığı ve diğer minerallerden oluşan az miktarda biçimsiz şekilli daneler de mevcuttur. Uçucu külün kimyasal kompozisyonu Tablo 2.1’de yer almaktadır. Selvig ve Gibson (1956) ile Abernethy vd. (1969)’ye göre uçucu külün ana bileşenleri silisyum oksit (SiO_2), demir oksit (Fe_2O_3) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) olup daha az miktarda kalsiyum oksit (CaO), potasyum oksit (K_2O), sodyum oksit (Na_2O), magnezyum oksit (MgO), titanyum oksit (TiO_2), fosfor pentoksit (P_2O_5) ve sülfür trioksit (SO_3) içermektedir.

Tablo 2. 1 Uçucu külün kimyasal kompozisyonu

Kimyasal Kompozisyon	Uçucu Kül (%)
Alüminyum oksit (Al_2O_3)	20-40
Demir oksit (Fe_2O_3)	4-24
Kalsiyum oksit (CaO)	2-27
Magnezyum oksit (MgO)	1-6
Silisyum oksit (SiO_2)	34-58
Sülfat (SO_3)	0.5-4

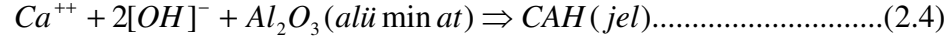
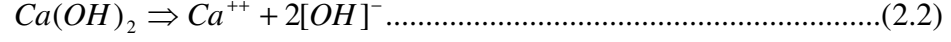
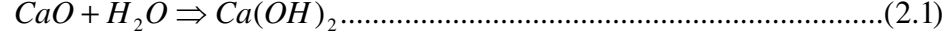
Uçucu küller silis, alümin mineralleri içermeleri ve ince olmaları sayesinde puzolanik aktiviteye sahiptirler. Puzolanik aktivite, silika ve alüminat miktarına, bünyesinde su ve serbest kirecin varlığına, uçucu külün inceliğine bağlıdır. Uçucu kül zemine ilave edildiğinde bünyesindeki kalsiyum oksit, silikat ve alüminatın hidratasyona uğramasıyla kuvvetli bağlar oluşturarak zemin danelerini bir arada tutmaktadırlar (Çokça ve İpek, 1998).

Kirecin puzolanlarla (Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3) suyun varlığında reaksiyona girerek çimentolu malzemeler oluşturması, uçucu külün hidratasyonu olarak bilinmektedir. Formül 2.1-4’te görüldüğü gibi hidratlanmış kalsiyum silikat jel veya kalsiyum alüminat jel (çimentolu malzeme) bağlayıcı özellikleri ile malzemeleri bir arada tutabilmektedirler (Şenol vd., 2003). Uçucu kül aynı zamanda çimentonun hidratasyonunu geciktiren bir işleve sahiptir.

Uçucu küllerin bünyesindeki silis malzemeler çimentonun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan Ca(OH) ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) açığa çıkartmaktadır. Açığa çıkan bu

mineraller zeminin dayanımının artışıını sağlamaktadırlar (Temiz, Karakeçi, 2002).

Zemin stabilizasyonu için puzolanik reaksiyonlar aşağıdaki şekilde formülize edilmişlerdir (TRB, 1987).



Fiziksel özellikleri kapsamında rengi genellikle gri olup içinde yanmamış karbon miktarı fazla olduğunda daha koyu renkte, kireç muhtevası yüksek olduğunda daha açık renkte olmaktadır. İnce daneli ve dokunulduğunda yumuşak bir malzeme olup mikroskopta incelendiğinde süngerimsi boşluklu ve boşluksuz küresel danelerden oluştuğu görülmektedir (Erşan, 1996).

Uçucu kül daneleri küre şeklinde olup çapları 1 ile 150 µm arasında değişmektedir. Silt boyutunda olan uçucu küller tipik olarak portland çimentosu ve kireçten daha ince bir malzeme olarak bulunmaktadır (American Coal Ash Association, 2003). Uçucu külün inceliğinin en güvenilir ölçümü elekte tutulan veya elekten geçen miktarla yapılabilmektedir. ASTM C618'e göre incelik, ağırlıkça % 34'den fazla olmamak üzere 325 No'lu (45 mm) elekte tutulan miktar olarak tanımlanmaktadır. Bu incelik puzolanik reaktiviteye katkıda bulunan önemli özelliklerden birisidir. Bacadan toz olarak kaçan miktar azaldıkça incelik artmaktadır. Elektrofiltrelerde tutulan uçucu küller siklonlarda tutulanlara göre daha ince danelidir. Küllerin inceliği puzolanik aktiviteleri ile doğrudan ilişkili olup inceliği daha fazla olan küller daha fazla puzolanik reaksiyon yaparak daha büyük mukavemete sahip olmaktadır.

Küllerin spesifik yüzey alanları hava geçirimsizlik metodu ile ölçülmektedir. Elektrofiltrelerde tutulan uçucu küller en yüksek spesifik yüzeye sahipken siklonlarda tutulanlar en düşük spesifik yüzeye sahiptirler.

Uçucu küllerin ortalama yoğunlukları 2.2 ile 2.7 arasında değişmektedir. Özgül ağırlıktaki değişimin ana sebebi demir ve karbon

bileşen muhtevaları ile içi boş uçucu kül danelerinin bulunmasıdır. Ayrıca uçucu kül, doğal zemine göre daha düşük özgül ağırlığa sahiptir.

Guo vd. (1996) içi boş ve içi dolu uçucu kül danelerinin kimyasal bileşenlerini ayrı ayrı incelemiş, ortaya çıkan sonuç içi boş uçucu kül danesinin (% 4.5) içi dolu uçucu kül danesine (% 25.1) göre önemli ölçüde daha düşük demir muhtevasına sahip olduğunu göstermiştir. Yani uçucu külün demir muhtevası arttıkça özgül ağırlığı artarken, muhteva azaldıkça özgül ağırlık azalmaktadır.

2.2. Uçucu Külün Sınıflandırılması

Kalsiyum oksit (CaO) muhtevasına göre uçucu küller şöyle sınıflandırılır (ASTM C618):

- düşük ($< \%10 \text{ CaO}$)
- orta seviye ($\% 10\text{-}20 \text{ CaO}$)
- yüksek ($> \% 20 \text{ CaO}$)

ASTM C618'e göre uçucu küller C sınıfı ve F sınıfı olmak üzere 2 sınıfa ayrılırlar. $\% 50$ 'den fazla ve $\% 70$ 'den az silikon, alüminyum ve demir oksit ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) ihtiva eden uçucu kül C sınıfı olarak adlandırılırken bu üç oksit toplamı $\% 70$ 'i geçerse uçucu kül F sınıfı olarak adlandırılmaktadır. Bu iki sınıf arasındaki farklar şu maddeler dahilinde değerlendirilebilir:

- C sınıfı uçucu külün linyitli kömürlerden, F sınıfı uçucu küllerin ise bitümlü kömürlerden elde edilmesi,
- C sınıfı uçucu küllerin bünyelerinde serbest kireç (CaO) bulunurken F sınıfı uçucu küllerde bulunmaması.
- C sınıfı uçucu küllerin kendi kendine çimentolaşma özelliği bulunurken F sınıfı uçucu küllerin ancak kireç ile birleştğinde puzolanik özelliğe sahip olmasıdır.

3. UÇUCU KÜLLERİN GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE KULLANIMI

Zeminin stabilizasyonu, zeminin stabilitesini arttırarak uzun vadede dengeli durumda kalmasını sağlamak için gerçekleştirilmektedir. İnce daneli zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için uçucu kül ve çimento ile karıştırılması, özellikle karayolu ve havaalanı alt yapılarında yıllardır uygulanan bir yöntemdir. Zemin cinsi, uygulama yöntemi, ekonomisi, kür süresi, katkı malzemesi ve miktarı bu çalışmanın ana unsurlarını oluşturmaktadır.

Joshi ve diğ. (1975), Kansas'taki üç termik santralden alınan uçucu kül ile kohezyonlu malzeme karışım numunelerini standart proktor deneyine tabi tutmuşlardır. Sonuçlar maksimum kuru birim hacim ağırlığının azaldığını, optimum su muhtevasının ise arttığını göstermektedir. Ayrıca zemine uçucu kül katkılı zeminin kürsüz ve beş gün kür süreli olarak kıvam limitlerini incelemiş; kür sonunda likit limitin azaldığını, plastik limitin ise arttığını bulmuştur.

Nicholson ve Kashyap'ın (1993), yüksek plastisiteli, sıkıştırılabilirliği zor Hawaii kili ile uçucu kül karışımı üzerinde gerçekleştirdiği deneyler sonucu % 15 ve % 25 oranlarındaki uçucu kül katkısının maksimum kuru birim hacim ağırlığı azalttığı, optimum su muhtevasını ise arttırdığı görülmüştür.

Ferguson (1993), LaCygne termik santralinden alınan C sınıfı uçucu külü yarış pisti zemininde kullandığında % 14 ile 18 arası uçucu kül katkısının 7 günlük mukavemet değerlerinde 10 kat kadar artış gösterdiğini kanıtlamıştır.

Turner (1997), uçucu kül ile stabilize edilen temel zeminini; kum, cüruf ve külden meydana gelen yeni temel zemini ve geosentetik takviyenin de dahil olduğu stabilizasyon alternatifleriyle kıyasladığında uçucu kül katkısının diğer alternatiflerle aynı veya daha iyi performans verdiğini göstermiştir.

Savran (1988), C sınıfı Soma uçucu kül ile stabilize edilen CH zeminin serbest basınç dayanımında özellikle ileri safhalarda büyük çapta bir artış olduğunu belirtmiştir. Gerçekleştirdiği standart proktor deneyleri sonucu artan uçucu kül muhtevası ile kuru birim hacim ağırlığı azalırken, optimum su muhtevası artış göstermektedir. Modifiye proktor deneyleri sonucu ise maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri daha büyük,

optimum su muhtevası değerleri ise daha düşük olarak elde edilmiştir. Ayrıca kıvam limitlerinin kürsüz ve 7 gün kürlü olarak değişimini incelemiştir. Buna göre kürsüz olarak uçucu kül katkısı ile likit limitte artış, plastik limitte ve plastisite indisinde azalma görülmektedir. 7 gün kürde ise kürsüze göre likit limit daha düşük, plastik limit ve plastisite indisi daha büyük çıkmıştır.

Çokça (1997), Soma uçucu külüne çimento ekleyerek kompaksiyon deneyleri gerçekleştirmiş; çimento oranının artışı ile optimum su muhtevasının ve maksimum kuru birim hacim ağırlığının azaldığını, özgül ağırlığın ise arttığını göstermiştir.

Çokça (2001), zemine % 0 ile 25 arası uçucu kül katarak artan uçucu kül miktarının likit limit, aktivite ve şişme potansiyelini azalttığını göstermiştir.

Erşan (1996), zemine uçucu kül ve uçucu kül + kireç katarak kıvam limitleri ve dane birim hacim ağırlığının değişimini incelemiş; yaptığı deneyler sonucu likit limitin arttığını, plastik limitin nispeten daha fazla arttığını, plastisite indisinin azaldığını ve dane birim hacim ağırlığının azaldığını göstermiştir. Kül oranı arttıkça optimum su muhtevastaki artış azalmakta ve sabitleşmeye doğru gitmekteyken maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri sürekli olarak azalmaktadır.

Alkaya (2002), kıvam limitlerini belirlerken kürsüz, bir hafta ve bir ay kür sürelerinde deneyleri gerçekleştirmiştir. Uçucu külün %15 oranına varan artışına kadar likit limit ile plastik limit artış gösterirken daha da artan uçucu kül miktarı ile likit limit ile plastik limitte az miktarda azalma göstermektedir. Artan kür süreleri ile likit limitte azalma, plastik limitte artış, plastisite indisinde ise azalma görülmektedir. Artan uçucu kül miktarı ile kuru birim hacim ağırlık azalırken optimum su muhtevası artmıştır. Ayrıca doğal zemin ile % 25 uçucu kül katkılı zemin arasındaki 6 farklı numuneye hemen, 1 hafta kürlü, 1 ay kürlü ve 3 ay kürlü serbest basınç deneyleri uygulanmıştır. Bu deneylere göre artan uçucu kül oranı ile ve artan kür süresi ile serbest basınç dayanımı artmaktadır.

Çakır (1999), zemin sınıfı CH olan kile % 10 ile % 20 oranında Seyitömer Termik Santrali uçucu külü karıştırarak maksimum kuru birim hacim ağırlığının giderek azaldığını, optimum su muhtevastan ise arttığını göstermiştir.

Özbayoğlu (1993) yaptığı çalışma sonucu zemine eklenen uçucu kül miktarının artışı ile maksimum kuru birim hacim ağırlığın azaldığını, optimum su muhtevasının ise artış gösterdiğini bulurken maksimum kuru birim hacim ağırlıkta gözlenen azalmanın uçucu külleri oluşturan içi boş küresel danelerden kaynaklandığını iddia etmiştir. Ayrıca uçucu kül oranının artışı belirli bir değerden sonra fazla değişmediği görülmüştür.

Ferguson (1993), Topeka Heartlan Park yarış pistinin iyileştirilmesi projesinde, uçucu kül katkılı killi şist zemin numunesi üzerinde 2 saat gecikmeli ve gecikmesiz olarak standart proktor deneyi gerçekleştirmiştir. Deneyler sonucunda 2 saat gecikmeli numunenin maksimum kuru birim hacim ağırlığında azalma, optimum su muhtevasında artış görülmüştür. Gecikmesiz numunede ise maksimum kuru birim hacim ağırlık az da olsa artarken optimum su muhtevasının azaldığı görülmüştür.

Misra (1998), C sınıfı uçucu külün uzun vadeli dayanım sağladığını belirtmiştir. Yalnız zamanla rötre çatlakları oluşabilmekte, bunun da dayanım artışına zararı olabilmektedir.

Kendinden çimentolanan uçucu kül-zemin karışımının dayanım artışı ve sıkıştırılmış yoğunluğu, kompaksiyon gecikmesine duyarlıdır. Ferguson (1993) kompaksiyon gecikmesinin sıkıştırılmış birim hacim ağırlığı ve dayanım artışını bariz şekilde azalttığını bulmuştur. Zemin karışımı, özgül su muhtevasında ve kompaksiyon gecikmesi olmadan stabilize edildiğinde en büyük dayanımı elde etmektedir.

Sezer vd. (2004), killi bir zemine uçucu kül ilave edilmesinin serbest basınç mukavemetini arttırdığını; 28 günlük kür sonrasında mukavemet artışının önemsiz oranda kaldığını göstermiştir.

Yıldız vd. (2004), yüksek plastisiteli Aksaray kilinin serbest basınç mukavemetinin 28 gün kür sonucu 15 kat arttığını göstermiştir. Düşük plastisiteli Doğanhisar kilinde ise yine 28 gün kür sonucu mukavemet bu sefer 3 kat artmıştır. Donma-çözülme çevrimleri sonucunda mukavemetler % 10-15 arası düşmüştür.

Edil vd. (2002) C sınıfı uçucu külü yol altı zemin iyileştirmesinde kullanmışlar; elde edilen sonuçların sıradan iyileştirme tekniklerinden daha iyi olduğunu göstermişlerdir.

4. DENEYLERDE KULLANILAN MALZEMELER

4.1 Zemin

Bu tez çalışmasında Turgutlu yöresinden elde edilen silt zemin kullanılmıştır. Elek analizi ve Atterberg limiti deneylerinin sonuçlarına göre zemin sınıfı tespit edilmiştir.

AASHTO sınıflandırma sistemine göre zemin A-4 sınıfı olarak tespit edilmiştir.

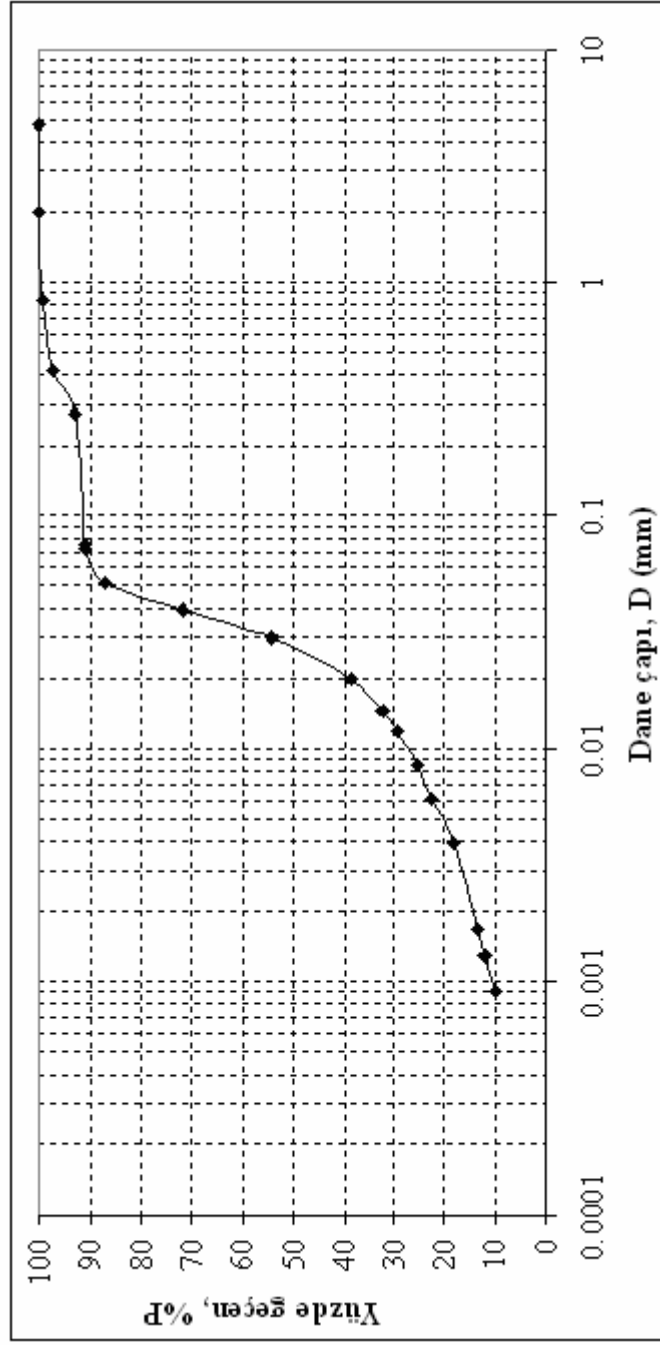
Deneylerde kullanılan zeminin birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine (USCS) göre sınıfı az kumlu killi düşük plastisiteli silttir. Bu zemin ML sembolü ile temsil edilmektedir.

Deney çalışmalarında kullanılan bu zeminin granülometri eğrisi Şekil 4.1’de verilmektedir. Kuru-ıslak elek ve hidrometre analizleri sonucu bu eğri elde edilmiştir.

Piknometre deneyi sonucu zeminin özgül ağırlığı $G_s = 2.73$ olarak bulunmuştur.

Zeminin kıvam limitlerine bakıldığında likit limitin 30.20, plastik limitin 24.28, plastisite indisinin de 5.92 olduğu görülmektedir.

Standart proktor deneyi sonucu zeminin optimum su muhtevası 16, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise 17.1 kN/m^3 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.1 Kullanılan zeminin dane boyu dağılımının değişimi

Üniform zeminlerde danelerin çoğu benzer büyüklüğe sahip olmaktadır. Bir zeminin üniformalığı, üniformaluk katsayısı C_u ile temsil edilir (Bardet, 1997).

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Burada D_{10} , malzemenin ağırlıkça % 10'unun daha küçük olduğu çap; D_{60} ise malzemenin ağırlıkça % 60'ının daha küçük olduğu çaptır. Bu değerler zeminin dane boyu değişimi grafiğinden belirlenebilmektedir. Şekle baktığımızda $D_{10} = 0.0009$ mm, $D_{60} = 0.073$ mm ve $C_u = 81.11$ olarak hesaplanmış oluruz.

Dane boyu dağılımı, eğrilik derecesi ile karakterize edilebilmekte olup daha özgül olarak eğrilik katsayısı C_c ile gösterilmektedir (Bardet, 1997):

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10}D_{60}}$$

Buradan $D_{30} = 0.0124$ olup $C_c = 2.34$ olarak hesaplanmaktadır.

4.2 Uçucu kül

Bu çalışmada kullanılan uçucu kül linyit kökenli olup Soma Termik Santralinden temin edilmiştir. Uçucu külün özgül ağırlığı 2.21, özgül yüzeyi ise $2351 \text{ cm}^2/\text{gr}$ 'dir. 0.045 mm'lik elek üzerinde kalan kısım % 33 olup 0.090 mm'lik elek üzerinde kalan kısım % 14.3'tür. Uçucu külün kimyasal özellikleri Tablo 4.1'de verilmektedir.

4.3 Çimento

Tez çalışması kapsamındaki deneylerde kullanılan çimento CEM I 42.5 tipi portland çimentosudur. Bu çimentonun özgül ağırlığı 3.13, özgül yüzeyi ise $3670 \text{ cm}^2/\text{gr}$ 'dir. 0.09 mm elek üzerinde kalan kısım % 0.70 olup 0.032 mm elek üstünde kalan kısım % 18.20'dir.

Tablo 4. 1 Soma uçucu külünün kimyasal özellikleri

Bileşenler	(%)
SiO ₂	45.98
Al ₂ O ₃	23.55
Fe ₂ O ₃	4.91
CaO	18.67
MgO	1.54
Na ₂ O	0.24
K ₂ O	1.80
SO ₃	1.47
Kızdırma Kaybı	2.31
Cl ⁻	0.0053
Serbest CaO	0.64

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Amaç

Bu çalışmanın amacı; silt bir zemine uçucu kül ilave edildiğinde serbest basınç dayanımında oluşan değişimi ve donma-çözünme etkisine karşı oluşan direncin ne yönde değiştiğini incelemektir.

5.2 Kapsam

Bu çalışma kapsamında, kontrol numunesi olarak doğal zemin olan silt malzeme ile kuru ağırlıkça % 10, 20, 30 oranında uçucu kül ve % 2, 5, 8 oranında çimento tek başlarına ve çeşitli karışım oranlarıyla kendi aralarında 16 çeşit karışım oluşturmuşlardır. Bunlar temsili olarak doğal zemin, 2C, 5C, 8C, 10UK, 20UK, 30UK, 10UK2C, 10UK5C, 10UK8C, 20UK2C, 20UK5C, 20UK8C, 30UK2C, 30UK5C ve 30UK8C şeklinde simgelenmiştir. UK, uçucu külü; C ise çimentoyu temsil etmektedir. Tablo 5.1’de zemin karışımları simgeleri ve açıklamalarıyla birlikte yer almaktadır.

Öncelikle doğal zemin, dane boyu dağılımını tespit etmek için elek analizi ve hidrometre analizine tabi tutulmuştur. Daha sonra karışım malzemeleri Atterberg limitleri olan likit limit ve plastik limit deneylerine, optimum su muhtevası-kuru birim hacim ağırlık ilişkilerini veren standart proktor deneyine, dayanım özelliklerinin tespiti için serbest basınç deneyine, soğuk hava koşullarındaki don etkisine dayanıklılığını incelemek için donma-çözülme deneyine tabi tutulmuşlardır. Serbest basınç deneyleri 1, 7 ve 28 günlük kür sürelerinde, donma-çözülme deneyleri ise 1, 3 ve 7 çevrimle gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en büyük dayanımı sağlayan zemin karışımı tespit edilmiş, diğer karışımlarla kıyaslandığında ekonomik açıdan en uygun zemin karışımı yorumlanmıştır.

Tablo 5. 1 Simgelendirilmiş zemin karışımlarının açılımları

Malzeme	Uçucu kül (%)	Çimento (%)
Doğal zemin	-	-
10UK	10	-
20UK	20	-
30UK	30	-
2C	-	2
5C	-	5
8C	-	8
10UK2C	10	2
10UK5C	10	5
10UK8C	10	8
20UK2C	20	2
20UK5C	20	5
20UK8C	20	8
30UK2C	30	2
30UK5C	30	5
30UK8C	30	8

5.3 Kıvam Limitleri (Atterberg Limitleri)

İnce daneli zeminlerin sınıflandırılması için gerekli analizlerden birisi de zeminin kıvam limitlerinin tespit edilmesidir.

Sıvı halde bulunan zemine kayma gerilmesi uygulandığında bu her noktada deformasyona yol açacaktır. Böyle bir zemin kurutulup su muhtevasının azaltılması ile plastik hale gelir. Su muhtevası bir miktar daha azaltıldığında zeminin deformasyonu sırasında yüzeyde çatlaklar belirmeye başlar. Bu hal yarı katılığın başlangıcıdır. Su muhtevasının daha da azaltılmasında oluşan katı halde ise gerilmeler zeminin kırılma gerilmesine ulaşana kadar deformasyon oluşturmayıp kırılma gerilmesinde aniden kırılır. Atterberg, zeminlerin su muhtevasına bağlı olarak farklı davranış gösterdiklerini belirtmiş; değişen sınır su muhtevaları için likit limit ve plastik limit deneylerini ortaya koymuştur (Aytekin, 2001).

Likit limit (LL) zeminin viskoz kıvamdan plastik kıvama dönüştüğü andaki su muhtevasıdır. Bir zeminin likit limiti Casagrande yöntemi ve düşen koni penetrasyon yöntemi olmak üzere iki farklı yöntemle bulunabilmektedir. Bu deney çalışmasında gerçekleştirilen likit limit deneyi düşen koni penetrasyon deneyidir. En az üç defa yapılması gereken bu deney değişik su muhtevaları için tekrarlanmış; elde edilen veriler, batma miktarı (mm) - su muhtevası (ω) diyagramında işaretlenmiştir.

Plastik limit (PL) ıslak zeminin yoğrularak 3 mm çapında iplik halini aldığı anda yüzeyinde çatlakların belirmeye başladığı andaki su muhtevasıdır. Plastik limit deneyi de üç kez tekrarlanarak ortalaması plastik limit değeri olarak kabul edilmiştir.



Şekil 5. 1 Likit limit deney aleti

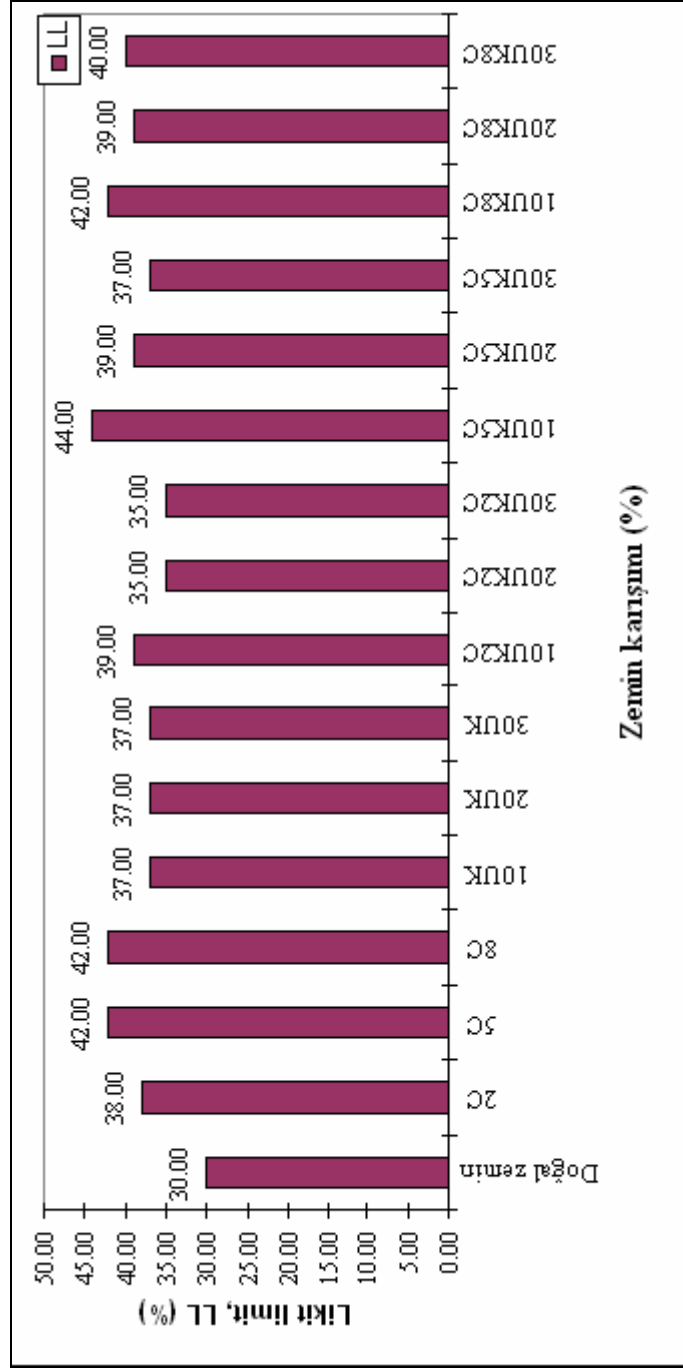
Herhangi bir katkı ilave edilmeyen doğal zeminin (kontrol numunesi) likit limit değeri 30, plastik limit değeri 24, plastisite indisi

değeri ise 6 olarak bulunmuştur. Doğal zemine % 10 uçucu kül eklendiği zaman likit limitin arttığı, daha fazla uçucu kül artışlarında ise bu değer daha fazla artış göstermediği görülmektedir. Artan uçucu kül ile plastik limitteki artış oranı likit limite göre daha fazla olup, plastisite indisinde azalma olmuştur. Artan çimento oranıyla likit limit ve plastik limitteki artışın uçucu külekine göre daha fazla olduğu, plastisite indisinin ise dengeli bir dağılım gösterdiği görülmüştür. En büyük likit limit değerini 10UK5C numunesi elde ederken en düşük likit limit değerini katkısız kontrol numunesi elde etmiştir. En büyük plastik limiti ise 10UK8C elde ederken en düşük değeri yine kontrol numunesi elde etmiştir. En büyük plastisite indisine likit limitte olduğu gibi 10UK5C sahip olurken en düşük değere 30UK2C sahip olmuştur.

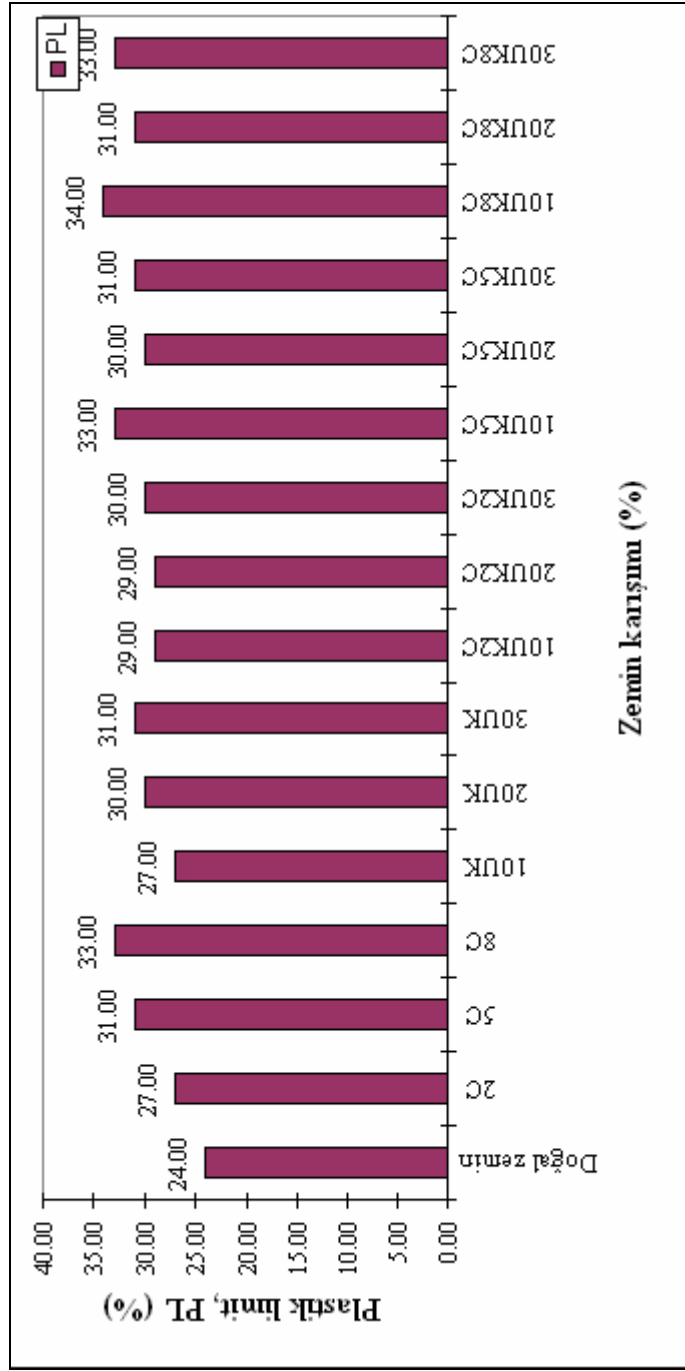
Tablo 5.2’de kıvam limitleri toplu olarak verilmiştir. Ayrıca Şekil 5.2-4’tebu sonuçlar sütunlar halinde gösterilmektedir.

Tablo 5. 2 Atterberg limitleri sonuçları

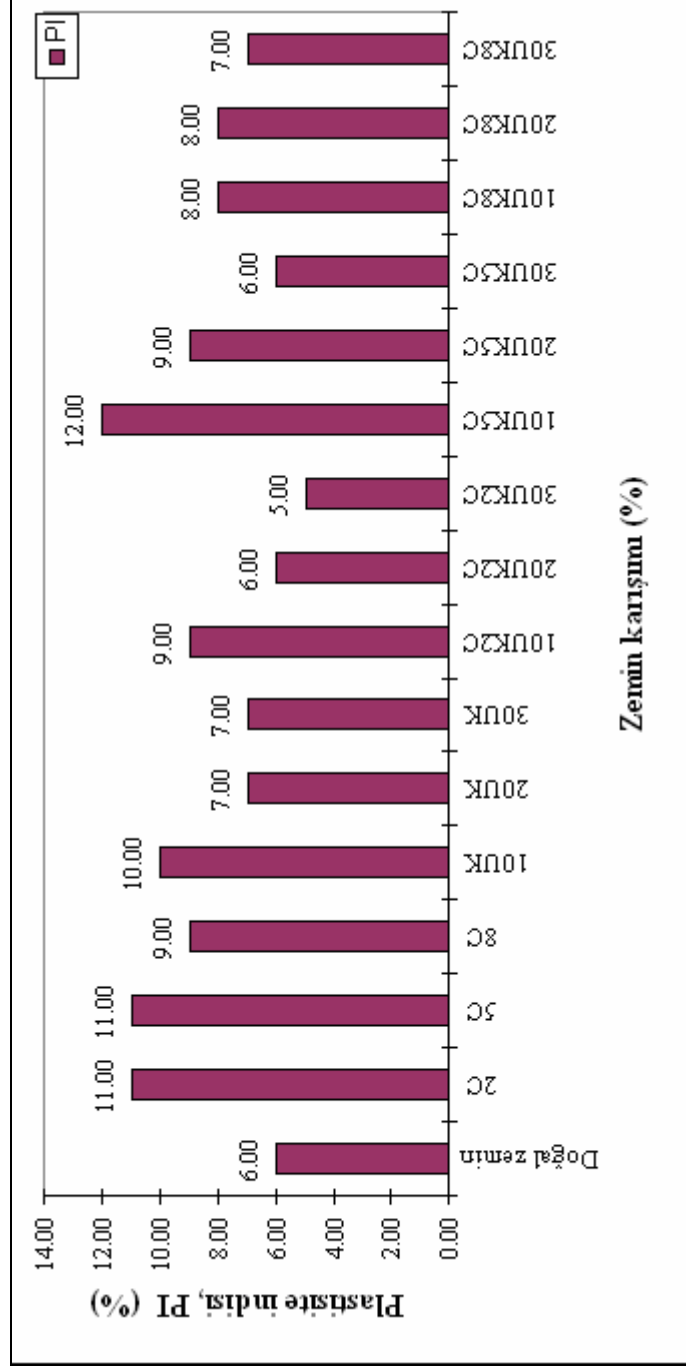
Malzeme	LL	PL			PI	
		1.Örnek	2.Örnek	3.Örnek		Ortalama
Doğal zemin	30	24	25	24	24	6
2C	38	25	28	28	27	11
5C	42	31	30	31	31	11
8C	43	33	34	33	33	10
10UK	37	27	25	28	27	10
20UK	37	30	30	30	30	7
30UK	37	30	31	31	31	6
10UK2C	39	31	29	28	29	10
20UK2C	35	29	29	30	29	6
30UK2C	35	29	30	30	30	5
10UK5C	44	32	35	32	33	11
20UK5C	39	29	29	32	30	9
30UK5C	37	30	32	31	31	6
10UK8C	42	33	36	32	34	8
20UK8C	39	30	31	31	31	8
30UK8C	40	31	33	34	33	7



Şekil 5. 2 Tüm zemin numunelerinin likit limit değerleri



Şekil 5. 3 Tüm zemin numunelerinin plastik limit değerleri



Şekil 5. 4 Tüm zemin numunelerinin plastisite indisi değerleri

5.4 Standart Proktor Deneyi

Zeminlerin stabilizasyonu için kullanılan yöntemlerin içinde en ucuz olanı sıkıştırma (kompaksiyon) yöntemidir. Kompaksiyon deneyinin amacı zeminin sıkıştırılması ile maksimum kuru birim hacim ağırlığının (γ_{kmax}) elde edildiği su muhtevasının bulunmasıdır.

R.R. Proctor (1933) bu deneyi bulduğu için deney onun adıyla da anılmaktadır. İki tip Proctor deneyi mevcuttur: Standart Proktor deneyi ve Modifiye Proktor deneyi. Bu tez çalışması kapsamında Standart Proktor deneyi uygulanmıştır.



Şekil 5. 5 Standart proktor deneyi uygulaması

Deneylerden elde edilen verilerle su muhtevası-kuru birim hacim ağırlık ilişkisini gösteren eğri çizilerek bu eğrinin pik noktası tespit edilir. Pik noktasının yatay eksenindeki karşılığı optimum su muhtevasını, düşey eksenindeki karşılığı maksimum kuru birim hacim ağırlığı vermektedir.

Geçmişte yapılan standart proktor deneyleri sonucu elde edilen su muhtevası-kuru birim hacim ağırlık verileri; optimum su muhtevasının, zemin karışımına eklenen uçucu kül miktarı ile değiştiğini göstermektedir. Bu değişim, zemin karışımına olduğu kadar kompaksiyonun gecikme süresine de bağlıdır. Optimum su muhtevasının uçucu kül eklendikçe artma eğiliminin olmasının muhtemel sebebi uçucu külün hidrasyonudur. C sınıfı uçucu kül suyla temas eder etmez çimentolu yapı oluşturmak için çabucak hidratlanır. Uçucu kül niteliğini temel alan hidrasyon reaksiyonu çoğu durumda birkaç saat içinde meydana gelmektedir. Bu yüzden numunenin hazırlanması ve kompaksiyonu erken hidrasyonu önlemek için çok hızlı bir şekilde yapılmalı, bu iki işlem arasındaki süre minimumda tutulmalıdır.

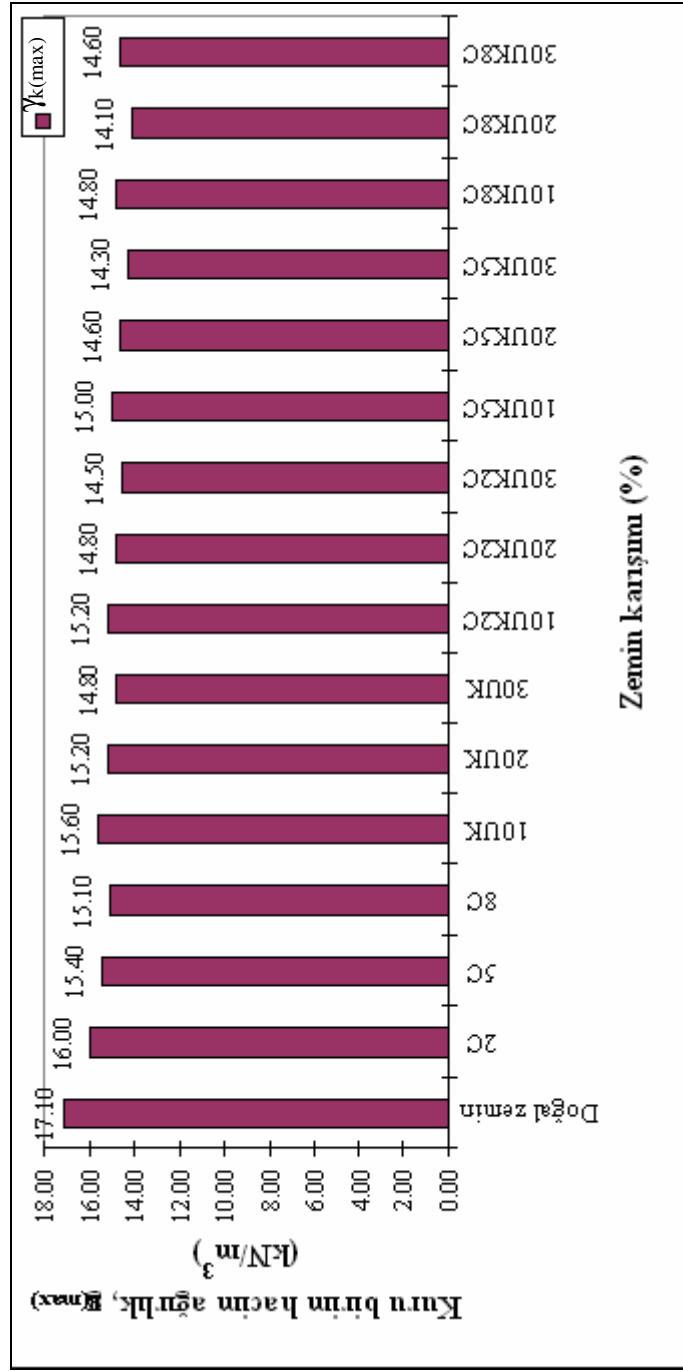
Standart proktor deneyleri sonucu elde edilen su muhtevası-kuru birim hacim ağırlık değerleri tüm zemin karışımları için grafikler üzerinde noktalanarak düşey eksendeki pik noktada bulunan maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri ile bu noktanın yatay eksenindeki karşılığı olan optimum su muhtevası değerleri tespit edilmiştir. Bu grafikler Ekler bölümünde yer almakta olup sonuçları Tablo 5.3'te verilmektedir.

Katkısız doğal zemin üzerinde yapılan kompaksiyon deneyleri sonucu numunenin optimum su muhtevası % 16, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise 17.1 kN/m^3 olarak bulunmuştur. Doğal zemine uçucu kül ekledikçe zeminin optimum su muhtevası artmakta, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise azalmaktadır. Bunun nedeni uçucu külün gözenekli, boşluklu bir yapıya sahip olmasıdır. Doğal zemine kuru ağırlıkça % 8'e varan çimento ekledikçe zeminin optimum su muhtevası artmakta, hatta bu artış uçucu külün artışından fazla olmaktadır. Bunun yanında maksimum kuru birim hacim ağırlık, çimento artışıyla azalmaktadır. Bu sonuçlar içinde dikkati çeken nokta 10UK2C numunesinin diğer numunelere göre bariz şekilde daha düşük optimum su muhtevasına ve daha büyük maksimum kuru birim hacim ağırlığa sahip olmasıdır. 20UK8C numunesi en yüksek optimum su muhtevasını, doğal zemin en düşük optimum su muhtevasını; doğal zemin en büyük maksimum kuru birim hacim ağırlığı, 20UK8C ise en düşük maksimum kuru birim hacim ağırlık değerini elde etmiştir.

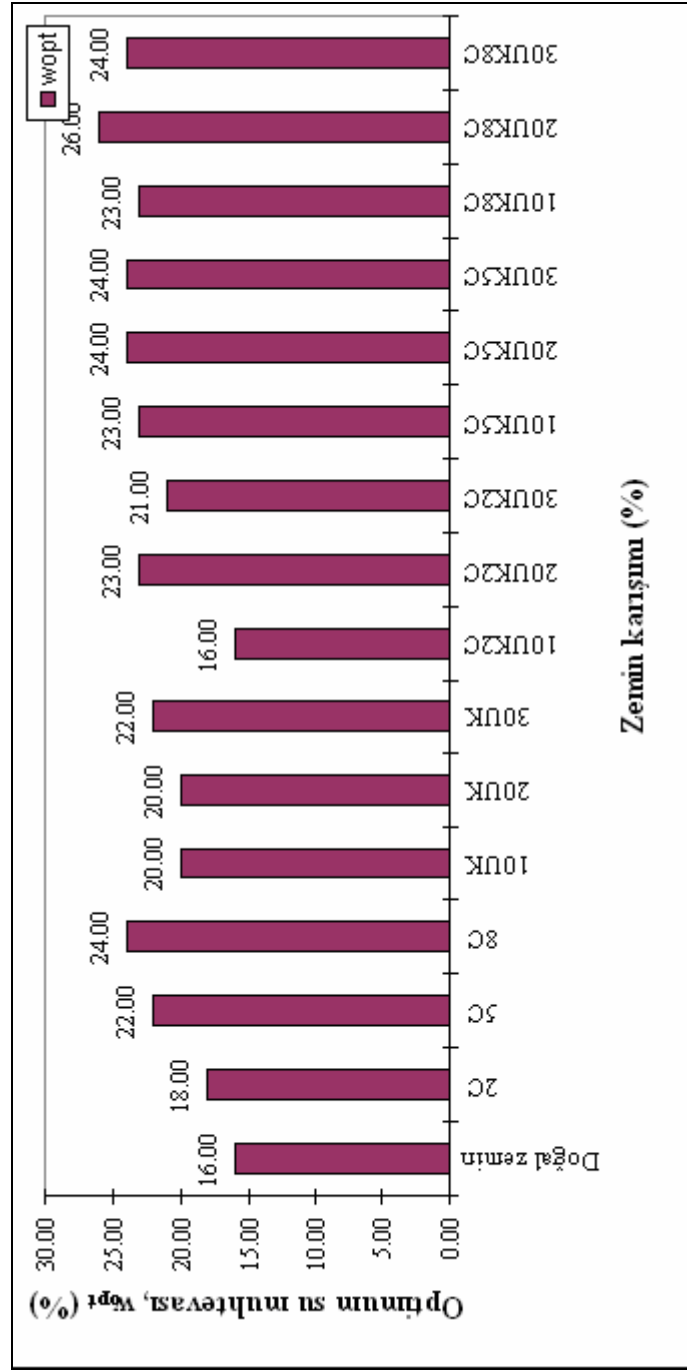
Şekil 5.6 ve 5.7'de optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri sütunlar halinde gösterilmiştir.

Tablo 5. 3 Tüm numunelerin kompaksiyon değerleri

Numune	ω_{opt} (%)	$\gamma_{k(max)}$ (kN/m³)
Doğal zemin	16	17.1
2C	18	16.0
5C	22	15.4
8C	24	15.1
10UK	20	15.6
20UK	20	15.2
30UK	22	14.8
10UK2C	16	15.2
10UK5C	24	15.0
10UK8C	23	14.8
20UK2C	23	14.8
20UK5C	24	14.6
20UK8C	26	14.1
30UK2C	21	14.5
30UK5C	24	14.3
30UK8C	24	14.6



Şekil 5. 6 Tüm zeminlerin maksimum kuru birim hacim ağırlıkları



Şekil 5. 7 Tüm zeminlerin optimum su muhtevaları

5.5 Serbest Basınç Deneyi

Bu çalışma kapsamında uçucu külün ve çimentonun; zeminin mukavemetine etkisini belirlemek için belirli sayıda serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deney ince daneli zeminlerin takriben drenajsız kayma dayanımı olan serbest basınç dayanımını belirlemek için uygulanmaktadır. Bu deney sadece kohezyonlu zeminlere uygulanabilmekte olup kuru ya da kohezyonsuz zeminlere uygulanamamaktadır (Bardet, 1997). Serbest basınç deneyinin olumsuz yönleri; numune doğal şartlarda bir çevre basıncına maruzken deney sırasında bu basıncın sıfır olması ve deney süresince numune içindeki koşulların kontrol altına alınamamasıdır. Üç eksenli kesme deneyi ile bunlara çözüm getirilmiştir. Fakat serbest basınç deneyi ekonomik olması ve çabuk sonuç vermesi sayesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Deneylerde genel olarak şu prosedür uygulanmıştır:

- Deneyin ilk aşamasında zemin standart kompaksiyon kabında optimum su muhtevasında sıkıştırılır. Sıkıştırılan numuneden serbest basınç deneyine özel numune çıkarıcı aygıt vasıtasıyla 5 cm'lik çap ve 10 cm'lik uzunluğa sahip numune çıkartılır.
- Numunenin alt ve üst yüzeyleri iyice düzeltildikten sonra 0.01 gr duyarlılığa sahip tartıda tartılarak ağırlığı kaydedilir.
- Numune vakit kaybetmeden deney aletinin alt başlığının merkezine yerleştirilerek yüklemeye hazır hale getirilir. Alet çalıştırılarak üst başlığın numuneyle teması sağlanır. Numunenin üst başlığa temas ettiği anda yük halkasında belirli bir değer değişikliği olur. Aletin çalışması durdurularak kuvvet halkası ve deformasyon okuma saatleri sıfırlanır ya da o andaki okumalar alınarak deneye başlanır.
- Alet çalıştırılarak numunenin yük alması sağlanırken deformasyon saatindeki her 0.25 mm deformasyon aralığında okuma saatlerinden değerler okunarak kaydedilir. Kırılma gözle görülür olduktan kısa bir süre sonra yükleme devam ederken yükler önce artar ve en büyük değerine ulaşır. Daha sonra ise ani azalmalar göstererek sabit bir gerilme değerine kadar yükleme sürer. Bu sabit değer rezidüel (kalıcı) gerilme değeridir.

- Numune alınarak 0.01 gr duyarlıklı tartıda tartıldıktan sonra su muhtevası tespit edilmek üzere etüve konulur.

Zemin karışımları deney programına göre 1, 7 ve 28 günlüğüne kür odasına bırakılarak zamanla dayanımın değişimi incelenmiştir. Serbest basınç deneyleri sonucunda numunelerin aksenal gerilmeleri ve rezidüel gerilmeleri elde edilmiştir. Böylece istenen dayanımın elde edilebilmesi için mevcut zemine katılacak en uygun katkı miktarı yorumlanabilecektir.



Şekil 5. 8 Serbest basınç deneyi aleti

Aşağıda öncelikle deney sonuçları olan serbest basınç dayanımları ve residüel gerilmeler tablolar halinde verilmiştir. Bunun yanı sıra uçucu kül, çimento, uçucu kül + çimento artışlarında ve kür süresi değişimlerinde dayanımdaki değişim gözlenerek bunun hakkındaki yorumlara yer verilmiştir. Kendi aralarında malzemeye göre ve kür süresine göre gruplandırılmış numunelerin eksenel gerilme-birim deformasyon değişimleri Ekler bölümünde verilmiştir.

Tablo 5. 4 1 gün küre bırakılmış tüm numunelerin serbest basınç dayanım ve rezidüel gerilme değerleri

Kür Süresi	1 Gün	
Numune	Serbest Basınç Dayanımı (kN/m²)	Rezidüel Gerilme (kN/m²)
Doğal zemin	136	30
10UK	261	25
20UK	270	17
30UK	257	35
2C	278	22
5C	219	22
8C	302	12
10UK2C	323	55
10UK5C	260	39
10UK8C	247	10
20UK2C	212	15
20UK5C	217	54
20UK8C	203	28
30UK2C	279	14
30UK5C	135	18
30UK8C	215	47

Tablo 5. 5 7 gün küre bırakılmış tüm numunelerin serbest basınç dayanım ve rezidüel gerilme değerleri

Kür Süresi		7 Gün	
Numune	Serbest Basınç Dayanımı (kN/m²)	Rezidüel Gerilme (kN/m²)	
Doğal zemin	152	81	
10UK	408	51	
20UK	696	72	
30UK	703	68	
2C	391	65	
5C	493	92	
8C	587	207	
10UK2C	1184	83	
10UK5C	447	57	
10UK8C	678	25	
20UK2C	533	139	
20UK5C	617	30	
20UK8C	839	60	
30UK2C	833	89	
30UK5C	1123	87	
30UK8C	1192	173	

Tablo 5. 6 28 gün küre bırakılmış tüm numunelerin serbest basınç dayanım ve rezidüel gerilme değerleri

Kür Süresi		28 Gün	
Numune	Serbest Basınç Dayanımı (kN/m²)	Rezidüel Gerilme (kN/m²)	
Doğal zemin	148	40	
10UK	451	61	
20UK	1085	54	
30UK	1304	258	
2C	547	19	
5C	574	83	
8C	710	19	
10UK2C	1940	0	
10UK5C	1081	50	
10UK8C	1570	388	
20UK2C	1226	352	
20UK5C	1115	104	
20UK8C	2057	0	
30UK2C	1600	427	
30UK5C	2067	104	
30UK8C	2534	0	

1 gün küre bırakılmış malzemelerde 10UK2C numunesi en büyük dayanımı elde ederken, doğal zemin ve 30UK5C numuneleri en düşük dayanımları elde etmiştir. Doğal zemine % 2 oranında çimento ilave edildiğinde dayanım artmış, % 5 çimento oranı ilavesinde dayanım artış yüzdesi azaldıktan sonra % 8 çimento ilavesinde tekrar artmıştır. Doğal zemine % 10 ve 20 oranında uçucu kül ilavesiyle dayanım artmış, % 30 uçucu kül ilavesinde dayanım % 10 uçucu kül katkılı zeminin dayanımından düşük kalmıştır. Farklı oranlarda uçucu kül + çimento katkılı zeminlerde dayanım artışı doğrusallık göstermemiştir. Örneğin çimento oranı sabit olup uçucu kül oranı artırıldığında ya da uçucu kül oranı sabit tutulup çimento oranı artırıldığında serbest basınç dayanımının düştüğü dahi görülmüştür. Kısacası 1 gün küre bırakılmış zeminlerde doğal zemine katkı malzemeleri ilave edildiğinde dayanım artmış, fakat

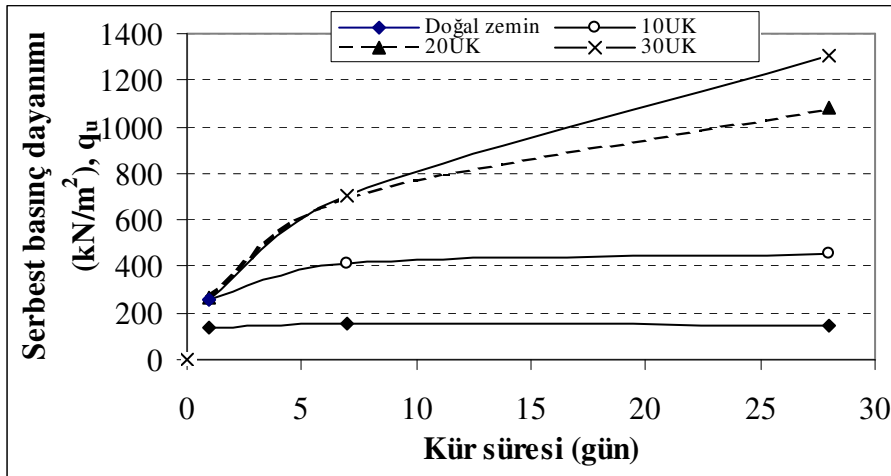
katkı malzeme oranı artırıldığında dayanım artarak ya da azalarak, kararsız bir davranış sergilemiştir.

7 gün küre bırakılmış malzemelerde en büyük dayanımı 10UK2C numunesi elde ederken en düşük dayanımı beklendiği üzere doğal zemin numunesi elde etmiştir. Doğal zemine % 10 ve % 20 oranında uçucu kül ilave edildiğinde dayanımlar düzenli şekilde artış göstermiş, % 30 uçucu kül ilave edildiğine dayanım % 20 uçucu küle göre çok az artmıştır. Yani 7 gün kür için % 20 uçucu kül ile % 30 uçucu kül arasında fazla fark yoktur. Zemine % 2, 5 ve 8 oranında çimento ilave edildiğinde dayanımlar doğal zemin numunesine göre sırasıyla % 158, 224 ve 286 oranında artmıştır. Rezidüel gerilmeler de çimento oranını artışıyla artış göstermiş, hatta % 2 çimento katkılı zeminin rezidüel gerilmesi 207 kN/m² ile en yüksek değeri elde etmiştir. 30UK8C numunesi en büyük serbest basınç dayanımını elde ederken, 10UK2C numunesi yine büyük bir mukavemet değeri elde etmiştir. 10UK5C numunesi ise beklenenden düşük olan 447 kN/m² lik bir dayanım değerine sahiptir. 10UK8C numunesinde dayanım bir miktar artmış, dayanım artışı doğal zemin numunesine göre % 346 oranında gerçekleşmiştir. Uçucu kül miktarı kuru ağırlıkça % 20 oranında tutulup çimento oranı % 2, 5 ve 8 oranında artırıldığında serbest basınç dayanımının sırasıyla % 250, 306 ve 452 oranında arttığı görülmüştür. Uçucu kül oranı % 30 olup çimento yine % 2, 5 ve 8 oranında artırıldığında dayanımlar % 20 uçucu küldekinden büyük çıkmış, artış yüzdeleri sırasıyla % 448, 639 ve 684 olarak gerçekleşmiştir. 30UK5C numunesinin serbest basınç dayanımı 1123 kN/m² olarak tespit edilmiş, 30UK8C numunesinde ise dayanım 1192 kN/m² olarak çıkmıştır. Yani zemine %30 uçucu kül + 8 çimento yerine % 30 uçucu kül + % 5 çimento ilave edilmesi zeminden beklenen duruma göre yeterli olabilecektir.

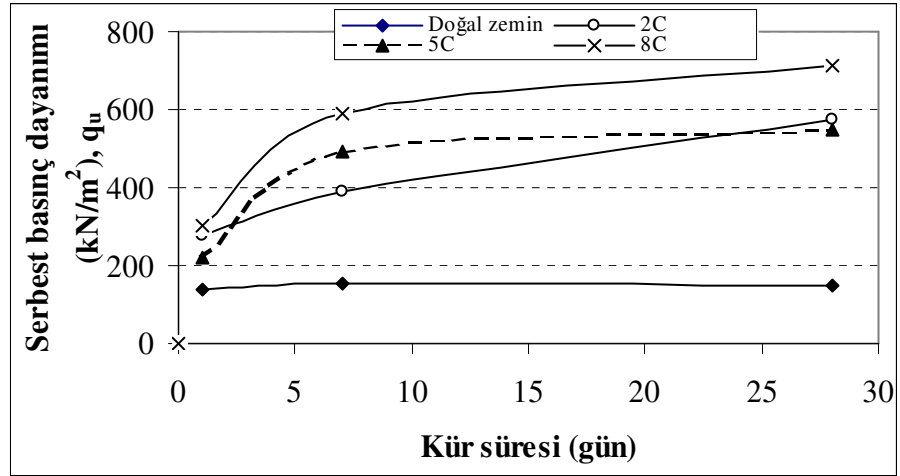
28 gün küre bırakılmış malzemeler içinde en büyük dayanımı 30UK8C numunesi elde etmiştir. Yani doğal zemine en yüksek katkı malzemesi oranları olan % 30 uçucu kül ve 8 çimento karıştırılıp en uzun kür süresi olan 28 gün küre bırakıldığında tüm zemin çeşitleri içinde en büyük dayanım olan 2534 kN/m² değeri elde edilmiştir. En düşük dayanım yine diğer kür sürelerinde olduğu gibi doğal zemin numunesinindir. Doğal zemine % 10 oranında uçucu kül ilave edildiğine dayanım, sadece çimento ilave edilen 3 numunenin dayanımından düşük çıkmıştır. Fakat % 20 uçucu kül ve % 30 uçucu kül ilave edildiğinde dayanımlar çimentolu numunelerin dayanımından hayli yüksek çıkmıştır.

Uçucu kül + çimento katkılı zemin çeşitlerinde uçucu kül oranı sabit tutulup çimento oranı artırıldığında ya da çimento oranı sabit tutulup uçucu kül oranı artırıldığında zeminin dayanımı sürekli olarak artmıştır. 10UK2C numunesi burada da beklenmedik bir davranış göstererek 1940 kN/m^2 gibi büyük bir dayanım elde etmiştir. 10UK2C numunesinde dikkati çeken bir diğer nokta rezidüel gerilmenin 0 oluşudur. Dayanım bir noktadan sonra ani bir artışla pik noktasına geldikten sonra çok ani bir kırılmayla numune darmadağın olarak gevrek bir davranış göstermiştir. 28 günlük numunelerin hemen hepsinin dayanımlarında ani düşüşler göze çarpmaktadır. Numuneler gevrek davranış göstererek aniden kırılmışlar hatta 10UK2C, 20UK8C ve 30UK8C numuneleri patlama şeklinde etrafa dağılmışlardır. 1 ve 7 günlük numunelerde böyle bir durumla karşılaşılmamıştır.

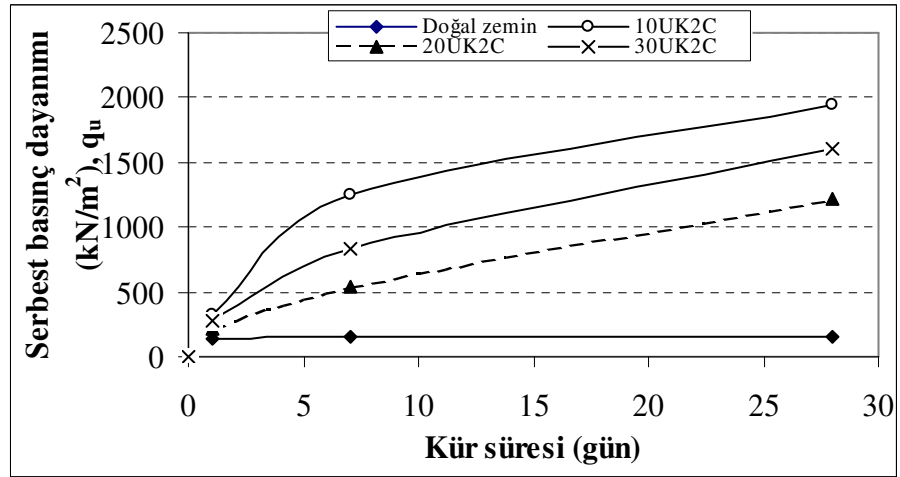
Deformasyon yönünden incelersek 1 günlük kürde doğal zemin % 6 birim deformasyonda kırılırken çimento katkılı zeminlerde bu değer % 3 civarına düşmüş, uçucu kül katkılı zeminlerde % 4-7 arasında seyretmiştir. 7 günlük kürde doğal zeminin birim deformasyonu % 5'e düşmüş, uçucu kül ve çimento ilavesinde deformasyon değerleri daha da düşmüştür. 28 günlük kürde doğal zeminin birim deformasyonu bir miktar daha azalma gösterirken, % 10 uçucu kül katkılı zeminde 7 günlük kür süresine göre azalma gözlenmemiştir.



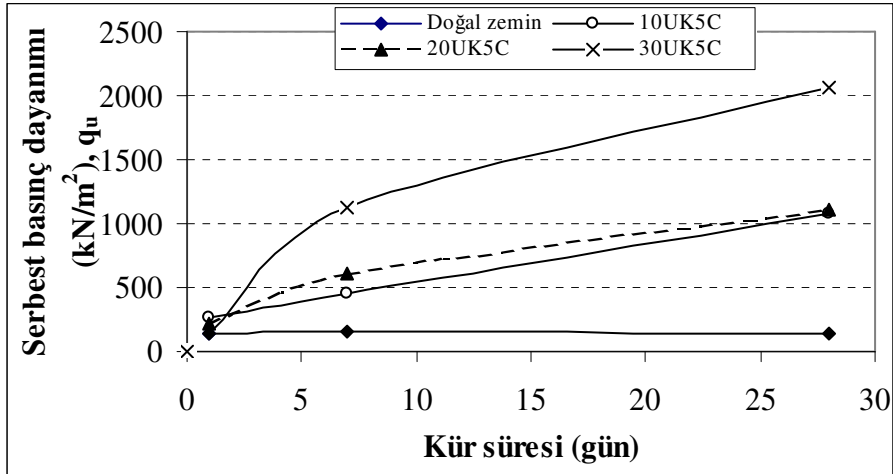
Şekil 5. 9 Doğal zemin ve sadece uçucu kül katkılı zeminlerin artan kür süresiyle serbest basınç dayanımlarının değişimi



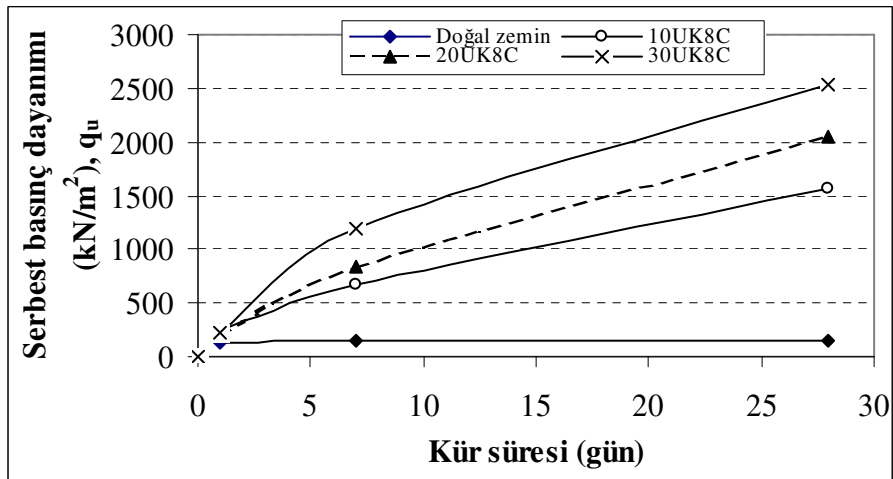
Şekil 5. 10 Doğal zemin ve sadece çimento katkılı zeminlerin artan kür süresiyle serbest basınç dayanımlarının değişimi



Şekil 5. 11 Doğal zemin ile %2 sabit çimento oranına uçucu kül ilave edilen zeminlerin artan kür süresiyle serbest basınç dayanımlarının değişimi



Şekil 5. 12 Doğal zemin ile %5 sabit çimento oranına uçucu kül ilave edilen zeminlerin artan kür süresiyle serbest basınç dayanımlarının değişimi



Şekil 5. 13 Doğal zemin ile %8 sabit çimento oranına uçucu kül ilave edilen zeminlerin artan kür süresiyle serbest basınç dayanımlarının değişimi

Kürün zeminlere etkisinin gösterildiği grafikler Şekil 5.9-13'te yer almaktadır. Zemin karışımlarının küre bırakılmaları sonucu dayanımlarında artışlar görülmüştür. Kürün en az etkisi doğal zemin numunesi üzerinde görülmüştür. Yani doğal zemin 7 ve 28 gün küre

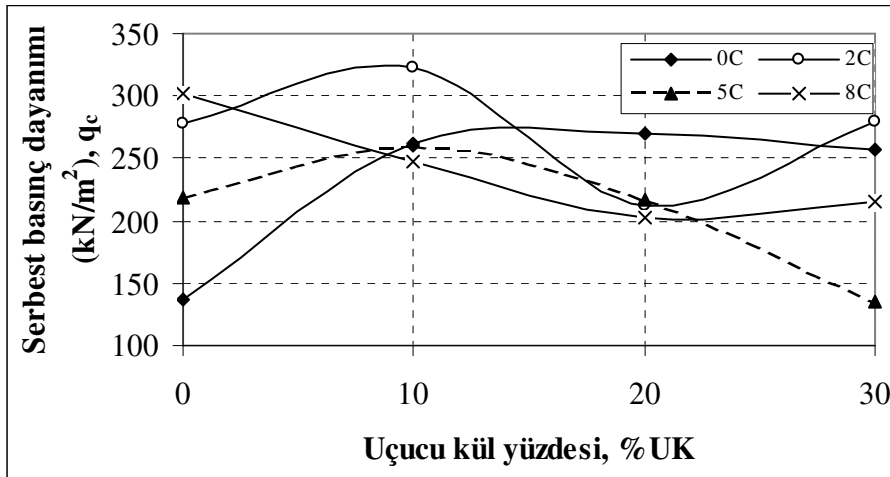
bırakılsa dahi dayanım artışı cüzi miktarda kalacaktır. Hatta 28 gün küre bırakılmış doğal zemin numunesinin dayanımı 7 gün küre bırakılmış numunenin dayanımından çok az da olsa düşük çıkmıştır. 2C numunesinin 1 günlük kür sonucu dayanımı 278 kN/m^2 iken 7 gün sonundaki dayanım % 41, 28 gün sonundaki dayanım ise % 106 artmıştır. 7 ve 28 günlük %5 çimento numunesinin, 1 günlük numuneye göre dayanım artışları sırasıyla % 124 ve % 225 olmuştur. 8C numunesinde de diğer çimento numunelerine benzer olarak 7 ve 28 günlük küre bırakılmış numuneler, 1 günlük küre bırakılmış numuneye göre sırasıyla % 94 ve % 135 artmıştır. 10UK numunesinin 1 günlük kür sonucu kayma gerilmesi 261 kN/m^2 iken 7 gün sonrası için bu değer % 56, 28 gün sonrası için ise % 73 artmıştır. 20UK numunesinin 7 ve 28 günlük dayanım artışları 1 günlüğe göre sırasıyla % 157 ve % 301 artmıştır. 30UK numunesinin 1 günlük kür sonucu dayanım değeri 257 kN/m^2 iken 7 gün sonucu bu dayanım % 173, 28 gün sonucu ise % 407 artmıştır.

Çimento katkılı numunelere baktığımızda 7 ve 28 günde dayanımlar sürekli olarak artmış, fakat bu artış sadece uçucu kül katkılı numunelerdeki artışa göre düşük çıkmıştır. Buradan çıkaracağımız sonuç, zemine % 10, 20 ve 30 oranında uçucu kül katıldığında kür sonucu dayanımlarının % 2, 5 ve 8 çimento katkılı zeminlerin dayanımlarına göre daha büyük olduğudur. Genel olarak sadece uçucu kül katkılı numunelerde uçucu kül miktarının artırılmasıyla ve sadece çimento katkılı numunelerde çimento miktarının artırılmasıyla kür süresinde artışıyla serbest basınç dayanımlarında artışlar görülmüştür. Sadece 8C numunesi bir istisna oluşturarak 7 ve 28 günde dayanımı arttığı halde artış yüzdesi 5C'ye göre düşük çıkmıştır.

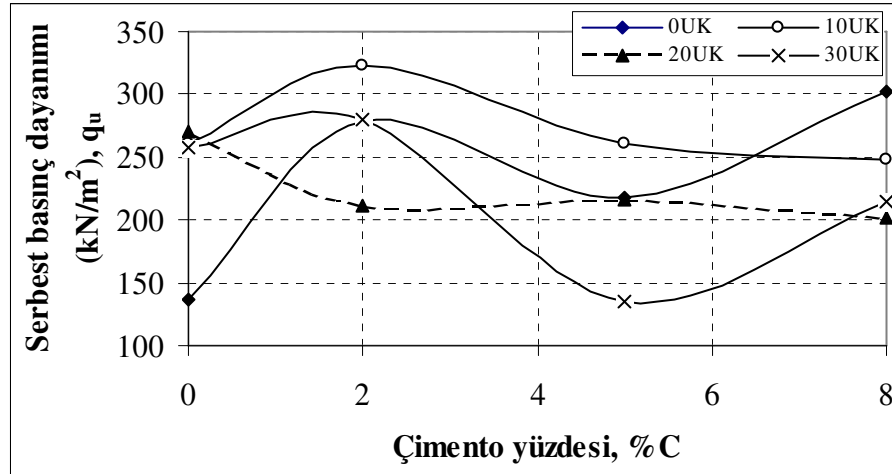
10UK2C numunesinin dayanımı beklenmedik bir şekilde 323 kN/m^2 çıkmış, 7 ve 28 günlük dayanımlar da % 286 ve % 501 gibi büyük artışlar göstermiştir. 7 gün küre bırakılmış 10UK5C numunesinin dayanım artışı 1 gün küre bırakılmış numunenin dayanımına göre % 72 olmuş, bu artış 28 gün küre bırakılmış numunede % 315 olmuştur. 10UK8C numunesinin 7 ve 28 günlük dayanımları 1 günlüğe göre % 174 ve % 535 artış göstermiştir. 20UK2C numunesinin 1 günlük dayanım değeri 212 kN/m^2 olarak tespit edilmiş, bu değer 7 günde % 152, 28 günde ise % 479 artmıştır. 20UK5C numunesinin 7 ve 28 günlük dayanım değerleri 1 günlük dayanım değerine göre sırasıyla % 185 ve % 415 artış göstermiştir. 20UK8C numunesinin 7 ve 28 günlük dayanım değerleri 1 günlüğe göre sırasıyla % 314 ve % 915 artış göstermiştir.

30UK2C numunesinin 1 günlük kür sonucu eksenel gerilmesi 229 kN/m^2 iken 7 gün sonrası için bu değer % 198, 28 gün sonrası için ise % 473 artmıştır. 30UK5C numunesinin 1 gün küre bırakılmış dayanım değeri 135 kN/m^2 gibi düşük bir değer çıkmış, 7 gün küre bırakılmış numunede bu değer % 731, 28 gün küre bırakılmış numunede ise % 1429 gibi çok büyük artış göstermiştir. 30UK8C numunesinin 7 ve 28 günlük dayanım değerleri 1 günlüğe göre sırasıyla % 456 ve % 1081 artış göstermiştir.

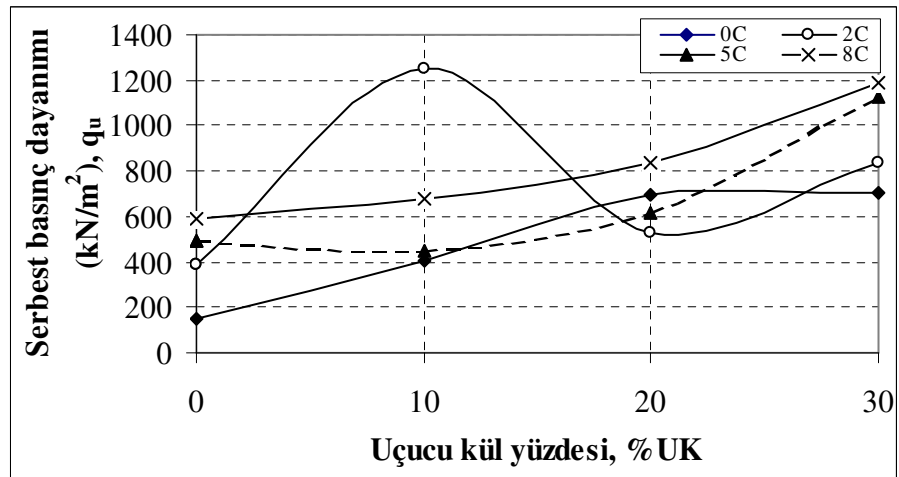
Uçucu kül + çimento karışımı numunelerde 10UK2C numunesi dikkati çekmektedir. Serbest basınç dayanımı 323 kN/m^2 , rezidüel dayanımı ise 55 kN/m^2 çıkarak tüm numuneler içinde en yüksek değerleri elde etmiştir. Bunun muhtemel bir sebebi optimum su muhtevasının oldukça düşük olmasıdır. Uçucu kül + çimento katkılı zeminlerde uçucu kül sabitken çimento miktarı artırıldığında dayanım artış yüzdesi sürekli artmıştır. Burada da 30UK8C numunesi istisna teşkil etmiş, dayanım artışı 30UK5C numunesindeki artıştan düşük çıkmıştır. Bütün numuneler içinde kürün en olumlu etkisi 30UK5C numunesinde görülmüştür.



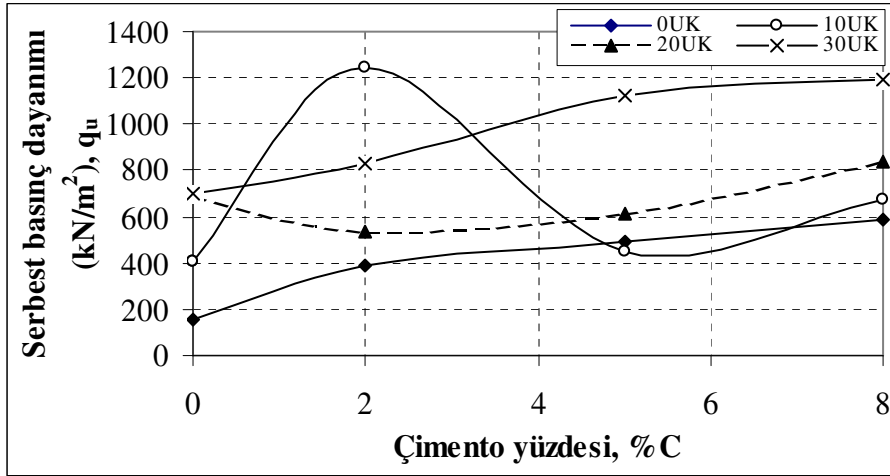
Şekil 5. 14 1 gün küre bırakılmış numunelerde sabit oranda çimentoya uçucu kül eklendikçe serbest basınç dayanımında görülen değişim



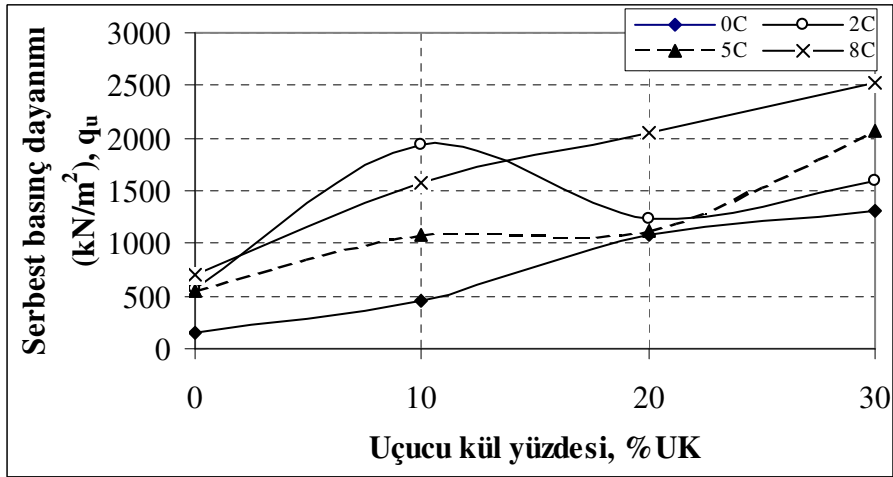
Şekil 5.15 1 gün küre bırakılmış numunelerde sabit oranda uçucu küle çimento eklendikçe serbest basınç dayanımında görülen değişim



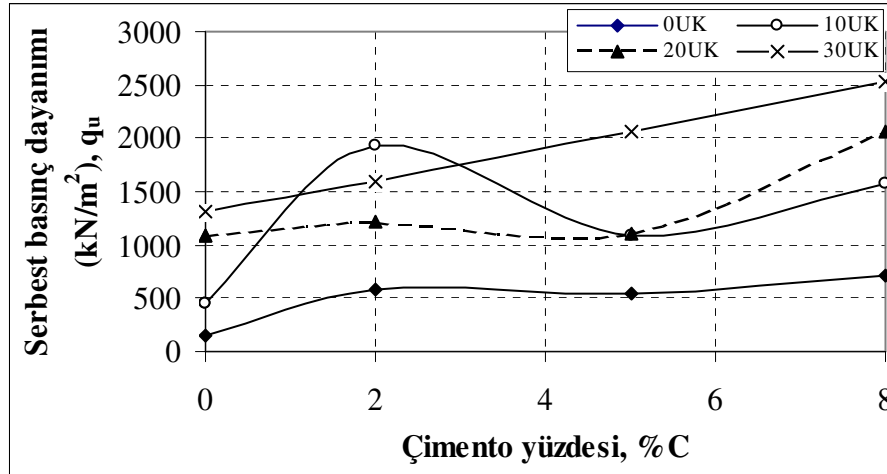
Şekil 5.16 7 gün küre bırakılmış numunelerde sabit oranda çimentoya uçucu kül eklendikçe serbest basınç dayanımında görülen değişim



Şekil 5.17 7 gün küre bırakılmış numunelerde sabit oranda uçucu küle çimento eklendikçe serbest basınç dayanımında görülen değişim



Şekil 5.18 28 gün küre bırakılmış numunelerde sabit oranda çimentoya uçucu kül eklendikçe serbest basınç dayanımında görülen değişim



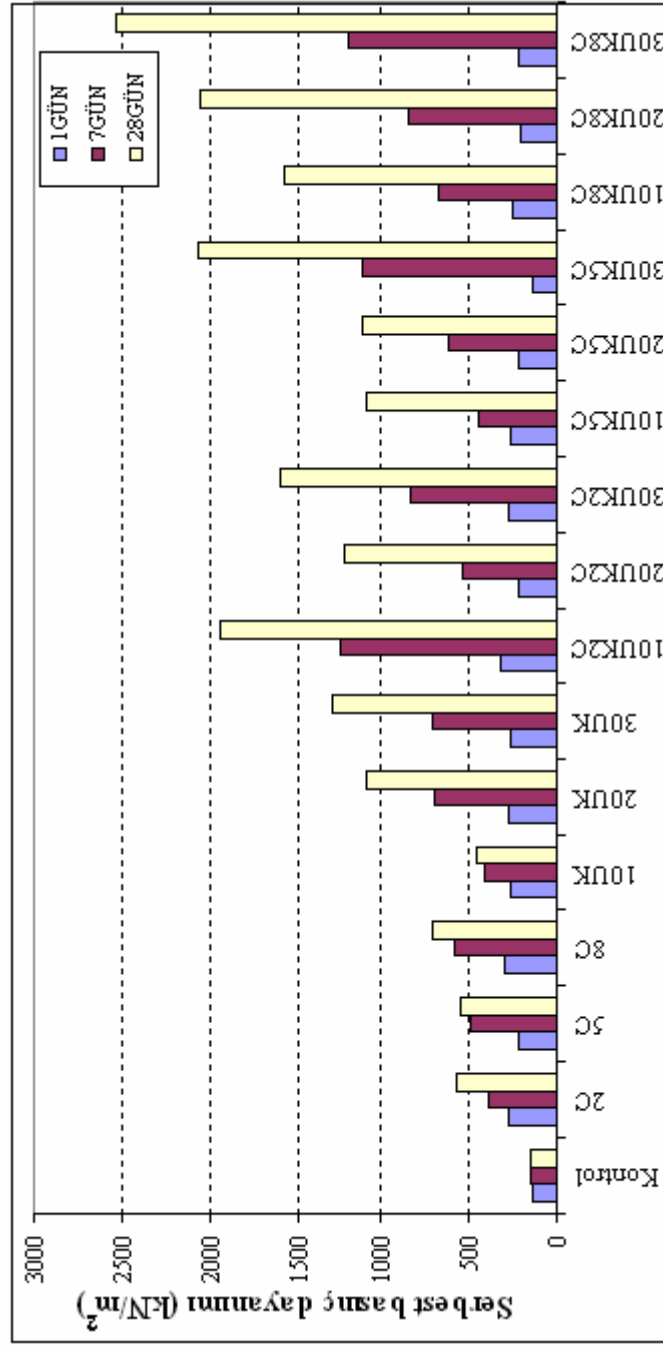
Şekil 5. 19 28 gün küre bırakılmış numunelerde sabit oranda uçucu kül çimento eklendikçe serbest basınç dayanımında görülen değişim

Katkı oranlarından birisi sabit tutulup diğeri arttırıldığında oluşan dayanım eğrileri Şekil 5.14-19'da gösterilmektedir.

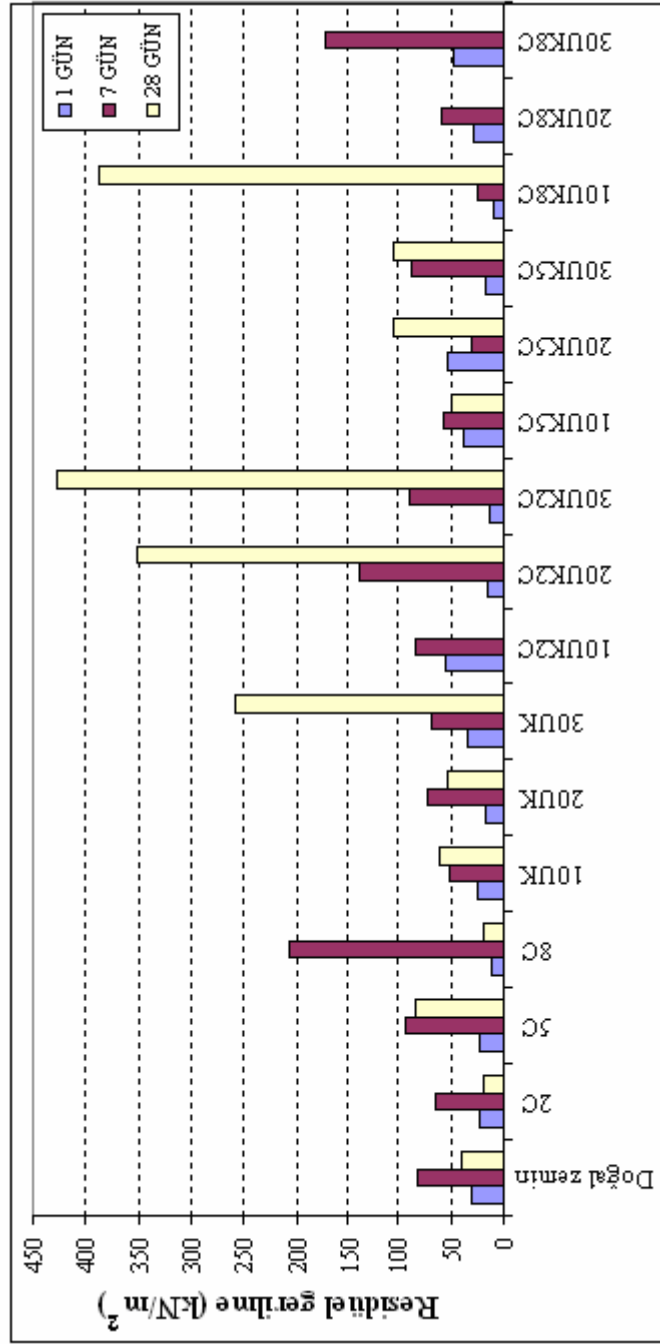
1 gün küre bırakılmış numuneler için çimento oranı sabit tutulup uçucu kül oranı arttırıldığında düzgün bir artış ya da azalış değil, değişken bir davranış görülmüştür. Uçucu kül oranı sabit tutulup çimento oranı arttırıldığında da benzer bir durum görülmüştür.

7 gün küre bırakılmış numunelerde çimento oranları sabit tutulup uçucu kül oranları arttırıldığında genel olarak bir artış görülmektedir. Sadece % 2 çimento oranına % 10 uçucu kül eklendiğinde beklendiğinden çok daha büyük bir artış görülmüştür. En büyük artışlar ise % 8 çimentoya uçucu kül artarak eklendiğinde gerçekleşmiştir. Uçucu kül oranı sabit tutulup çimento oranı arttırıldığında benzer bir durum görülmüş, sadece 10UK2C numunesi özel durumundan dolayı düzgün artışı bozmuştur.

28 gün küre bırakılmış numunelerde çimento oranları sabit tutulup uçucu kül oranları arttırıldığında düzenli bir artış görülmüştür. Diğer kür sürelerinde olduğu gibi yine 10UK2C numunesi eğriyi farklılaştırmıştır. Tüm numunelerde dayanımlar önemli miktarlarda artmışlar, en büyük ve düzgün artış ise sabit % 8 oranında çimentoya uçucu kül artarak eklendiğinde gerçekleşmiştir.



Şekil 5. 20 Tüm zeminlerin kür sürelerine göre dayanımlarının değişimi



Şekil 5. 21 Tüm numunelerin kür sürelerine göre rezidüel gerilmelerinin değişimi

Küre göre ve malzemeye göre sonuçları tek tek inceledikten ve katkılardan birisi sabit tutulup diğeri arttırıldığında ortaya çıkan sonuçları inceledikten sonra genel anlamda şu sonuçlar çıkmaktadır:

- Kür süresinin artışıyla birlikte zeminin dayanımı artmaktadır.
- Doğal zemin numunesinin küre bırakılmasıyla dayanımında fazla bir değişiklik olmamış, tüm numuneler içinde kürün en az etkisi doğal zemin numunesi üzerinde görülmüştür.
- 20UK ve 30UK numunelerine 7 ve 28 günlük kür koşulu uygulandığında özellikle 28 günlük kür sonunda dayanımda büyük oranda artış olduğu görülmüştür. 10UK, 2C, 5C ve 8C numunelerinde bu artış daha azdır.
- Genel olarak uçucu kül ve çimento katkılarının artışıyla, kür süresi de arttıkça dayanım yüzdesinde artış gözlenmektedir.
- Doğal zemine katkı malzemeleri ekledikçe 1 günlük küre bırakılmış zeminlerde oluşan dayanım inişli-çıkışlı bir grafik göstermektedir. Örneğin zemindeki %10 sabit uçucu kül oranına artan oranlarda çimento eklendiğinde dayanım düşmektedir. 7 gün küre bırakılmış numunelerde ise artan katkı maddesi oranı ile düzgün bir dayanım artışı sağlanmıştır.
- 7 günlük küre bırakılmış zeminlerde en büyük dayanıma 10UK2C numunesi sahip olmakla birlikte daha sonraki büyük dayanımlar % 30 uçucu kül oranına eklenen çimento oranlarıyla sağlanmıştır. 28 gün küre bırakılmış numunelerde de durum benzerdir. 10UK2C karışımının beklenenin üstündeki serbest basınç dayanım değerinin optimum su muhtevasının düşüklüğünden ileri gelmesi olasıdır.
- Katkı oranı artışı ile dayanım artışı sağlanırken en büyük değerler % 30 uçucu küle eklenen çimento oranlarıyla elde edilirken diğer büyük değerler 20UK8C ve 10UK2C numunelerininidir.
- 1 günlük küre bırakılmış numunelerde katkılardan birisi sabit tutulup diğeri arttırıldığında serbest basınç dayanımları inişli çıkışlı değişken bir davranış göstermiştir. Yani 1 gün küre bırakılmış zeminlerde katkılardan birisi sabit tutulup diğeri sürekli arttırıldığında dayanımın artması beklenmemelidir. Artış ancak 7 ve özellikle 28 günlük kürlerden sonra gerçekleşecektir.

- En düzgün ve önemli miktarda artışlar ise bünyesinde kuru ağırlıkça % 8 çimento ihtiva eden zeminlere artan miktarda uçucu kül eklendiğinde görülmüştür.

5.6 Donma – Çözülme Deneyi

Doğal zemin ve stabilize zeminin geoteknik özellikleri, donma-çözülme çevrimleriyle değişmekte, suya doymuş zeminlerin dayanım özellikleri olumsuz yönde etkilenmektedir. Soğuk hava koşullarında geoteknik uygulamalarında zemin davranışını en çok etkileyen problemlerden birisi olan donma-çözülme sonrası zeminde bir çok çatlama ve dökülme meydana gelmektedir.

Soğuk hava koşullarına sahip bölgelerdeki zeminler yıl içinde en az bir kere donma-çözülme olayına maruz kalmaktadır. İnce daneli zeminler donma olayına maruz kaldığında buz parçacıkları ilk olarak su potansiyeli en fazla olan ve donma noktasının en yüksek olduğu en büyük gözeneklerde oluşurken sonrasında daha küçük gözeneklerdeki sular donmaktadır. Su buza dönüştüğünde hacmi yaklaşık % 9 artmakta, bu da zemin içinde çatlakların oluşmasına yol açmaktadır (Yıldız vd., 2004). Tekrarlı donma-çözülme çevrimleri sonucu oluşan çatlaklar genişleyerek dayanımın düşmesine neden olmaktadır.

Yapılan birçok çalışma, donma - çözülme döngülerinin stabiliteyi düşürdüğünü göstermektedir (Bullock vd., 1988; Edwards, 1991; Mulla vd., 1992; Staricks ve Benoit, 1995; Dagesse vd., 1997; Bajracharya vd., 1998; Kvaernó ve Øygarden'dan, 2006). Bununla birlikte don olayının stabiliteyi arttırabildiğine dair bazı sonuçlar da mevcuttur (Perfect vd., 1990; Lehrs, 1998). Donma-çözülme çevrimlerinin sebep olduğu çatlaklar ve hasarın sebebi muhtemelen stabilize zeminin permeabilitesinin azalmasından ileri gelmektedir (White, 2002).

Zeminin kayma dayanımı ve stabilitesi kış mevsiminin ardından en düşük değerlere sahip olmaktadır (Øygarden, 2000). Düşük stabilite ve kayma dayanımı, en büyük zemin kayıplarının yaşandığı süreçte ortaya çıkmaktadır.

Donma – çözülme deneylerini gerçekleştirmek için numune hazırlanma standardı serbest basınç dayanımındaki gibidir. Karışımları hazırlanan numuneler optimum su muhtevalarında standart proktor kalıbında sıkıştırıldıktan sonra serbest basınç dayanımına özel tüpler

saplanarak 5 cm'e 10 cm ebatlarında numuneler hazırlanmış olur. Bu numuneler dayanım kazanıp hidratasyonlarının tamamlanması için 28 günlüğüne küre bırakılmışlardır. Kür süresi sonunda numuneler donma – çözülme deneyi uygulamaya hazırdır.

Bu deney çalışmasında doğal zemin, 10UK, 30UK, 10UK2C, 30UK2C, 10UK8C ve 2C numunelerine donma çözülme çevrimleri uygulanmıştır. 1 çevrim, zemin numunesinin önce 1 günlüğüne -18°de, sonrasında 1 günlüğüne ise oda koşullarında bekletilmiş olmasıdır. Bu çalışmada zemin numunelerine 1, 3 ve 7 adet donma – çözülme çevrimi uygulanmıştır. Daha sonra numuneler serbest basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Deneylerden elde edilen sonuçlar kendi aralarında ve donma – çözülmeye uğramamış numunelerin serbest basınç dayanım değerleriyle karşılaştırılarak bu fiziksel olayın doğal zemine, uçucu kül katkılı, çimento katkılı ve her ikisinin de bulunduğu zemine olumlu ya da olumsuz etkileri incelenmiştir.

Sonuçlarda en çok dikkati çeken nokta su muhtevalarındaki aşırı düşüştür. 28 gün kür için bırakılıp daha sonra donma-çözülme döngülerine uğrayan numuneler etrafları sarılmadan doğal halleriyle bulunmuşlardır. Dolayısıyla bu süreç içinde numuneler su kaybederek giderek kuru hale gelmişlerdir. Kuruma zemin içindeki boşlukların kapanmasına ve zeminin daha sıkı hale gelerek mukavemetinin artmasına yol açmıştır. Sonuç olarak donma-çözülme sonrasında zemin karışımları mukavemet kazanmışlar, bu artış kür süresinin de artışıyla ivme kazanmıştır. Bu yüzden bir grup deney daha yapılmış, bu deneyde zemin numuneleri streç filmlerle kat kat sarılarak korunmalı hale getirilmişlerdir. Böylelikle su muhtevası kaybı en aza indirilmiş, donma-çözülme döngüleriyle azalan dayanım eğrileri gözlenmiştir.

Öncelikle su muhtevası kaybına uğrayan ilk zemin grubuna ait sonuçlar ve yorumlara yer verilecektir. Sonuçların yer aldığı grafikler Ekler bölümünde olup burada daha yorumsal grafiklere yer verilmiştir.

Tablo 5. 7 1 çevrimlik donma-çözölmeye bırakılmış birinci grup numunelerin serbest basınç dayanım ve rezidüel gerilme değerleri

Çevrim sayısı			1
Numune	Serbest Basınç Dayanımı (kN/m²)	Rezidüel Gerilme (kN/m²)	
Doğal zemin	154	41	
10UK	515	24	
30UK	1236	62	
2C	596	34	
10UK2C	1427	43	
10UK8C	1212	31	
30UK2C	1864	60	

Tablo 5. 8 3 çevrimlik donma-çözölmeye bırakılmış birinci grup numunelerin serbest basınç dayanım ve rezidüel gerilme değerleri

Çevrim sayısı			3
Numune	Serbest Basınç Dayanımı (kN/m²)	Rezidüel Gerilme (kN/m²)	
Doğal zemin	511	37	
10UK	473	18	
30UK	1806	28	
2C	555	17	
10UK2C	1862	0	
10UK8C	1940	384	
30UK2C	2349	0	

Tablo 5. 9 7 çevrimlik donma-çözölmeye bırakılmış birinci grup numunelerin serbest basınç dayanım ve rezidüel gerilme değerleri

Çevrim sayısı			7
Numune	Serbest Basınç Dayanımı (kN/m²)	Rezidüel Gerilme (kN/m²)	
Doğal zemin	1165	141	
10UK	488	52	
30UK	1997	0	
2C	668	83	
10UK2C	2025	0	
10UK8C	2122	247	
30UK2C	2707	0	

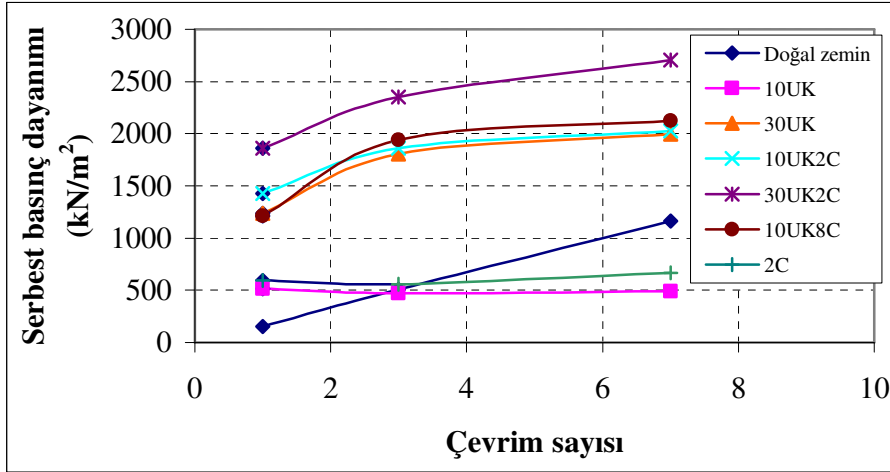
Tablo 5. 10 Donma-çözölme çevrimleri sonrası birinci grup numunelerin su muhtevaları

Numune	ω_{opt} (%)	1 Don-çöz çevrimi sonrası ω (%)	3 Don-çöz çevrimi sonrası ω (%)	7 Don-çöz çevrimi sonrası ω (%)
Doğal zemin	16	15	5,3	1,7
2C	18	12	5,4	1,9
10UK	20	17	7,1	1,9
30UK	22	17	6,3	3,1
10UK2C	16	13	5,7	2,1
10UK8C	23	17	8,7	4,2
30UK2C	21	16	5,4	4,1

1 donma-çözülme çevrimine bırakılan zeminler incelendiğinde en büyük dayanımı en fazla katkı malzemesine sahip olan 30UK2C numunesi elde etmiştir. En düşük dayanım ise doğal zemin numunesinindir. Bu zeminlerin davranışlarında dikkati çeken nokta katkı malzemelerine sahip olan tüm zeminlerin pik değerlere ulaştıktan sonra ani bir kırılmayla düşük rezidüel değerlere ulaşmasıdır. Bu zeminler 28 günlük kür ve sonrasında 1 donma-1 çözülme sonucu gevrek hale gelmişlerdir. Doğal zemin numunesi ise azar artışlarla pik değere ulaştıktan sonra bu sefer azar azalışlarla rezidüel dayanımı elde eder.

3 donma-çözülme çevrimine bırakılan zeminler içinde en büyük dayanımı yine 30UK2C numunesi elde etmiştir. En düşük dayanım ise farklı olarak 10UK numunesinin olup kontrol ile 2C numuneleri yaklaşık değerler elde etmişlerdir. 10UK2C, 10UK8C, 30UK numuneleri de yaklaşık değerler elde etmişlerdir. Diğerlerine göre bariz dayanım üstünlüğü olan 30UK2C, 10UK2C, 10UK8C ve 30UK numuneleri pik değerler ulaştıktan sonra yine gevrek davranış göstermişler, hatta 10UK2C ile 30UK2C numuneleri tamamen dağılarak 0 rezidüel gerilmelere sahip olmuşlardır.

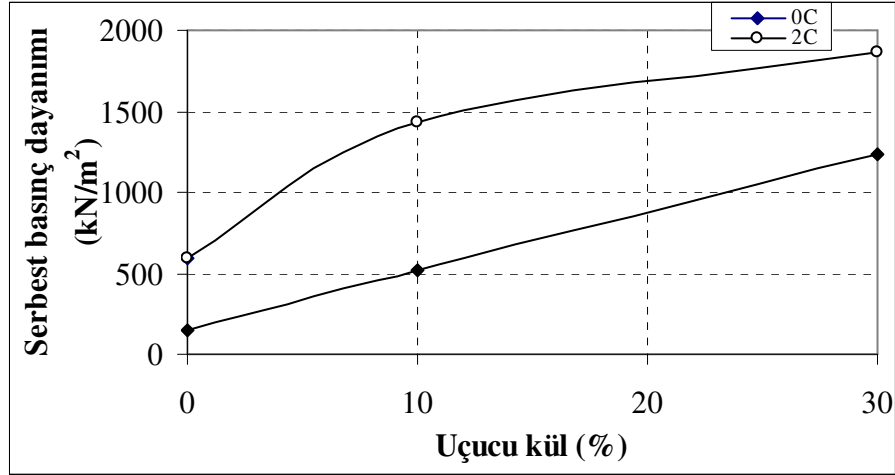
7 donma-çözülme çevrimine bırakılan zeminler içinde en büyük dayanımı diğerlerinde olduğu gibi 30UK2C numunesi elde etmiştir. Daha sonra sırasıyla 10UK8C, 10UK2C ve 30UK numuneleri yaklaşık değerler elde etmişlerdir. En düşük dayanım ise 10UK numunesinindir. Doğal zemin numunesi 7 çevrim sonrası beklenmedik bir dayanım artışı göstermiştir. Serbest basınç dayanımları büyük olan gevrek zeminler burada da ani düşüşler göstermişler, 10UK2C, 30UK2C ve 30UK numuneleri ani patlamalarla 0 rezidüel dayanım elde etmişlerdir.



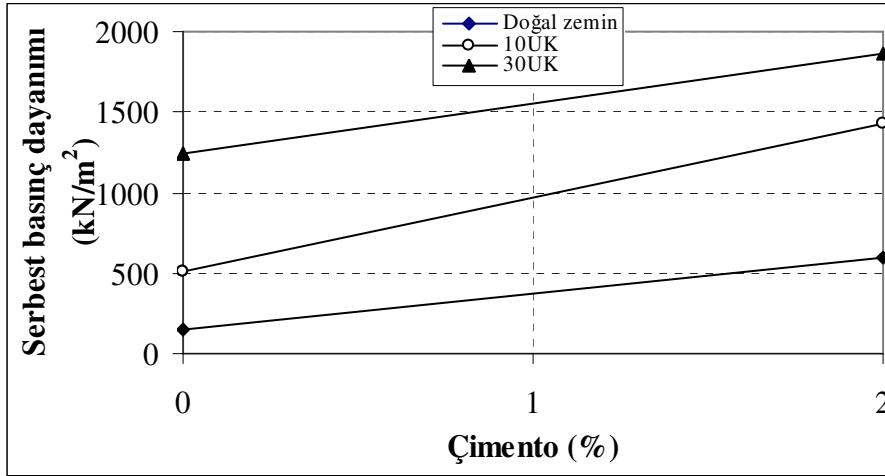
Şekil 5. 22 Birinci grup zemin karışımlarının artan çevrim sayısı ile serbest basınç dayanımlarının değişimi

Doğal zemin numunesi 1 kez, 3 kez ve 7 kez donma-çözülme çevrimine bırakıldığında dayanımları sırasıyla % 4, % 245 ve % 687 artarak en büyük oranda artışları göstermiştir. 10UK numunesi ise değişken bir görünüm sergileyerek önce % 14, sonra % 5, en sonunda % 8 artış göstermiştir. 30UK numunesi ise 1 çevrim sonucu % 5 oranında dayanım kaybına uğrarken 3 çevrim sonucu % 39, 7 çevrim sonucu % 53 dayanım artışına sahip olmuştur. 10UK2C numunesinin 28 günlük serbest basınç dayanımı 1940 kN/m^2 iken 1 donma-çözülme döngüsü sonucu % 26'lık bir kayba uğrayarak 1427 kN/m^2 eksenel gerilmeye sahip olmuştur. Böylece tüm numuneler içinde en büyük dayanım kaybı 10UK2C numunesinde 1 çevrimlik donma-çözülme sonucu oluşmuştur. Bu numunedeki 3 çevrim sonunda % 4 dayanım kaybı, 7 çevrim sonunda % 4 dayanım artışı görülmüştür. 30UK2C numunesinde ise düzenli bir artış görülmüştür. 1, 3 ve 7 çevrim sonunda eksenel gerilmeler sırasıyla % 17, % 47 ve % 69 artış göstermiştir. 10UK8C numunesi 1 donma-çözülme çevrim sonucu % 23'lük dayanım kaybına uğrayarak 1212 kN/m^2 lik eksenel gerilmeye sahip olurken bu değişim 3 ve 7 çevrimler sonucu % 23 ve % 35'lik artışlar şeklinde kendini göstermiştir. 2C numunesi de değişken bir davranış içinde 28 günlük serbest basınç dayanım değerine göre 1 çevrimde % 4 artış, 3 devirde % 3 azalış, 7 devirde % 16 artış göstermiştir.

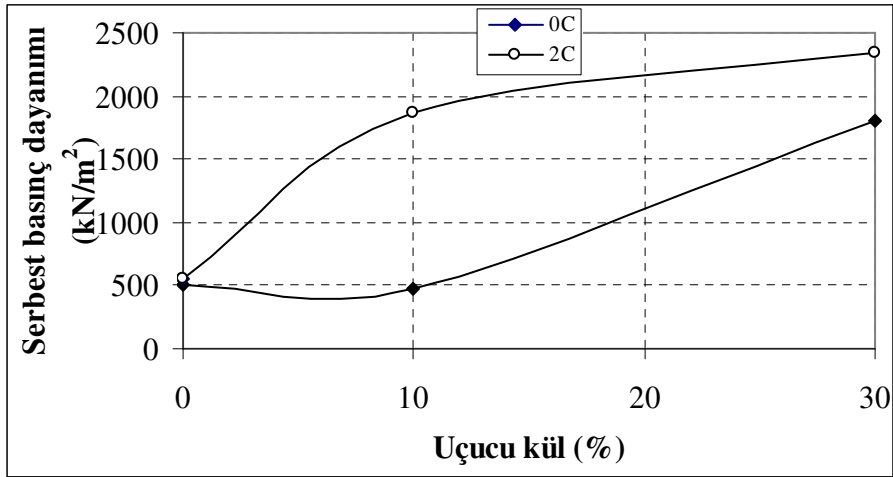
Doğal zemine sırasıyla % 10 ve % 30 oranlarında uçucu kül ilave edip artan sürelerde donma-çözölmeye bırakıldığında serbest basınç dayanım değeri artmaktadır. % 2 çimentoya sahip zemine % 10 ve % 30 uçucu kül ilave edildiğinde mukavemetler daha da büyük değere ulaşmaktadır. Özet olarak doğal zemin ya da katkılı herhangi bir zemin 1-3 ve 7 çevrimlik donma-çözölmeye bırakıldığında gevrek bir davranışa sahip olarak serbest basınç dayanımları giderek artmaktadır.



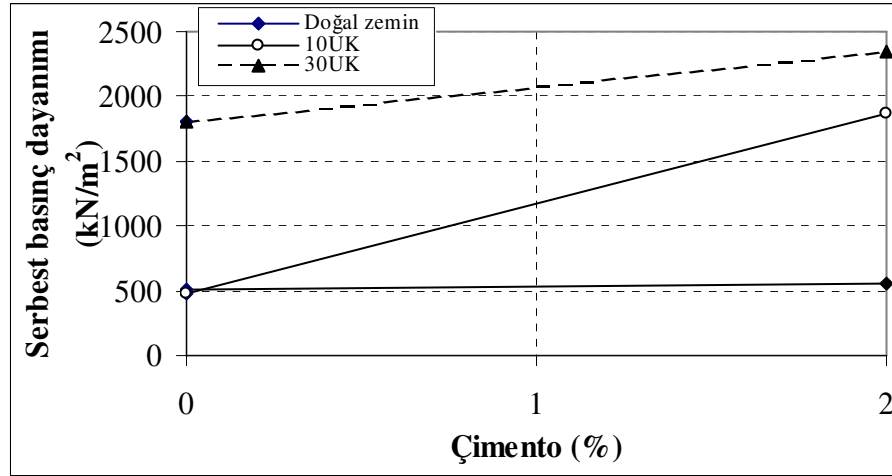
Şekil 5. 23 1 donma-çözölmeye çevrimine bırakılan birinci grup numunelerde sabit oranda çimentoya uçucu kül eklendikçe serbest basınç dayanımında görölen değışim



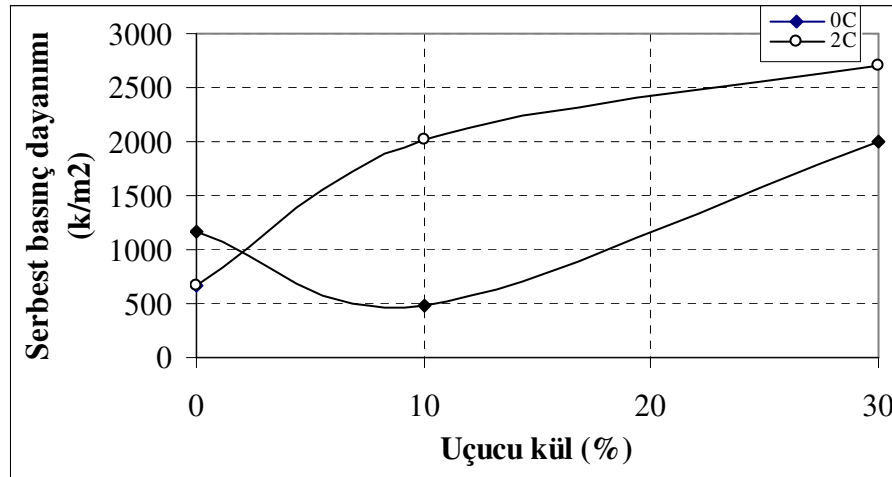
Şekil 5. 24 1 donma-çözülme çevrimine bırakılan birinci grup numunelerde sabit oranda uçucu küle çimento eklendikçe serbest basınç dayanımında görülen değişim



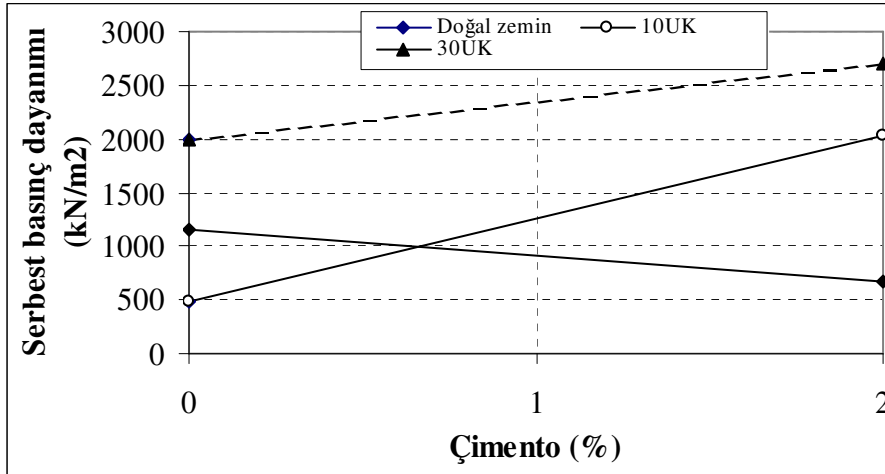
Şekil 5. 25 3 donma-çözülme çevrimine bırakılan birinci grup numunelerde sabit oranda çimentoya uçucu kül eklendikçe serbest basınç dayanımında görülen değişim



Şekil 5. 26 3 donma-çözülme çevrimine bırakılan birinci grup numunelerde sabit oranda uçucu küle çimento eklendikçe serbest basınç dayanımında görülen değişim



Şekil 5. 27 7 donma-çözülme çevrimine bırakılan birinci grup numunelerde sabit oranda çimentoya uçucu kül eklendikçe serbest basınç dayanımında görülen değişim

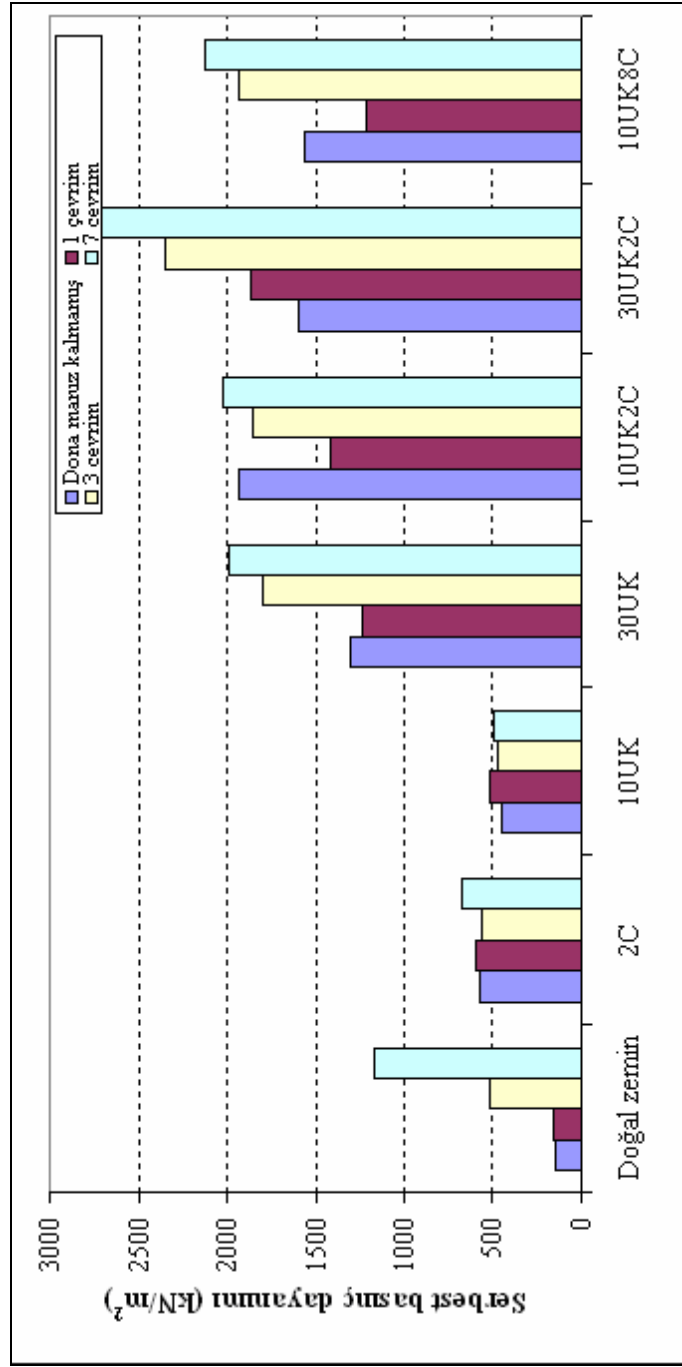


Şekil 5. 28 7 donma-çözülme çevrimine bırakılan birinci grup numunelerde sabit oranda uçucu küle çimento eklendikçe serbest basınç dayanımında görülen değişim

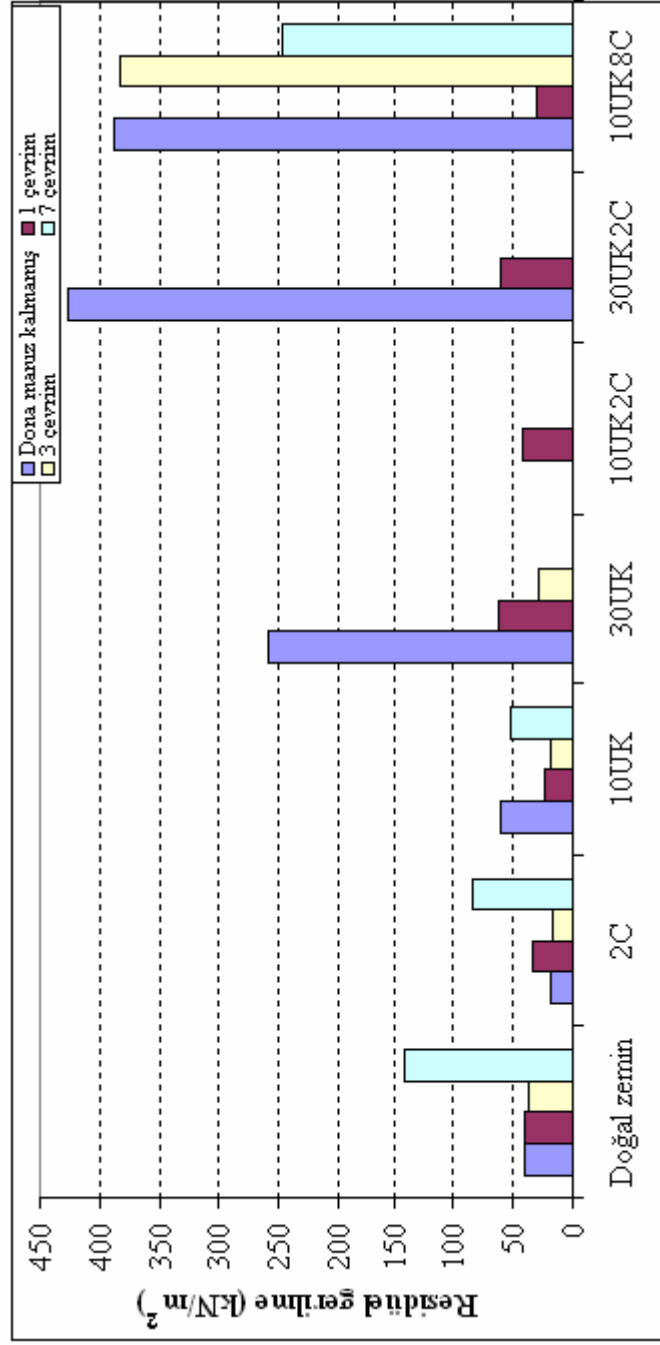
1 donma-çözülme çevrimine bırakılan zemin karışımlarında sabit oranda çimentoya uçucu kül ilave edildiğinde düzgün dayanım artışı görülmüş, artışın büyüklüğü % 2 çimentodan daha büyük olmuştur. Uçucu kül sabit tutulup çimento arttırıldığında da benzer düzgün artışlar görülmüştür.

3 donma-çözülme çevrimine bırakılan numunelerde çimento sabit tutulup uçucu kül arttırıldığında artış görülmekle birlikte sadece uçucu küllü zeminlerde uçucu kül miktarının artışıyla dayanımda görülen değişim logaritmik bir eğri şeklinde olmuştur.

7 donma-çözülme çevrimine maruz kalmış zemin karışımlarında % 2 sabit çimento oranına artan oranlarda uçucu kül eklenmesiyle mukavemetler artış göstermiş; sadece uçucu küllü zeminde uçucu kül artışıyla mukavemet önce azalış, sonra artış göstermiştir. Bunun muhtemel sebebi doğal zeminin aşırı su kaybederek kuru hale gelmesi ve beklenenden fazla mukavemete sahip olmasıdır.



Şekil 5. 29 Donma-çözölmeye 1-3 ve 7 çevrimle maruz bırakılan 1. grup numuler ile bu etkiye bırakılmayan numunelerin serbest basınç dayanımlarının kıyaslanması



Şekil 5. 30 Donma-çözülme 1-3 ve 7 çevrimle maruz bırakılan 1. grup numular ile bu etkiye bırakılmayan numunelerin rezidüel gerilmelerinin kıyaslanması

2. deney grubu olan su muhtevası korunmuş numuneler için deney prosedürü aynı olup sadece küre ve donma-çözölmeye bırakılan numuneler streç filmlerle sarılmışlardır. Sonuçlar aşağıda tablo olarak verilmiş; sonuçların grafiksel gösterimleri ise Ekler bölümünde yer almaktadır. Katkı oranı artırıldığında ve çevrim sayısı artırıldığında dayanımlarda görölen değışimleri yansıtan grafiklere de bu bölümde yer verilmiştir.

Tablo 5. 11 1 donma-çözölme çevrimine bırakılmış ikinci grup numunelerin serbest basınç dayanım ve rezidüel gerilme değeri

Çevrim sayısı 1		
Numune	Serbest Basınç Dayanımı (kN/m ²)	Rezidüel Gerilme (kN/m ²)
Doğal zemin	141	30
10UK	447	52
30UK	1289	103
2C	581	40
10UK2C	1764	26
10UK8C	1500	92
30UK2C	1621	101

Tablo 5. 12 3 donma-çözölme çevrimine bırakılmış ikinci grup numunelerin serbest basınç dayanım ve rezidüel gerilme değeri

Çevrim sayısı 3		
Numune	Serbest Basınç Dayanımı (kN/m ²)	Rezidüel Gerilme (kN/m ²)
Doğal zemin	121	35
10UK	407	41
30UK	1251	82
2C	481	11
10UK2C	1645	0
10UK8C	1538	130
30UK2C	1504	3

Tablo 5. 13 7 donma-çözülme çevrimine bırakılmış ikinci grup numunelerin serbest basınç dayanım ve rezidüel gerilme değerleri

Çevrim sayısı 7		
Numune	Serbest Basınç Dayanımı (kN/m ²)	Rezidüel Gerilme (kN/m ²)
Doğal zemin	112	20
10UK	398	50
30UK	1208	14
2C	454	21
10UK2C	1692	0
10UK8C	1401	52
30UK2C	1495	0

Tablo 5. 14 Donma-çözülme çevrimleri sonrası ikinci grup numunelerin su muhtevaları

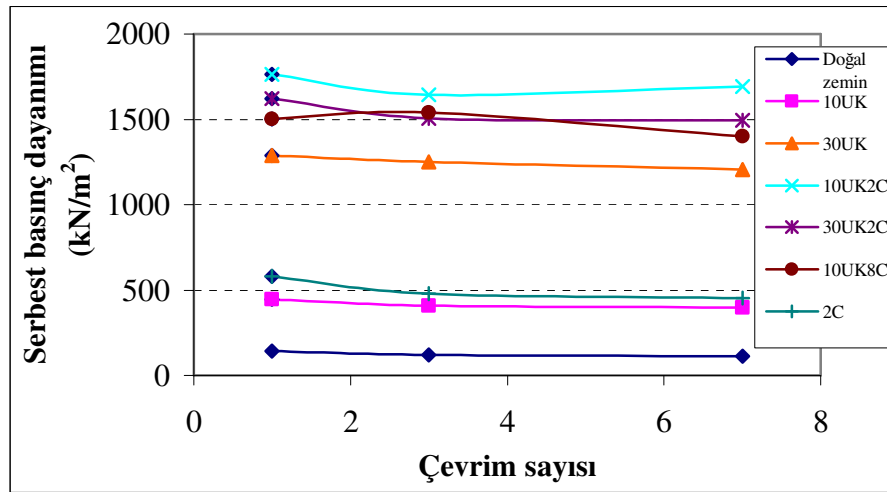
Numune	ω_{opt} (%)	1 Don-çöz çevrimi sonrası ω (%)	3 Don-çöz çevrimi sonrası ω (%)	7 Don-çöz çevrimi sonrası ω (%)
Doğal zemin	16	15.8	15.5	15.1
2C	18	17.6	17.1	17.1
10UK	20	19.8	19.4	19.3
30UK	22	22.1	21.91	21.8
10UK2C	16	16.1	15.9	16.0
10UK8C	23	23.1	23.1	22.9
30UK2C	21	21.2	21.1	20.9

Donma-çözülme çevrimleri sonucu mukavemetlerde oluşan değişiklikler zemin karışımlarının hepsi için ayrı ayrı incelenmiştir. Serbest basınç deneylerinde 28 gün kür sonucu elde edilen dayanım değerleri ile 1, 3 ve 7 donma-çözülme çevrimine bırakıldıktan sonra elde edilen serbest basınç dayanım değerleri kıyaslanmıştır.

1 donma-çözülme çevrimine bırakılan zeminler içinde en büyük dayanımı 10UK2C numunesi, en düşük dayanımı ise doğal zemin elde etmiştir. 10UK2C numunesi aynı zamanda dondan en çok etkilenen zemin çeşidi olup dayanımının yaklaşık %10'unu kaybetmiştir. 30UK2C ve 2C numunelerinde ise küçük de olsa dayanım artışı dahi görülmüştür. 1 donma-çözülme tam olarak fikir vermemekle birlikte katkı oranı fazla olan numunelerin dona dayanıklılığının daha fazla olması dikkati çeken bir unsurdur.

3 donma- çözülme çevrimine bırakılan numunelerden en büyük dayanımı yine 10UK2C numunesi, en düşük dayanımı beklendiği gibi doğal zemin elde etmiştir. 3 çevrimde doğal zemin üzerindeki tahribat büyük olmuş, dayanımının % 18.51'ini kaybetmiştir. Diğer zemin karışımlarında da durum benzer olmuş, 1 çevrimden 3 çevrime geçerken en büyük azalmalar yaşanmıştır.

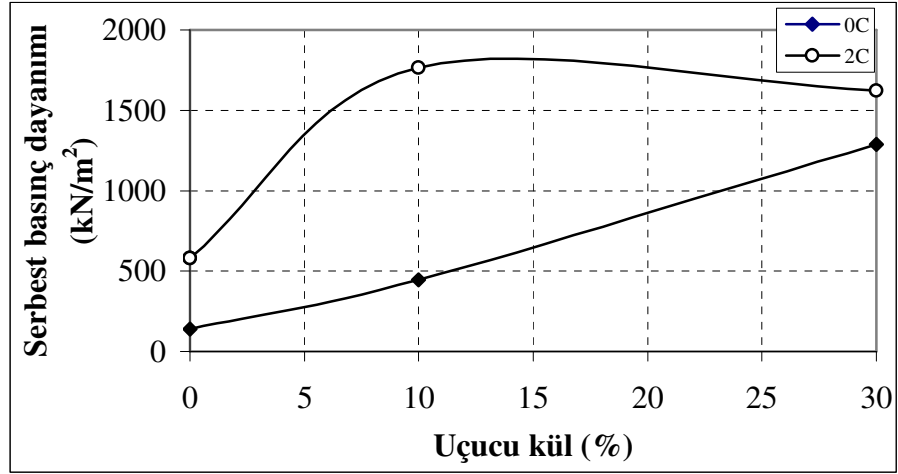
7 donma-çözülme çevrimine bırakılan numuneler içinde en büyük dayanımı 10UK2C numunesi, en düşük dayanımı doğal zemin numunesi elde etmiştir. 30UK2C, 10UK8C numuneleri de yüksek mukavemet değerleri elde etmişlerdir. 10UK ve 2C numuneleri doğal zemine en az katkı ilave edilen zemin çeşitleri olup düşük dayanım değerleriyle donma-çözülmeden hayli olumsuz yönde etkilenmişlerdir.



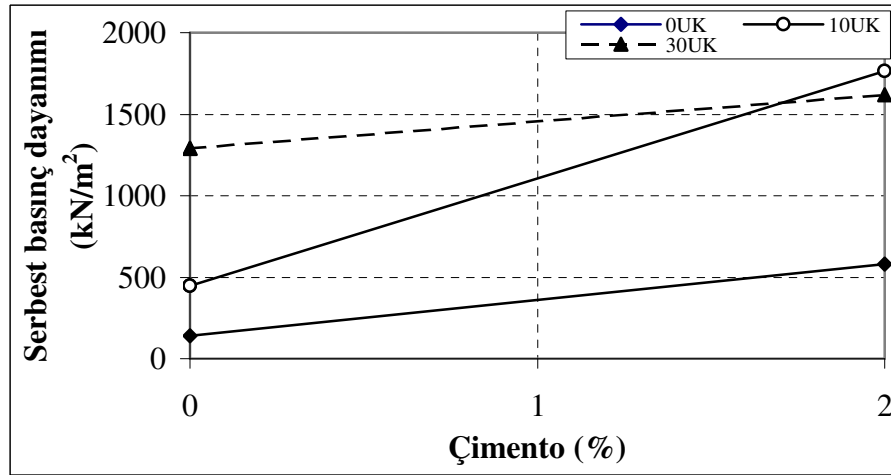
Şekil 5. 31 İkinci grup zemin karışımlarının artan çevrim sayısı ile serbest basınç dayanımlarının değişimi

Çevrim sayısının artışının zeminlerin mukavemetine etkisi Şekil 5.31’de gösterilmiştir. Doğal zemin numunesinin mukavemet değerleri 1, 3 ve 7 donma-çözülme çevrimi sonucu sırasıyla % 5, 19 ve 25 azalarak en büyük dayanım kayıplarını göstermiştir. Diğer katkılı zemin numuneleri daha düşük dayanım kaybı oranları göstermişler, bu da doğal zemine uçucu kül ve çimento ilave edildiğinde zeminin donma-çözölmeye daha dirençli olduğunu göstermiştir. 10UK, 2C ve 10UK2C numuneleri, 30UK, 30UK2C ve 10UK8C numunelerine göre daha büyük dayanım kaybı oranları elde etmişlerdir. Bu diğer numunelerin daha fazla katkı oranlarına sahip olmasından ileri gelmektedir.

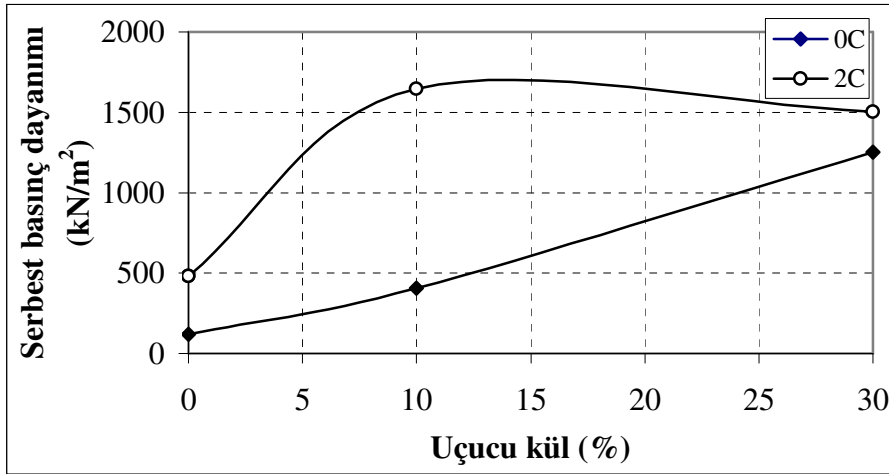
10UK numunesi 1 donma-çözölme sonrası fazla değişiklik göstermezken 3 ve 7 çevrim sonrası % 18 ve 12 dayanım kaybı yaşamıştır. 30UK numunesi de ilk donma-çözölme çevrimi sonrası 28 günlük dayanıma yakın bir değer elde ederken 3 ve 7 çevrim sonrası % 4 ve 7’lik düzgün bir azalış göstermiştir. 10UK2C numunesi tüm donma-çözölme numuneleri içinde en büyük 28 günlük serbest basınç dayanımına sahip zemin karışımıdır. Bu zemin karışımı dondan en fazla etkilenen zeminlerden birisi olup 1 çevrim sonrası sonrası bile % 10 dayanım kaybına gitmiştir. 30UK2C numunesi ise 1 çevrim sonrası çok az bir artış gösterdikten sonra 3 ve 7 çevrim sonrası % 6 ve 6.5 dayanım kayıpları yaşamıştır. 10UK8C numunesi 1, 3 ve 7 çevrim sonrası sırasıyla % 4.5, 2 ve 11 azalış göstermiştir. Doğal zemin numunesine eklenen en düşük katkı malzemesi ile oluşan 2C numunesi 1 donma-çözölme çevrimi sonucu % 1 dayanım artışı gösterirken 3 ve 7 çevrimle dayanımlar % 16 ve 21 azalış göstermişlerdir. Bu da doğal zeminden sonraki en büyük azalış oranıdır.



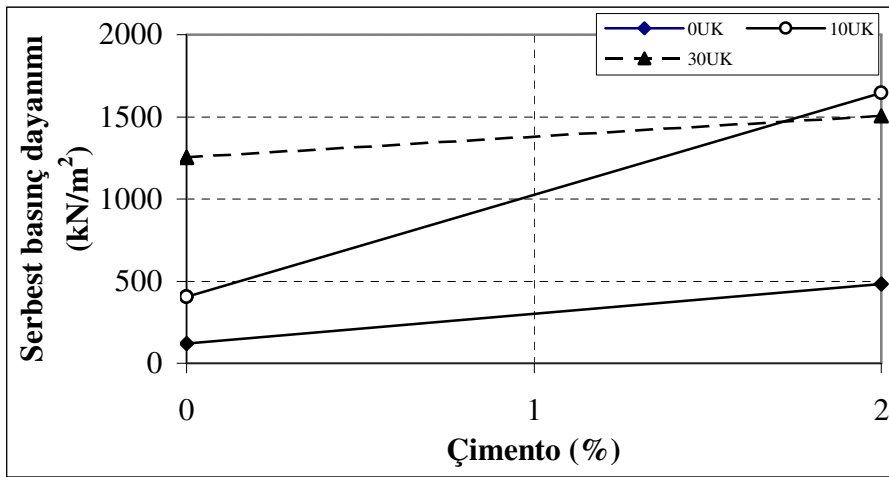
Şekil 5.32 1 donma-çözülme çevrimine bırakılan ikinci grup numunelerde sabit oranda çimentoya uçucu kül eklendikçe serbest basınç dayanımında görülen değişim



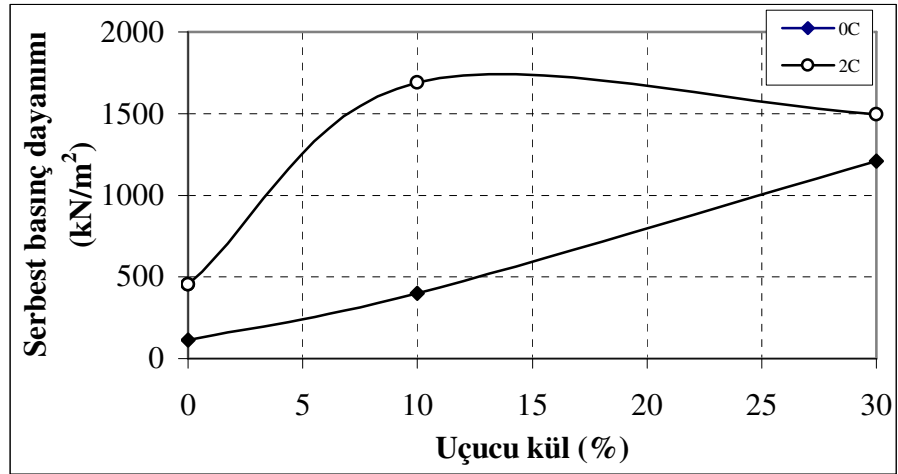
Şekil 5.33 1 donma-çözülme çevrimine bırakılan ikinci grup numunelerde sabit oranda uçucu küle çimento eklendikçe serbest basınç dayanımında görülen değişim



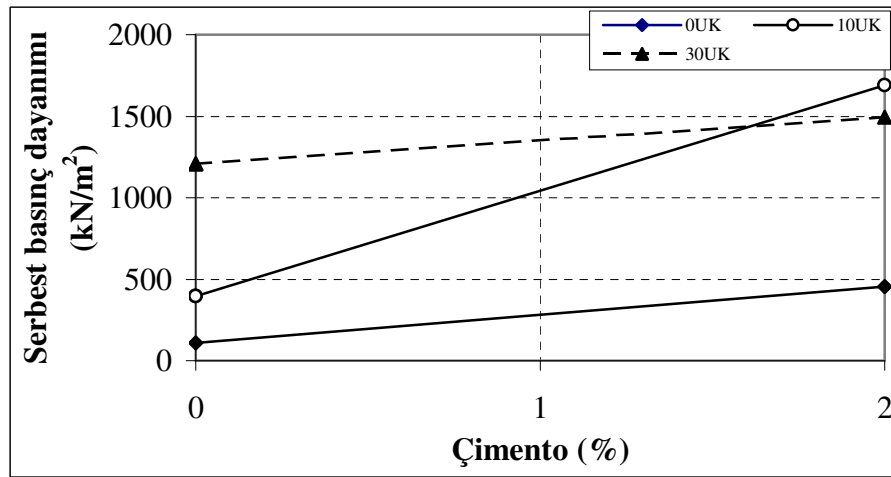
Şekil 5. 34 3 donma-çözülme çevrimine bırakılan ikinci grup numunelerde sabit oranda çimentoya uçucu kül eklendikçe serbest basınç dayanımında görülen değişim



Şekil 5. 35 3 donma-çözülme çevrimine bırakılan ikinci grup numunelerde sabit oranda uçucu küle çimento eklendikçe serbest basınç dayanımında görülen değişim



Şekil 5. 36 7 donma-çözülme çevrimine bırakılan ikinci grup numunelerde sabit oranda çimentoya uçucu kül eklendikçe serbest basınç dayanımında görülen değişim



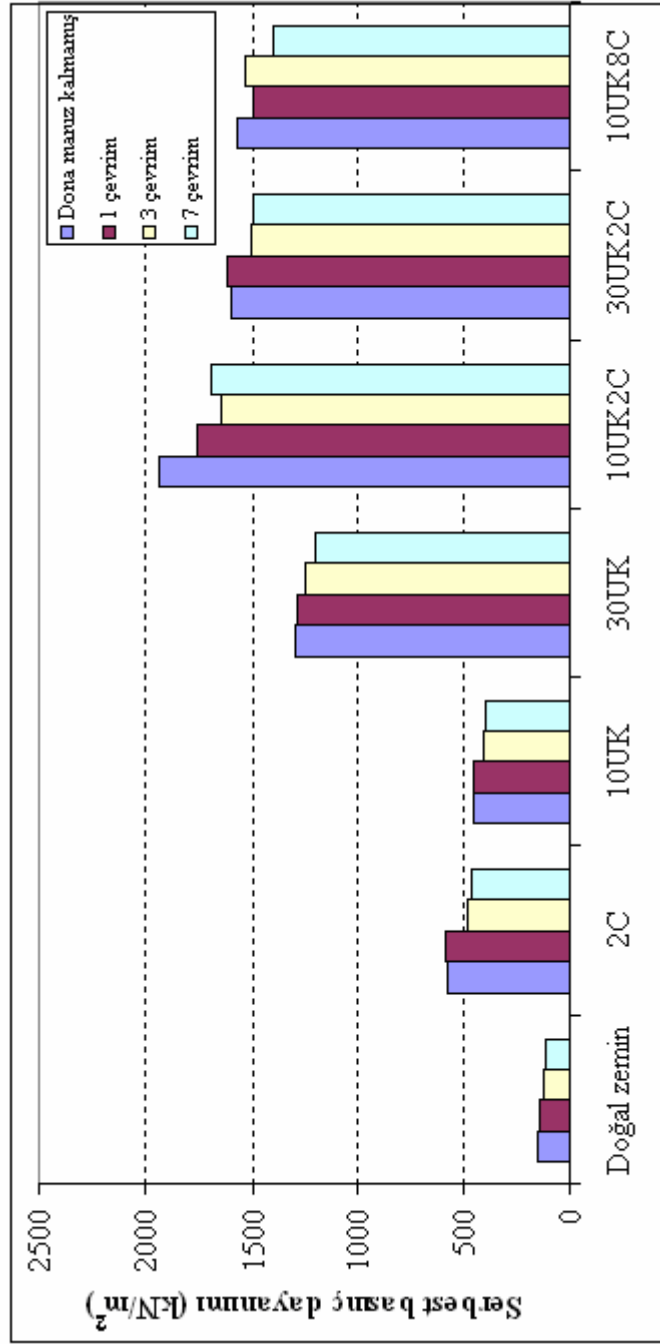
Şekil 5. 37 7 donma-çözülme çevrimine bırakılan ikinci grup numunelerde sabit oranda uçucu küle çimento eklendikçe serbest basınç dayanımında görülen değişim

1 donma-çözülme çevrimine maruz kalmış sadece uçucu kül katkılı zemin karışımlarında uçucu kül yüzdesi arttıkça serbest basınç dayanımı düzenli olarak artmaktadır. % 2 çimento muhtevasına % 10 uçucu kül eklemek yeterli olurken % 30 uçucu kül eklendiğinde düşüş görülmüştür. Sadece çimento katkılı karışımlarda zemine % 2 çimento eklendiğinde dayanım önemli miktarda artmıştır.

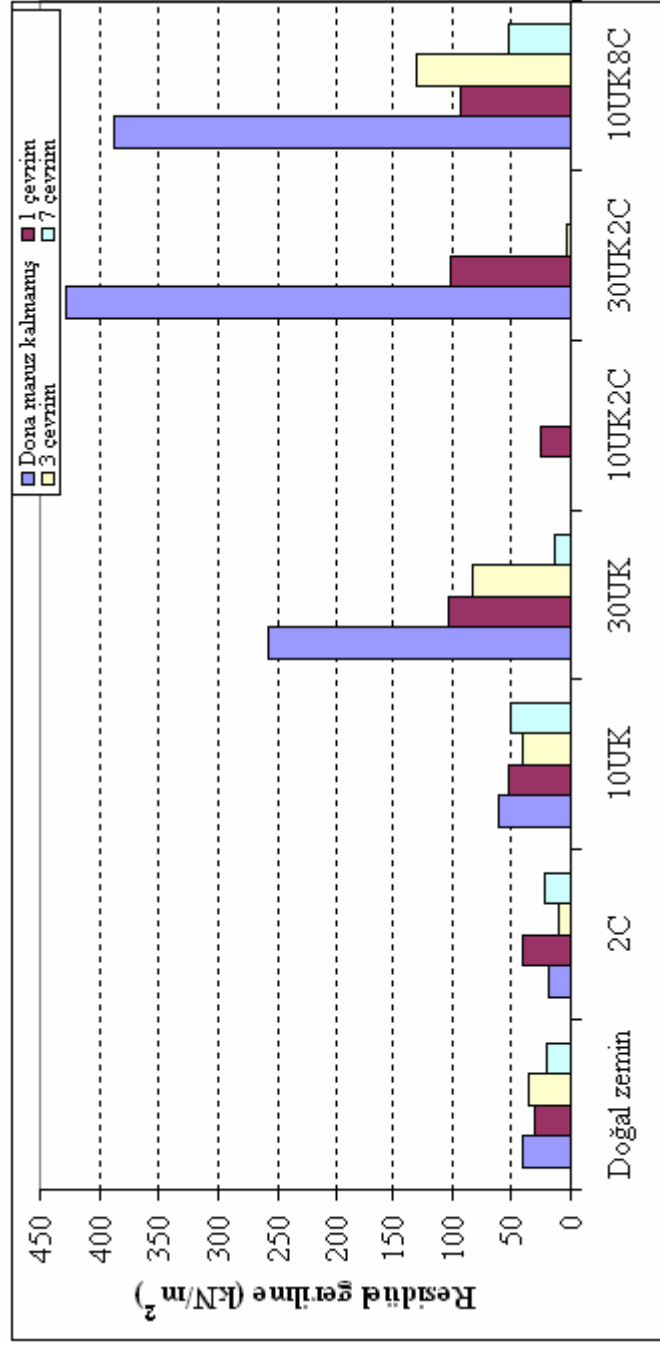
3 ve 7 donma-çözülme çevrimi sonuçlarından yola çıkarak çizilen grafikler 1 çevrim grafiğine çok benzemektedir. Yani 3 ve 7 çevrimde de durum benzerdir. Şekil 5.32-37'ye bakıldığında bu durum rahatlıkla görülmektedir.

Donma-çözülme deneylerinden şu sonuçlar çıkarılabilmektedir.

- İlk grup deneylerde zemin karışımları doğal halleriyle donma-çözümeye çevrimlerine bırakılmış; bunun sonucunda zeminlerin su muhtevaları büyük düşüşler göstererek zemin yapıları daha sıkı bir hale gelmiştir. Serbest basınç deneyleri sonuçlarından da anlaşılabileceği üzere zemin su muhtevası korunmayarak donma-çözümeye bırakıldığı takdirde mukavemetleri artış gösterecektir. Bu artışın çevrim sayısı arttıkça ivme kazanması, su muhtevasını giderek düşmesinden kaynaklanmaktadır. Tablo 5.7-10 bu durum hakkındaki sonuçlara yer vermektedir.
- İkinci grup deneylerde zemin karışımları streç filmlerle iyice sarılarak donma-çözülme çevrimlerine bırakılmışlardır. Tablo 5.11-14'den görüleceği üzere su muhtevaları büyük oranda korunmuştur. Bunun sonucunda mukavemet kayıpları yaşanmış; bu kayıplar çevrim sayısının artmasıyla artış göstermiştir. En büyük kayıplar doğal zemine artarak uygulanan donma çözülme çevrimlerinde görülürken, uçucu kül ve çimento katkılı zeminler daha az etkilenmişlerdir. Uçucu kül ve çimento yüzdesi arttıkça mukavemet azalma oranı düşmüştür. 10UK2C karışımı en büyük dayanıma sahip olurken 30UK2C ve 10UK8C daha sonraki büyük mukavemet değerlerine sahip zemin karışımları olmuşlardır.



Şekil 5. 38 Donma-çözülmeye 1-3 ve 7 çevrimle maruz bırakılan 2. grup numuneler ile bu etkiye bırakılmayan numunelerin eksenel gerilmelerinin kıyaslanması



Şekil 5. 39 Donma-çözölmeye 1-3 ve 7 çevrimle maruz bırakılan 2. grup numuneler ile bu etkiye bırakılmayan numunelerin rezidüel gerilmelerinin kıyaslanması

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu deney çalışması kapsamında Turgutlu yöresinden tedarik edilen silt zemin ile C sınıfı uçucu kül ve portland çimentosu belli oranlar dahilinde, optimum su muhtevalarında karıştırılarak kıvam limitleri belirlenmiş, standart proktor, serbest basınç ve donma-çözülme deneyleri yapılmıştır. Buna göre:

- % 10 uçucu kül ilavesi ile zeminin likit limiti ve plastisite indisi artmakta, daha büyük uçucu kül oranlarında likit limit değeri sabitlenirken plastik limit artışı devam etmiştir. Bunun sonucunda plastisite indisi önce arttıktan sonra azalışa geçmiştir.
- Standart proktor deneyleri sonucu zemine artan miktarlarda uçucu kül eklendiğinde optimum su muhtevası artmış, kuru birim hacim ağırlık azalmıştır. Kuru birim hacim ağırlığındaki azalma, uçucu külün düşük özgül ağırlığından kaynaklanmaktadır; optimum su muhtevasındaki artış ise uçucu külün hidratlanması için fazla miktarda suya ihtiyaç duyması yüzündendir.
- En büyük serbest basınç dayanımı değerini en fazla katkı malzemesi yüzdesine sahip olan 30UK8C numunesi elde etmiştir. Yani zemine belli oranları aşmamak kaydıyla ne kadar çok uçucu kül ve çimento ilave edersek zeminin dayanımı o kadar artmaktadır. Bu dayanım tek başına uçucu kül ya da çimentoyla değil, ikisinin belli oranlarda karışımıyla elde edilmiştir.
- 10UK2C numunesi ise ihtiva ettiği katkı oranına bakıldığında son derece önemli bir serbest basınç dayanım değeri elde etmiştir. Bunun muhtemel sebebi düşük optimum su muhtevasına sahip olmasıdır.
- Kür süresinin artışıyla serbest basınç dayanımları çok büyük artışlar göstermiştir. Özellikle 28 günlük kürde dayanımlar çok büyük değerlere ulaşmış olup kürün en az etkisi doğal zemin üzerinde, en fazla etkisi ise 30UK8C üzerinde görülmüştür. 30UK8C numunesinin serbest basınç dayanımı 28 günlük kür sonunda yaklaşık % 1000 artış göstermiştir.

- Kış şartlarında zeminde çatlakların oluşmasına ve zeminin dayanımının azalmasına yol açan don olayının etkisini en aza indirmek için zemine uçucu kül ilave edilmiş; bu katkının donma-çözölmeye direnci ne yönde değıştireceğı deneysel çalışmalarla incelenmiştir. Donma-çözölmeye deneyleri iki grup halinde yapılmıştır. İlk gruptaki zemin numuneleri doğal halde bırakıldığı için su kaybetmiş, bunun sonucunda zemin numunelerinin serbest basınç dayanımları artış göstermişlerdir. Bunun üzerine gerçekleştirilen ikinci grup deneyde zemin numunelerinde su muhtevası kayıpları en aza indirgenmiştir. Bunun sonucunda donma-çözölmeye çevrimlerine uğrayan zeminlerde çatlaklar oluşmuş, her çevrim sonrası büyüyerek dayanımların düşmesine yol açmıştır. Doğal zemin numunesi büyük dayanım kaybına uğrarken uçucu kül ve çimento katkılı zeminlerde bu kayıp daha düşük oranlarda olmuştur.
- Su muhtevası korunmamış -azalmış- zemin numunelerinin oluşturduğu birinci grup için donma-çözölmeye çevrim sayısı arttıkça mukavemet artışı gözlenmiştir. Çünkü her çevrim sonrası su kaybı artarak zemin numunelerinin stabil hale gelmelerini sağlamışlardır.
- Su muhtevası korunmuş zemin numunelerinin oluşturduğu ikinci grup için donma-çözölmeye çevrim sayısı arttıkça mukavemet kaybı görölmüştür. Çünkü zemin boşluklarında yer alan sular donma çevriminde buz halini alarak zeminin şişmesine yol açmakta; çözölmeye çevriminde tekrar suya dönüşerek zeminin büzölmesine sebep olmaktadır. Bunun sonucunda çatlaklar oluşmakta, her çevrim sonrası daha da artmakta ve büyümektedirler. Bu da zemin dayanımının düşmesine yol açmaktadır.

Sonuç olarak uçucu külün silt zemine etkisi olumlu yönde olup zeminin serbest basınç dayanımını ve donma-çözölmeye direncini arttırmaktadır. Böylece zemin stabilizasyonlarında katkı malzemesi olarak uçucu külün kullanılması mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi açısından ve ekonomik oluşu bakımından son derece faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- **Abernethy, R.F., Peterson, M.J., and Gibson, F.H.**, 1969, Major ash constituents in U.S. coals, Report of Investigation, 7240, United States Bureau of Mines, Washington, D.C.
- **Alkaya, D.**, 2002, Uçucu Kül Katkısının Dolgu Zeminlerin Stabilitesine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, T.C. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- **Aksoy, İ.H., Haşal, M.E.**, 2000, Uçucu kül-çimento-köpük karışımının hafif dolgu malzemesi olarak geoteknik özellikleri, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi, (10):1.
- **American Coal Ash Association**, 2003, Fly Ash Facts for Highway Engineers, Federal Highway Administration.
- **ASTM C618**, Standart specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete, Annual Book of ASTM Standards.
- **Atanur, A.**, 1972, Uçucu Küllerin Kimyasal ve Fiziksel Vasıfları ve Yapı Malzemesi olarak Kullanılması, T.C. Bayındırlık Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, 193s.
- **Aytekin, M.**, 2001, Deneysel Zemin Mekaniği, Akademi Yayınevi, Trabzon, 263s.
- **Bardet, J.P.**, 1997, Experimental Soil Mechanics, Prentice Hall, New Jersey, 584 p.
- **Barnes, A.G.**, 1997, Pavement thickness design using reclaimed hydrated Iowa Class C fly ash as a base material, MSci thesis, Iowa State University, Ames, IA.

KAYNAKLAR (devam)

- **Çakır, M.**, 1999, Uçucu Kül ile Zemin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- **Çokça, E.**, 1997, Soma-B Uçucu Külü ve Bentonit Karışımının Hidrolik Geçirimsizlik Özellikleri, Endüstriyel Atıkların İnş. Müh. Kullanımı, 1 , s.95-101 .
- **Çokça, E., İpek, T.**, 1998, Kireç, çimento, C ve F-sınıfı uçucu kül katkısının şişen bir zeminin şişme basıncına etkisi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi, (10):2.
- **Çokça, E.**, 2001, Use of class C fly ashes for the stabilization of an expansive soil, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(2001) 7.
- **Edil, T.B., Benson, C.H., Bin Shafique, M.S., Kim, W., Tanyu, B.F., Şenol, A.**, 2002, Field Evaluation of Construction Alternatives for Roadway Over Soft Subgrade, Journal of Transportation Research Record 1786, National Research Council, Paper No: 02-3808, 36-48, Washington D.C., USA.
- **Erdoğan, T.Y.**, 2003, Beton Kitabı, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını.
- **Erşan, H.**, 1996, Uçucu Küllerin Siltli Zeminlerin Kayma Mukavemeti Üzerine Etkisi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi, 75 s.
- **Ferguson, G.**, 1993, Use of Self-cementing Fly Ashes as a Soil Stabilization Agent, Fly ash for soil improvement, Geotechnical Special Publication, No 36, ASCE, New ork, 1-14.

KAYNAKLAR (devam)

- **Ferguson, G., and Levenson, S.M.,** 1999, Soil and Pavement Base Stabilization with Self-Cementing Coal Fly Ash, American Coal Association, Alexandria, VA.
- **Joshi, R. C., Duncan, D. M., and McMaster, H. M.,** 1975, New and Conventional Engineering Uses of Fly Ash., J. Transp. Eng., 101(4), 791–806.
- **Kværnø S.H. and Øygarden, L.,** 2006, The influence of freeze-thaw cycles and soil moisture on aggregate stability of three soils in Norway, Catena, Norwegian Institute for agricultural and environmental research (Bioforsk), Soil and Environment Division, 8 p.
- **Misra, A.,** 1998, Stabilization characteristics of clays using class c fly ash, Transportation Research Record 1611, Transportation Research Board, 46-54.
- **Nalbantoglu, Z. and Gucbilmez, E.,** 2002, Utilization of an Industrial Waste in Calcareous Expansive Clay Stabilization, Geotechnical Testing Journal, 25(1), 78-84.
- **Nicholson, P.G., Kashyap, V., and Fuji, C.,** 1993, Lime and fly ash admixture improvement of tropical Hawaiian soils, Transportation Research Record 1440, National Research Council, Washington, D.C., 71-78.
- **Özbayoğlu, F.U.,** 1993, Uçucu Killerin, Bentonit, Kireç ve Çimento katkılarıyla Kumlu Zeminlerin Stabilizasyonlarında Kullanımı, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu . p.113-122. İMO Ankara Şb. Ankara.

KAYNAKLAR (devam)

- **Proctor, R.R.**, 1933, First of four articles on the design and construction of rolled-earth dams. Fundamental principles of soil compaction. Eng. News-Rec.
- **Savran, K.Z.**, 1988, Stabilization of Cohesive Soils with Fly Ash, METU, Ankara.
- **Selvig, W.A., and Gibson, F.H.**, 1956, Analyses of Ash from United States Coals: U.S. Bureau of Mines Bull, 567 33p.
- **Sezer, A., İnan, G., Yılmaz, H.R. and Ramyar, K.**, 2004, Utilization of a very high lime fly ash for improvement of İzmir clay, Building and Environment, 41 (2006) 150-155.
- **Şenol, A., Bin-Shafique, Md. S., Edil, T.B., Benson, C.H.**, 2002, Use of class c fly ash for stabilization of soft subgrade, Fifth International Congress on Advances in Civil Engineering, (10).
- **Şenol, A., Edil, T.B., Bin-Shafique, Md. S., Acosta, H.A. and Benson, C.H.**, 2003, Use of class C fly ash for stabilization of soft subgrade, ARI, The Bulletin of the İstanbul Technical University, 53, 1.
- **Şenol, A., Edil, T.B., Bin-Shafique, Md. S., Acosta, H.A. and Benson, C.H.**, 2005, Soft subgrades' stabilization by using various fly ashes, Resources Conservation and Recycling, 46 (2006) 365-376.
- **Temiz, H., Karakeçi, A.Y.**, 2002, An Investigation on Microstructure of Cement Paste Containing Fly Ash and Silica Fume, Cement and Concrete Research, 32: 1131-1132.

KAYNAKLAR (devam)

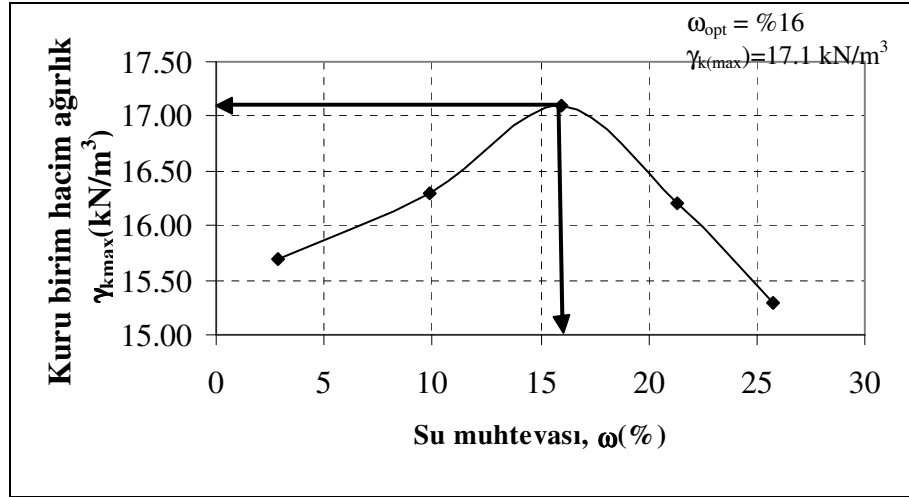
- **Tokyay, M., Erdoğan, K.**, 1998, Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu, TÇMB, Ankara.
- **TRB**, 1987, Lime Stabilization: Reactions, Properties, Design, and Construction, State of the Art Report 5, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, USA.
- **TS 639**, Uçucu Küller, TSE, Ankara, 1975.
- **TS 640**, Çimento - Uçucu küllü çimento, TSE, Ankara, 1992.
- **Turner, J.P.**, 1997, Evaluation of Western Coal Fly Ashes for Stabilization of Low-Volume Roads, Testing Soil Mixed with Waste or Recycled Materials, ASTM STP 1275, American Society of Testing and Materials.
- **White, D. W.** 2002, Field Trials of Guidelines for Soil Stabilizers of Non-Uniform Subgrade Soils - Proposal. Iowa State University, Ames.
- **Yıldız, M., Soğancı, A.S., Demiröz, A., Albayral, V.**, 2004, Tekrarlı donma ve çözülmenin kireç ile stabilize edilmiş kil zeminlerin mukavemet ve permeabilitesine etkisi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, (10):2-3.
- **Zia, N. and Fox, P.J.** 2000, Engineering Properties of Loess-Fly Ash Mixtures for Road Bases, Transportation Research Record 1717, Transportation Research Board, 49-56.

KAYNAKLAR (devam)

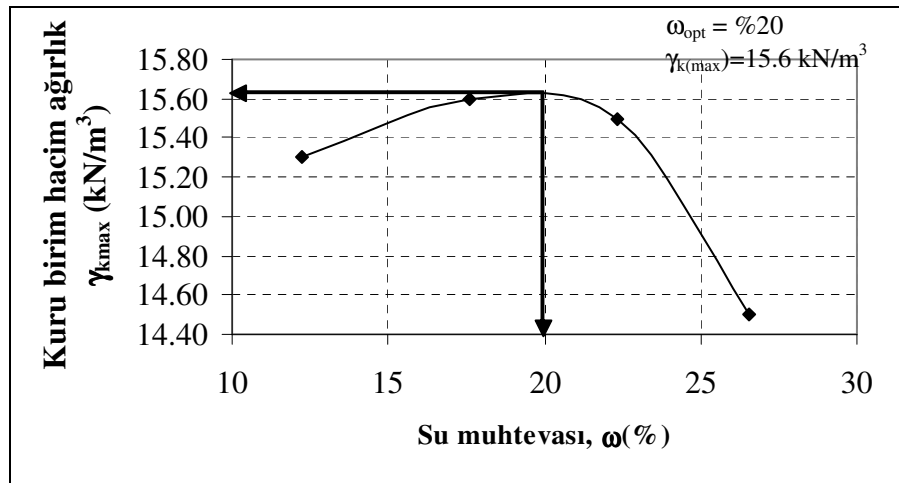
- **Øygarden, L.**, 2000, Soil erosion in small agricultural catchments, South-eastern Norway, Doctor Scientiarum Theses 2000:8, Agricultural University of Norway.

EKLER

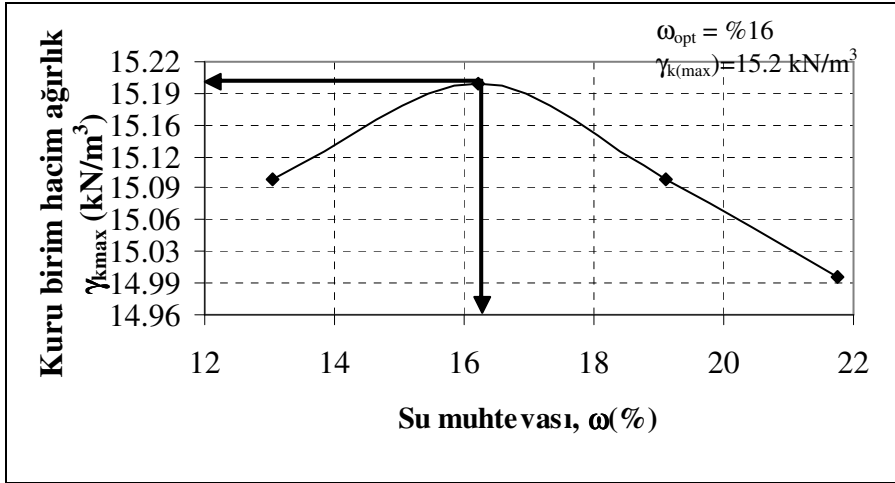
EK A. Standart Proktor Deney Sonuçları



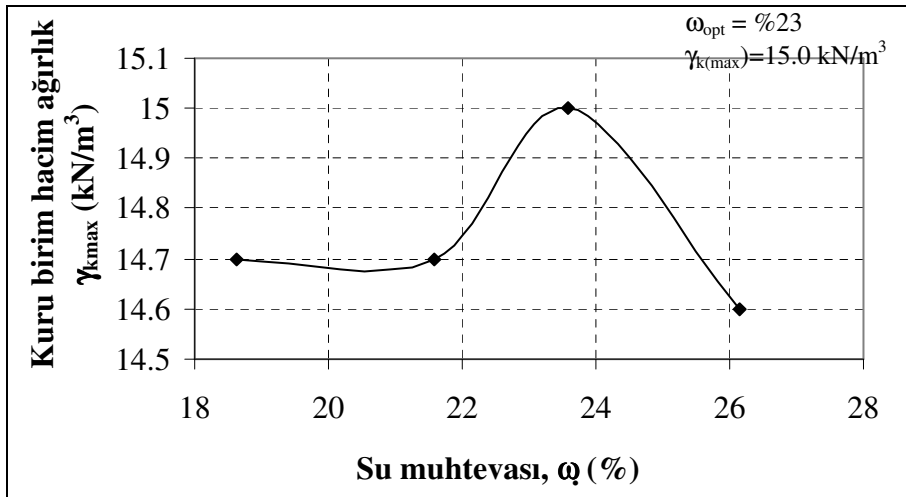
Şekil A. 1 Doğal zeminin standart proktor eğrisi



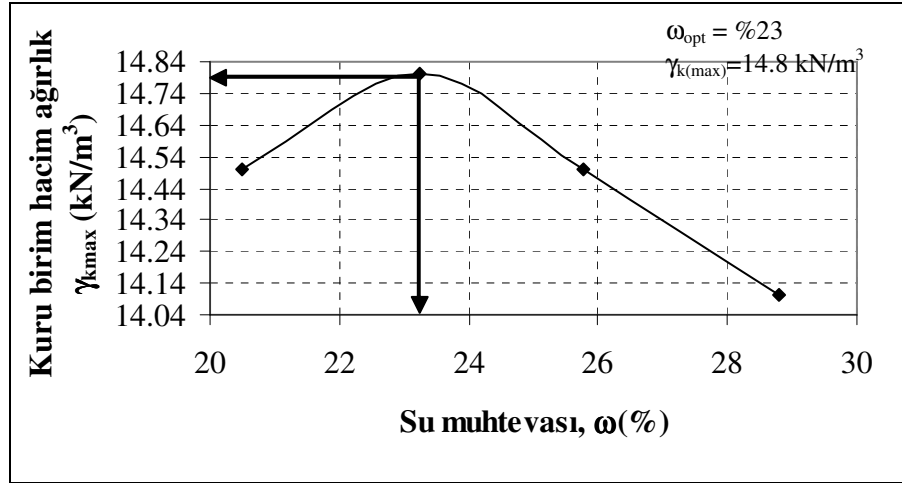
Şekil A. 2 10UK numunesinin standart proktor eğrisi



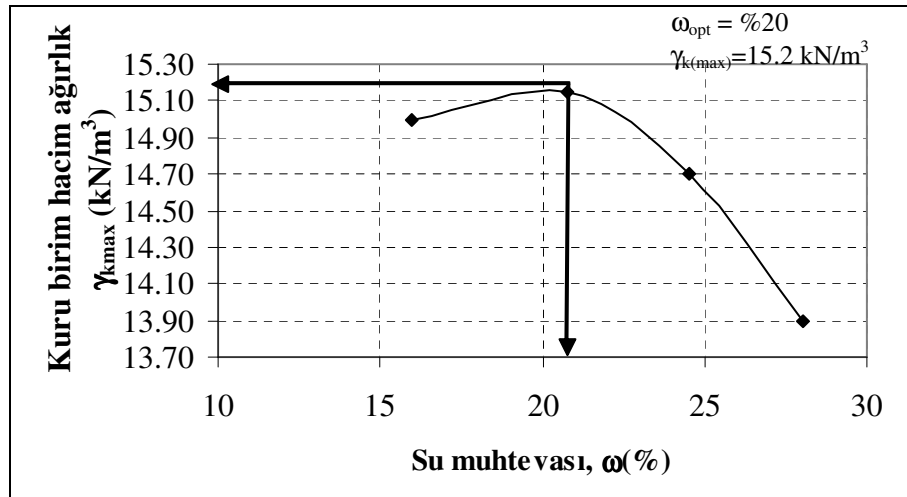
Şekil A. 3 10UK2C numunesinin standart proktor eğrisi



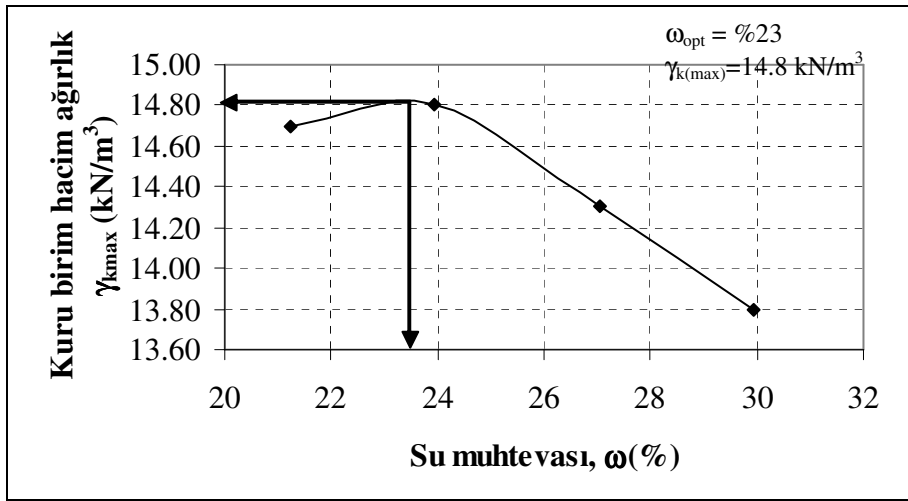
Şekil A. 4 10UK5C numunesinin standart proktor eğrisi



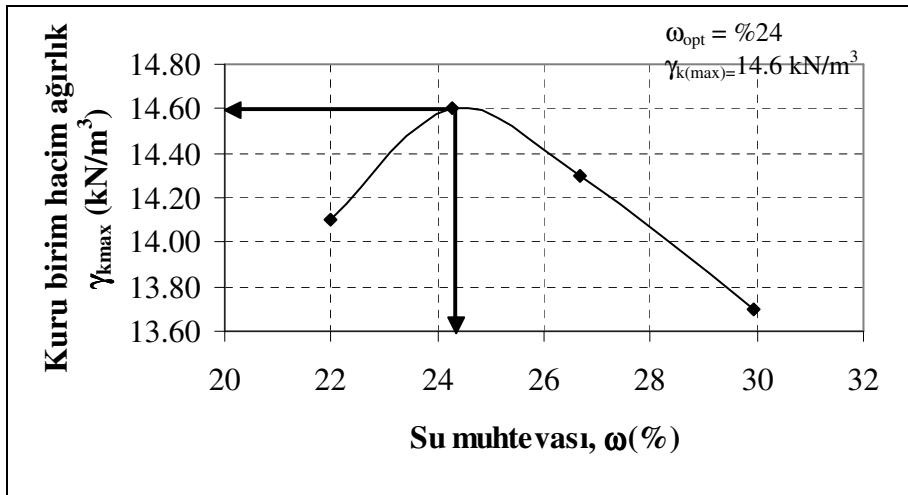
Şekil A. 5 10UK8C numunesinin standart proktor eğrisi



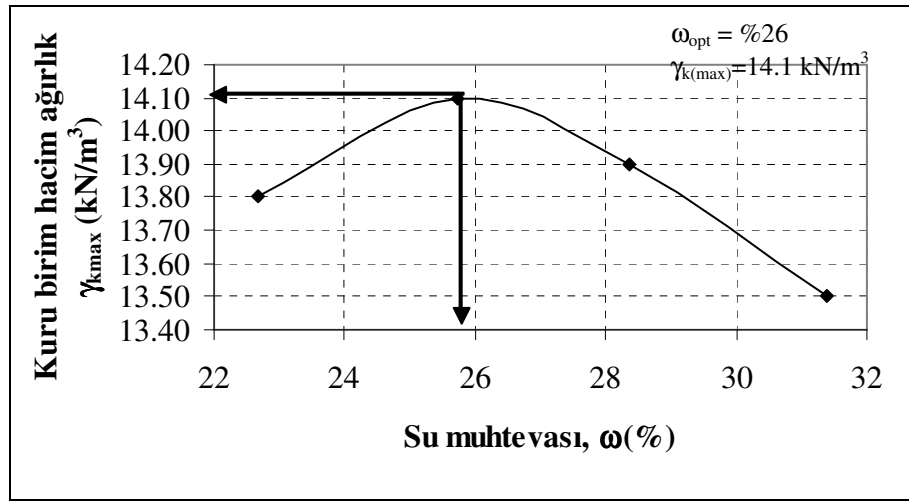
Şekil A. 6 20UK numunesinin standart proktor eğrisi



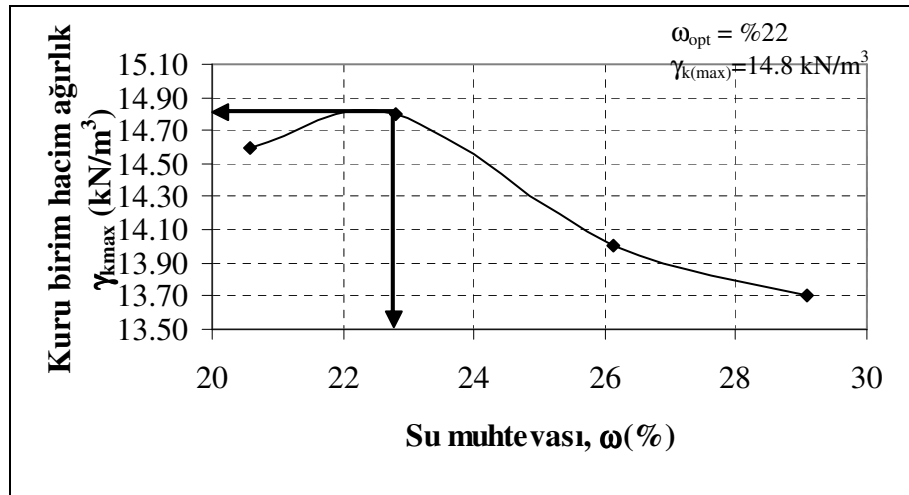
Şekil A. 7 20UK2C numunesinin standart proktor eğrisi



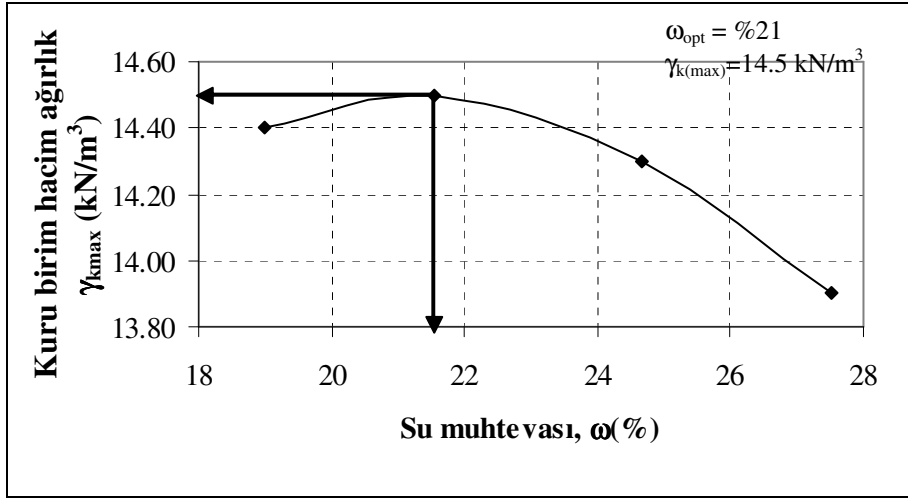
Şekil A. 8 20UK5C numunesinin standart kompaksiyon eğrisi



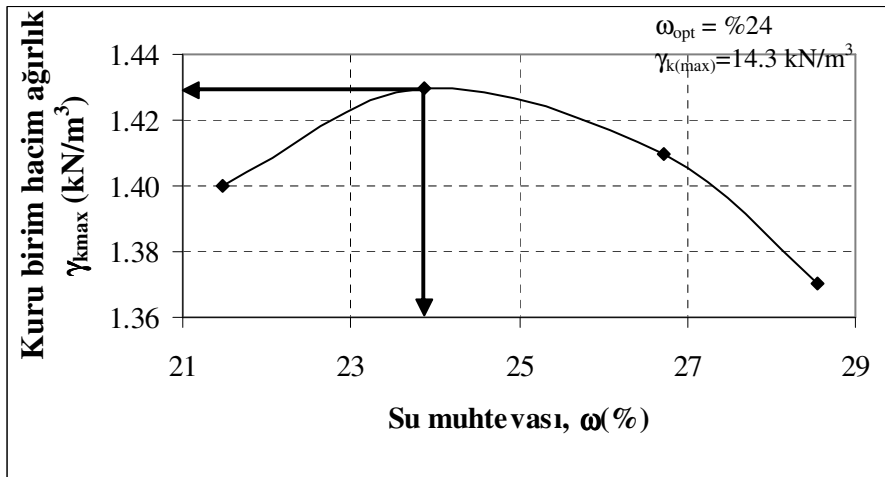
Şekil A. 9 20UK8C numunesinin standart proktor eğrisi



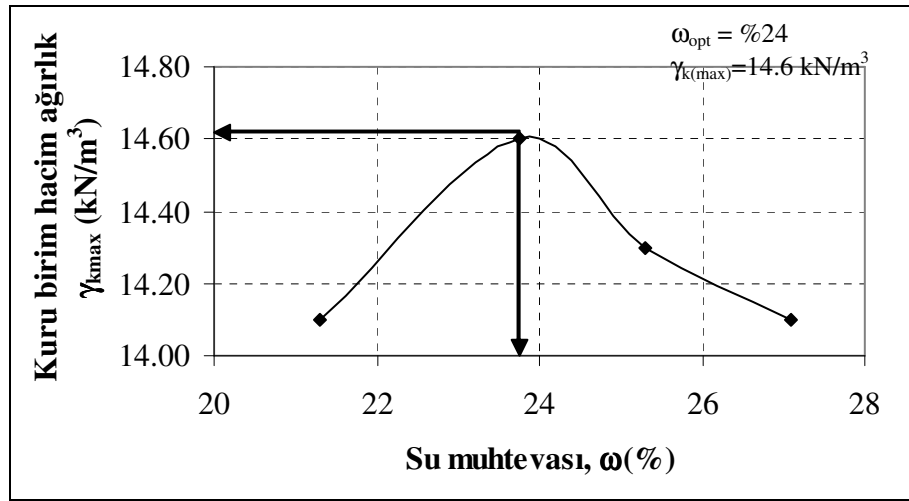
Şekil A. 10 30UK numunesinin standart proktor eğrisi



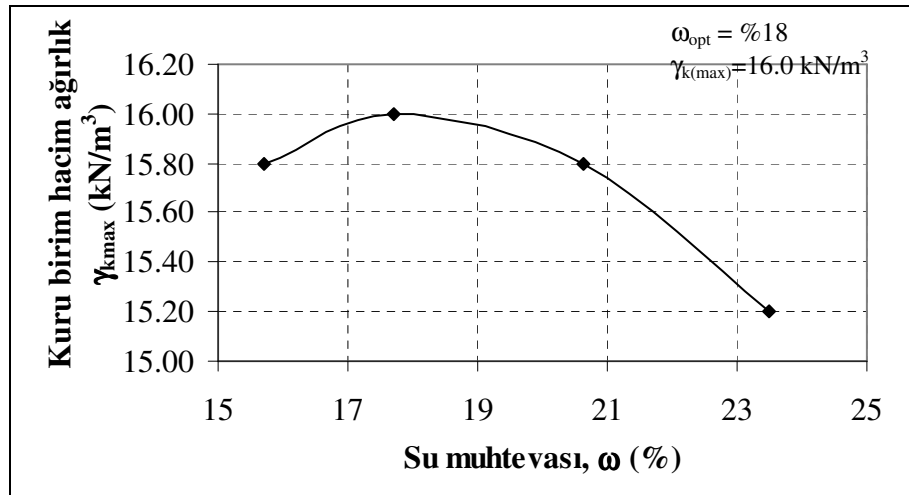
Şekil A. 11 30UK2C numunesinin standart proktor eğrisi



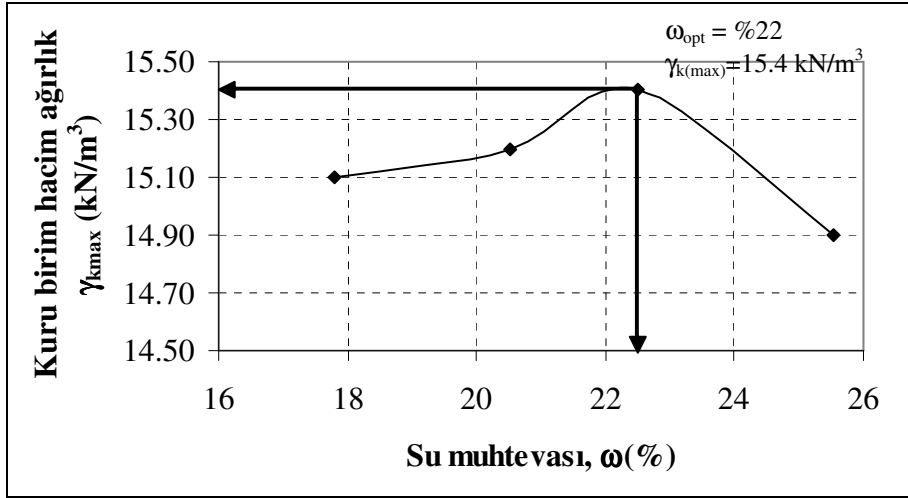
Şekil A. 12 30UK5C numunesinin standart proktor eğrisi



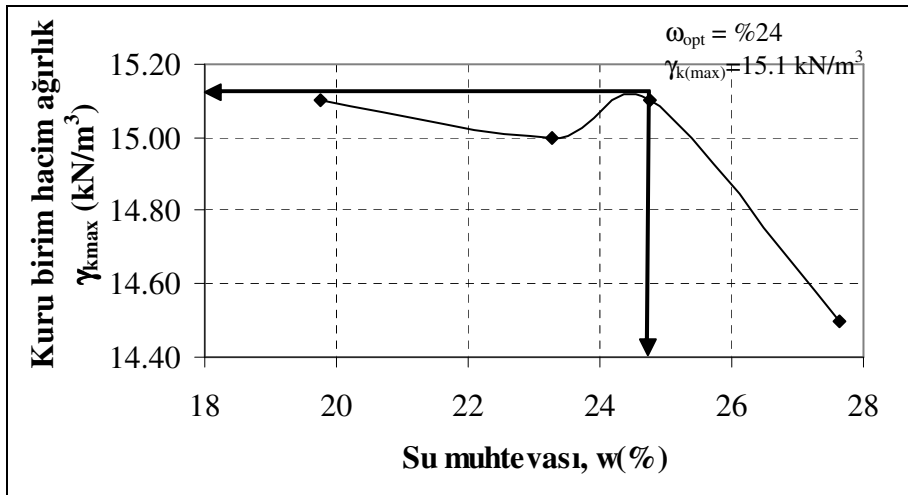
Şekil A. 13 30UK8C numunesinin standart proktor eğrisi



Şekil A. 14 2C numunesinin standart proktor eğrisi

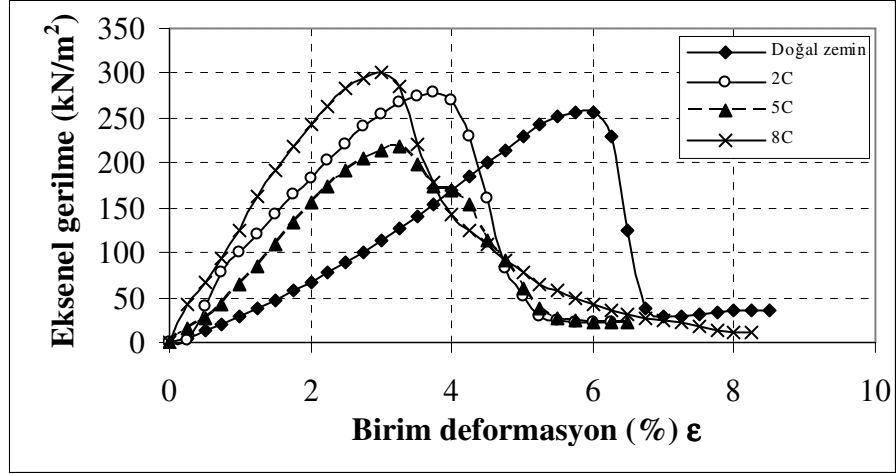


Şekil A. 15 5C numunesinin standart proktor eğrisi

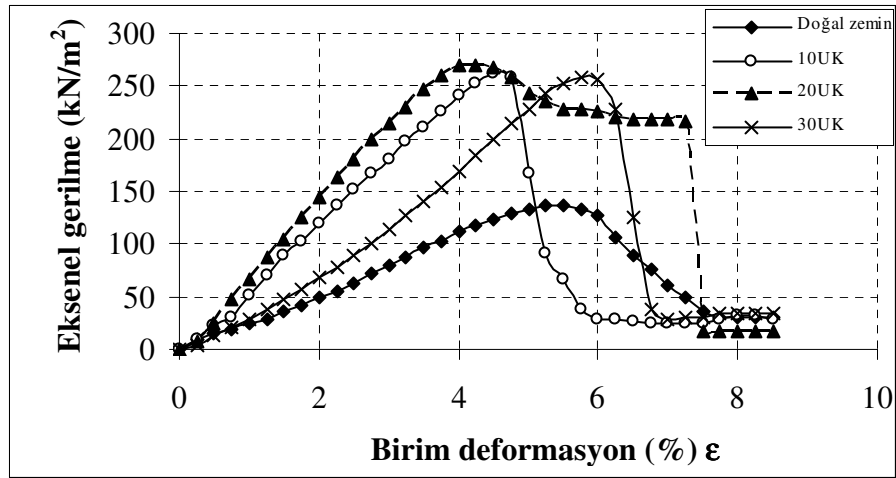


Şekil A. 16 8C numunesinin standart proktor eğrisi

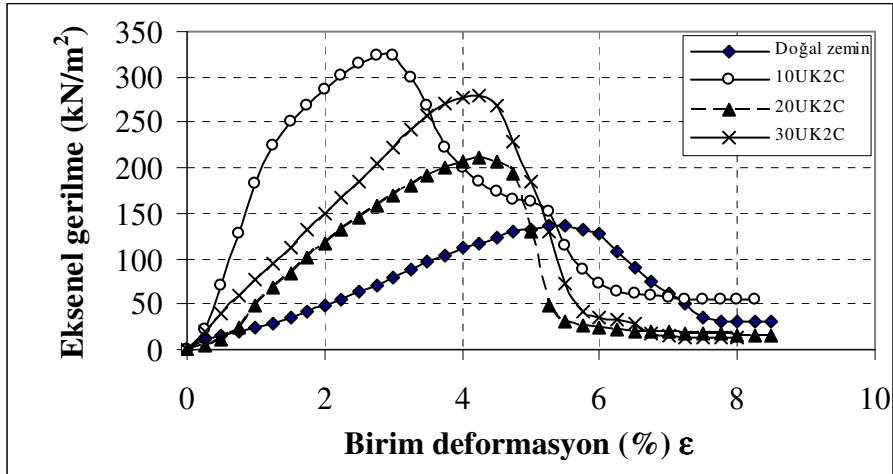
EK B. Serbest Basınç Deney Sonuçları



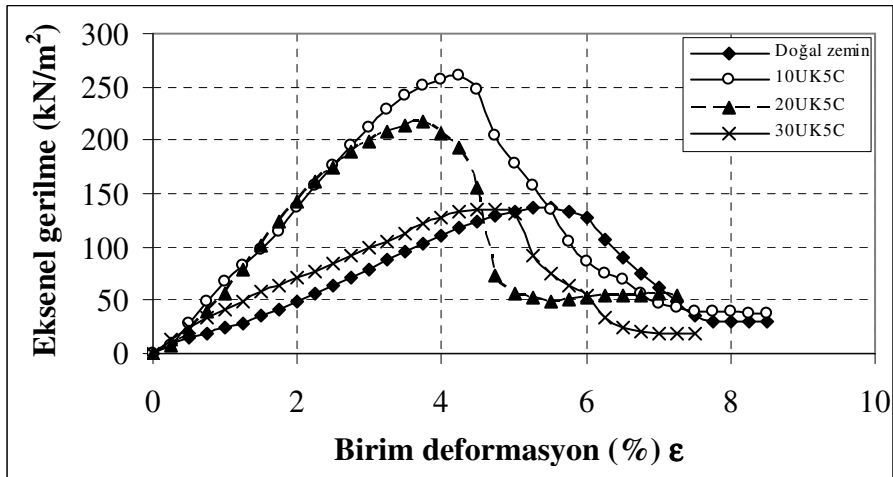
Şekil B. 1 Doğal zemin, 2C, 5C ve 8C numunelerinin 1 günlük kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri



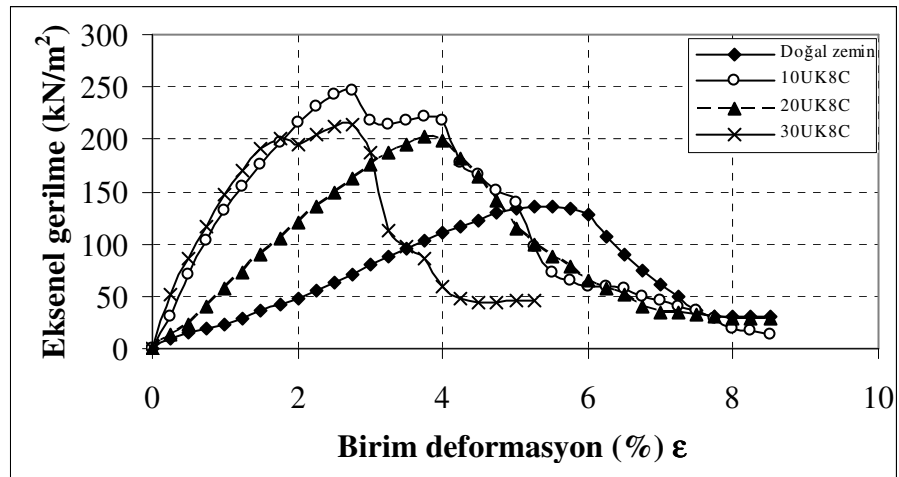
Şekil B. 2 Doğal zemin, 10UK, 20UK ve 30UK numunelerinin 1 günlük kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri



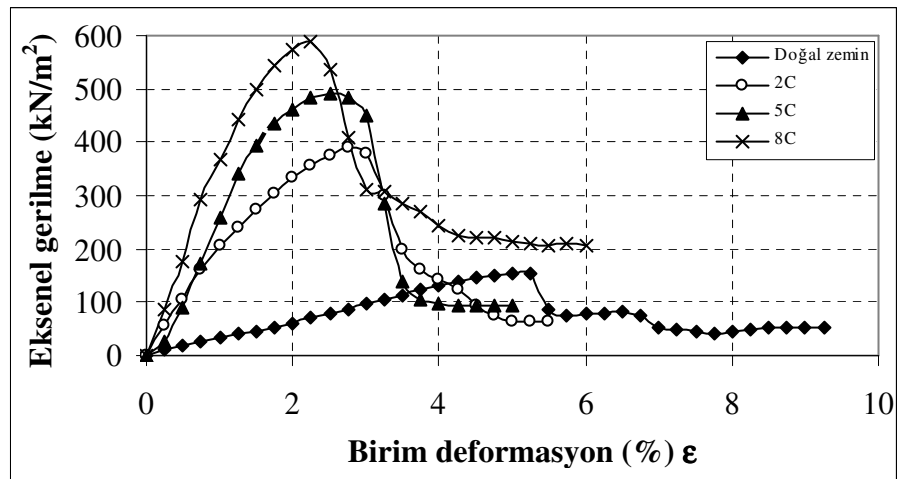
Şekil B. 3 Doğal zemin, 10UK2C, 20UK2C ve 30UK2C numunelerinin 1 günlük kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri



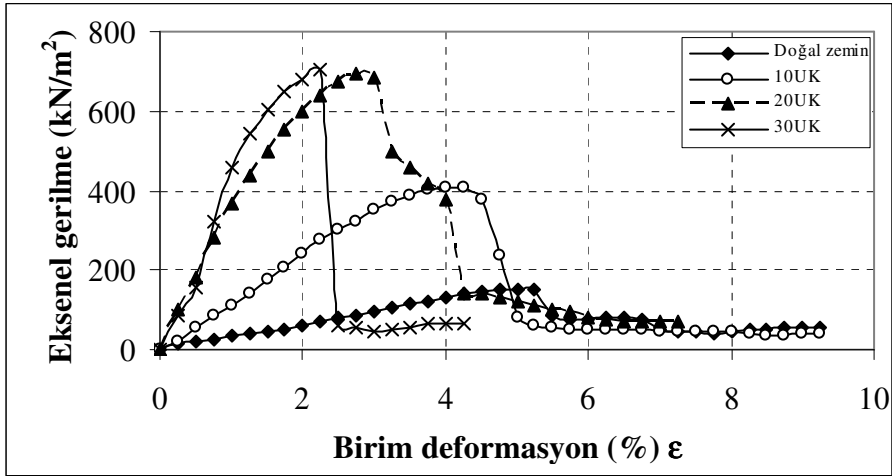
Şekil B. 4 Doğal zemin, 10UK5C, 20UK5C ve 30UK5C katkıli zemin örneklerinin 1 günlük kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri



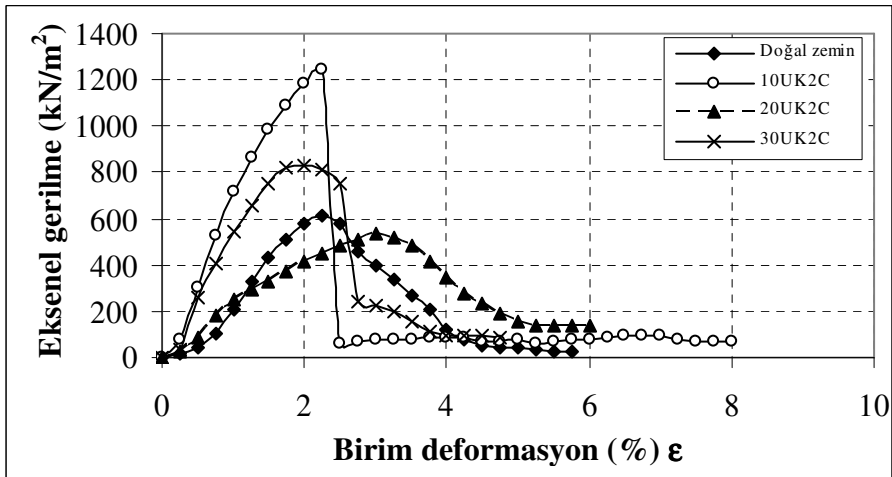
Şekil B. 5 Doğal zemin, 10UK8C, 20UK8C ve 30UK8C numunelerinin 1 günlük kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri



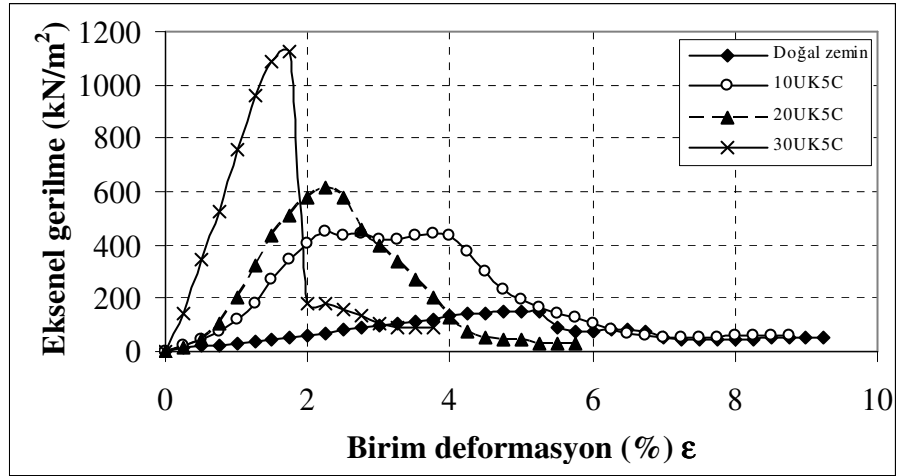
Şekil B. 6 Doğal zemin, 2C, 5C ve 8C numunelerinin 7 günlük kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri



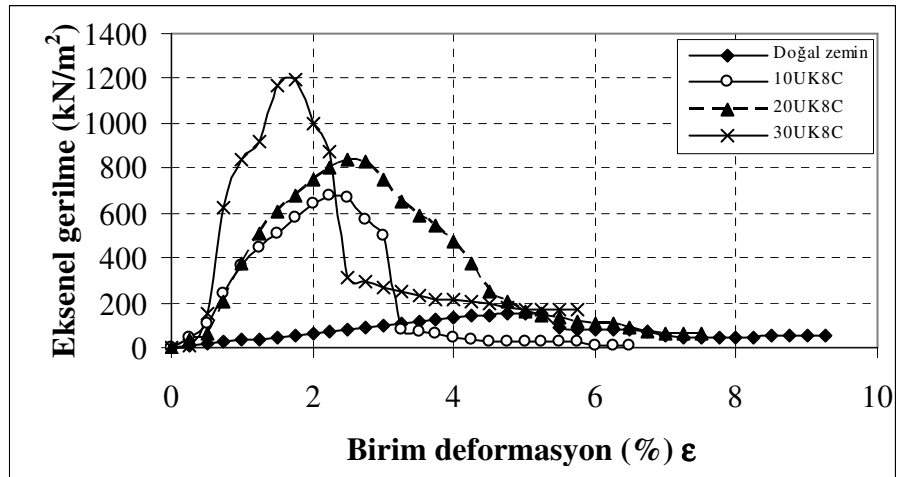
Şekil B. 7 Doğal zemin, 10UK, 20UK ve 30UK numunelerinin 7 günlük kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri



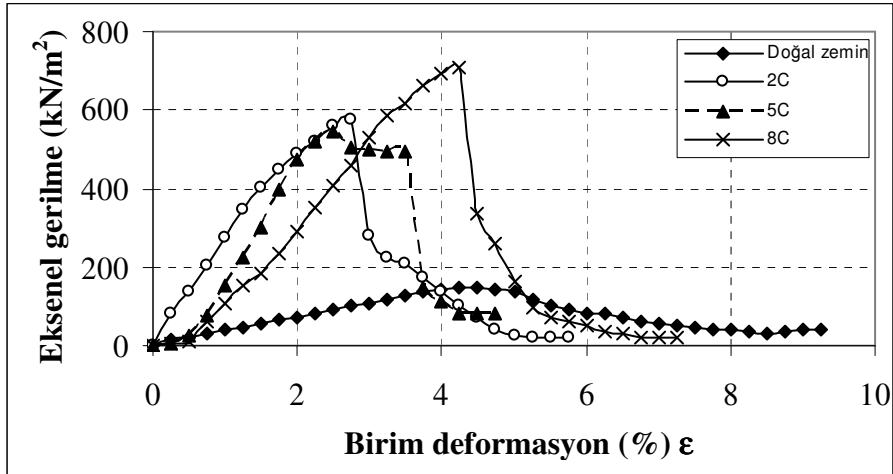
Şekil B. 8 Doğal zemin, 10UK2C, 20UK2C ve 30UK2C numunelerinin 7 günlük kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri



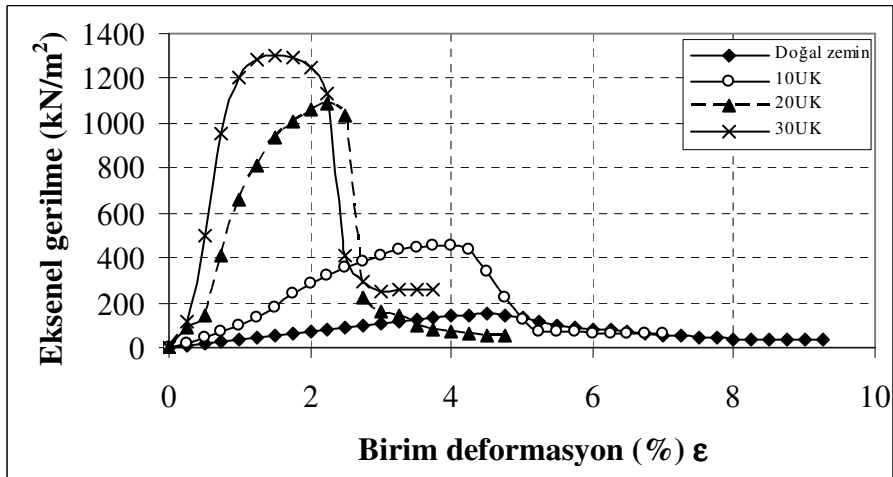
Şekil B. 9 Doğal zemin, 10UK5C, 20UK5C ve 30UK5C numunelerinin 7 günlük kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri



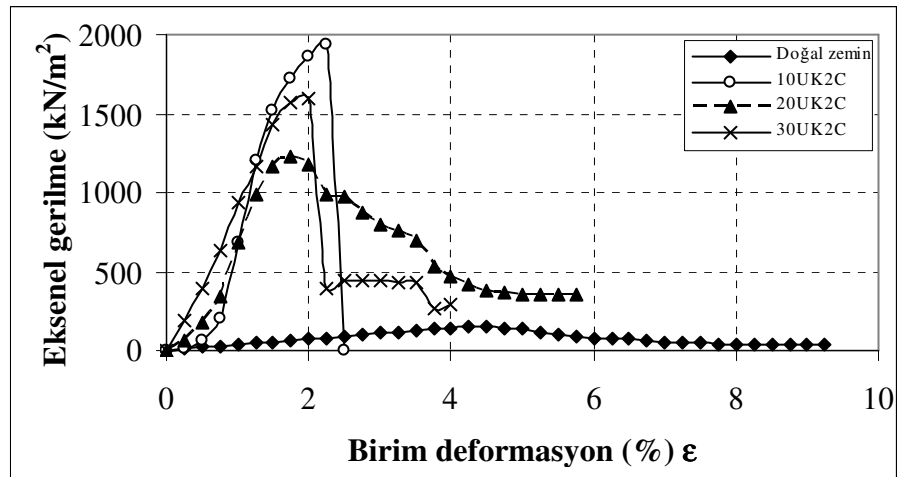
Şekil B. 10 Doğal zemin, 10UK8C, 20UK8C ve 30UK8C numunelerinin 7 günlük kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri



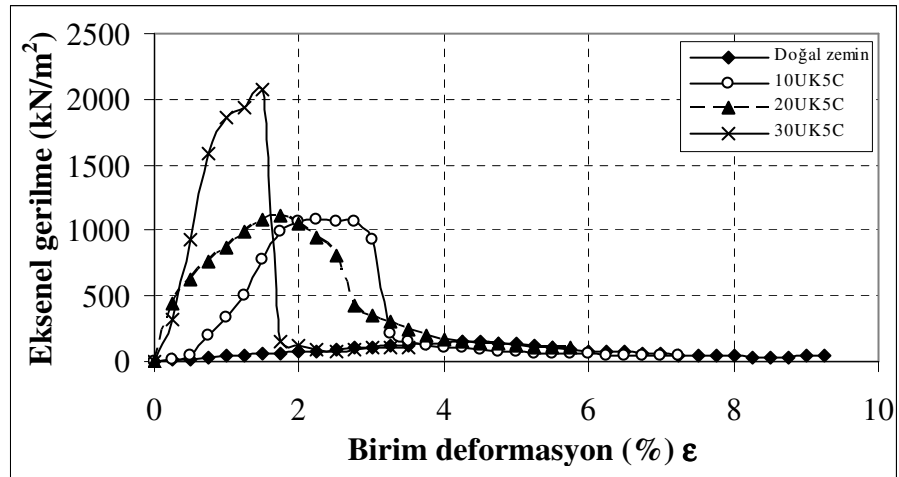
Şekil B. 11 Doğal zemin, 2C, 5C ve 8C numunelerinin 28 günlük kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri



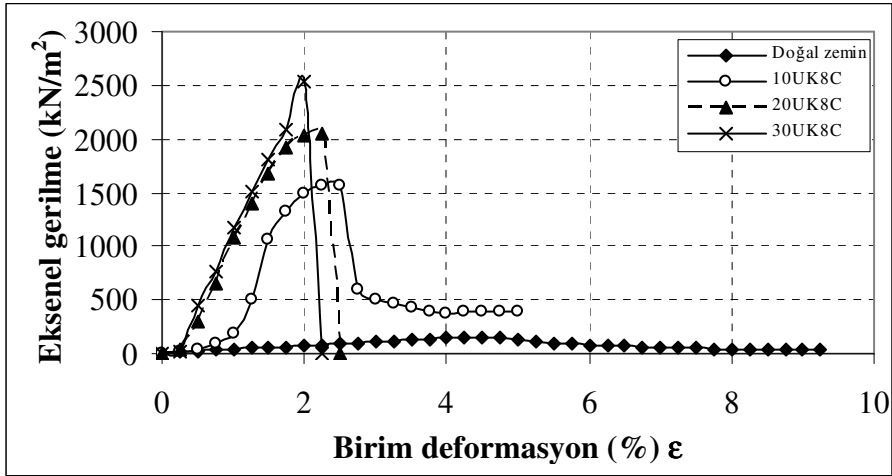
Şekil B. 12 Doğal zemin, 10UK, 20UK ve 30UK numunelerinin 28 günlük kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri



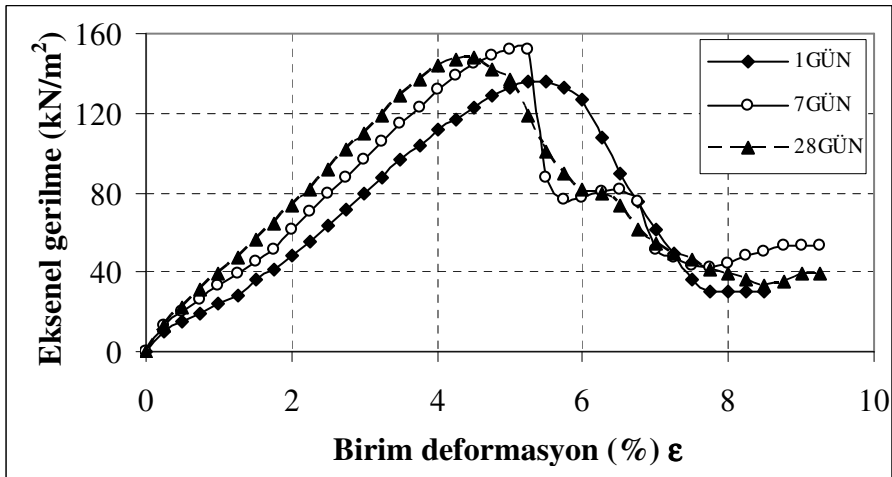
Şekil B. 13 Doğal zemin, 10UK2C, 20UK2C ve 30UK2C numunelerinin 28 günlük kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri



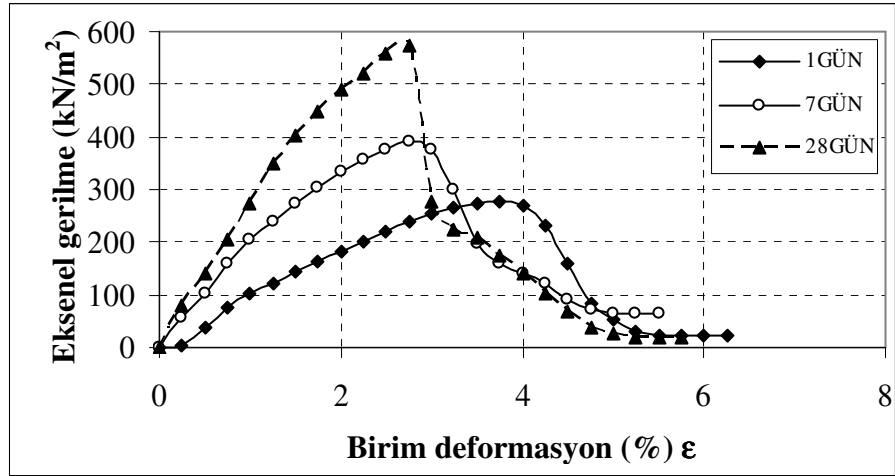
Şekil B. 14 Doğal zemin, 10UK5C, 20UK5C ve 30UK5C numunelerinin 28 günlük kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri



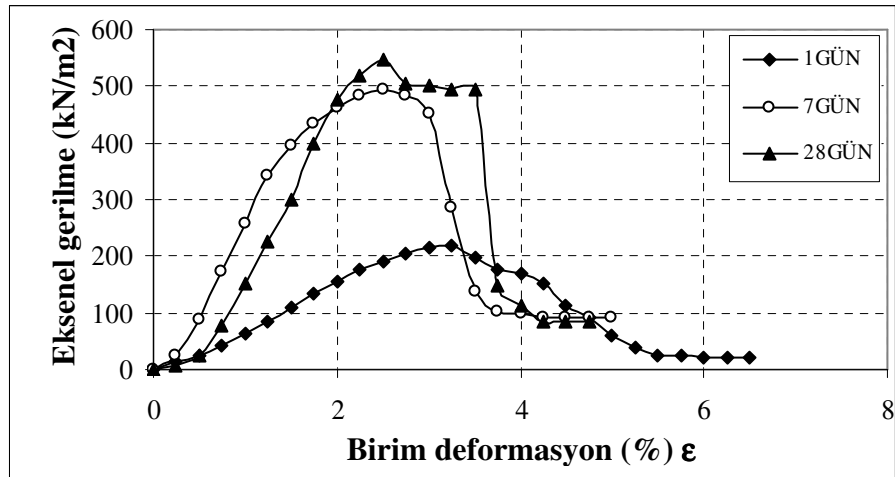
Şekil B. 15 Doğal zemin, 10UK8C, 20UK8C ve 30UK8C numunelerinin 28 günlük kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri



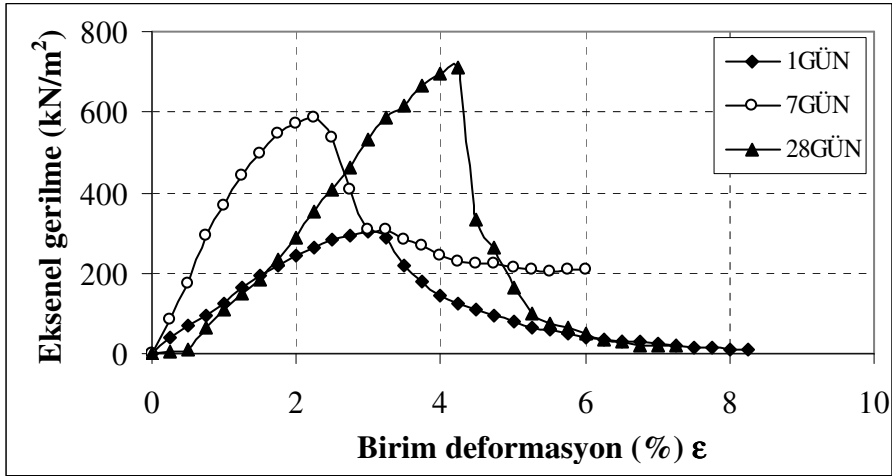
Şekil B. 16 Doğal zemin numunesinin 1 gün, 7 gün ve 28 gün kür sürelerine göre serbest basınç mukavemetleri



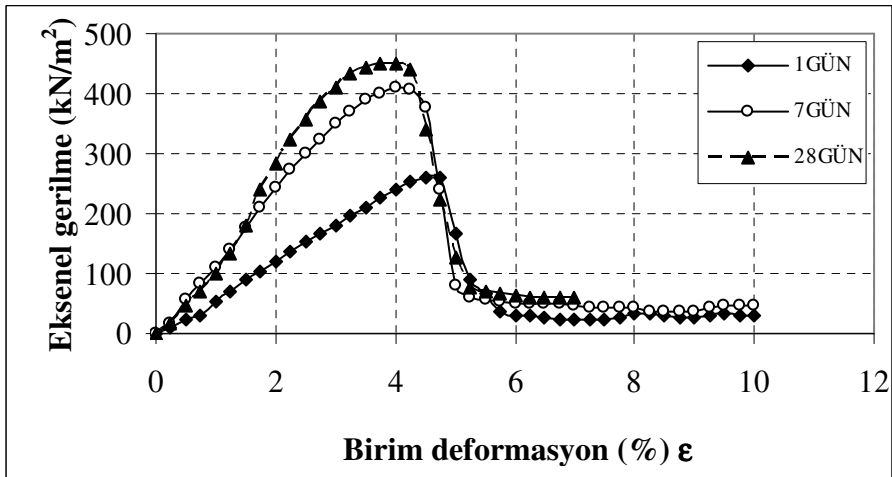
Şekil B. 17 2C numunesinin 1 gün, 7 gün ve 28 gün kür sürelerine göre serbest basınç mukavemetleri



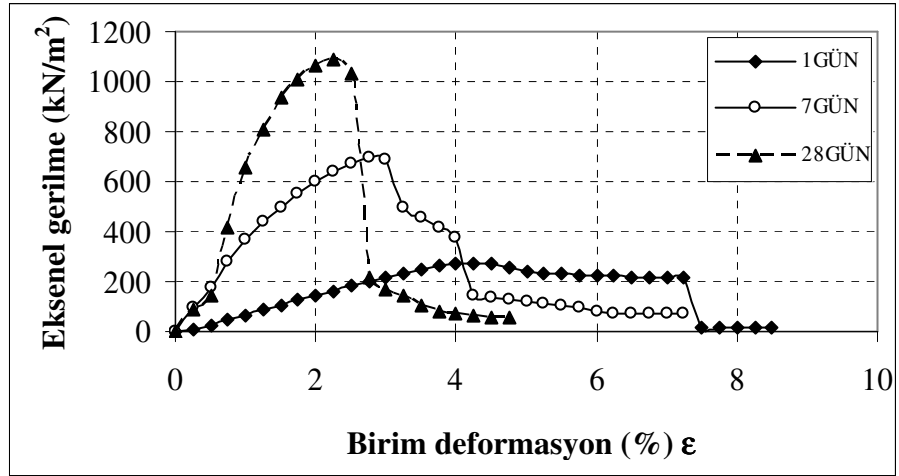
Şekil B. 18 5C numunesinin 1 gün, 7 gün ve 28 gün kür sürelerine göre serbest basınç mukavemetleri



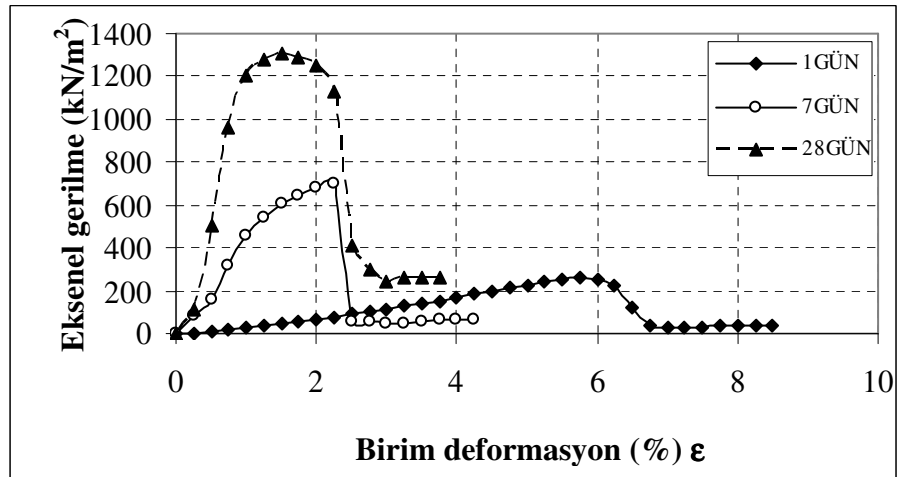
Şekil B. 19 8C numunesinin 1 gün, 7 gün ve 28 gün kür sürelerine göre serbest basınç mukavemetleri



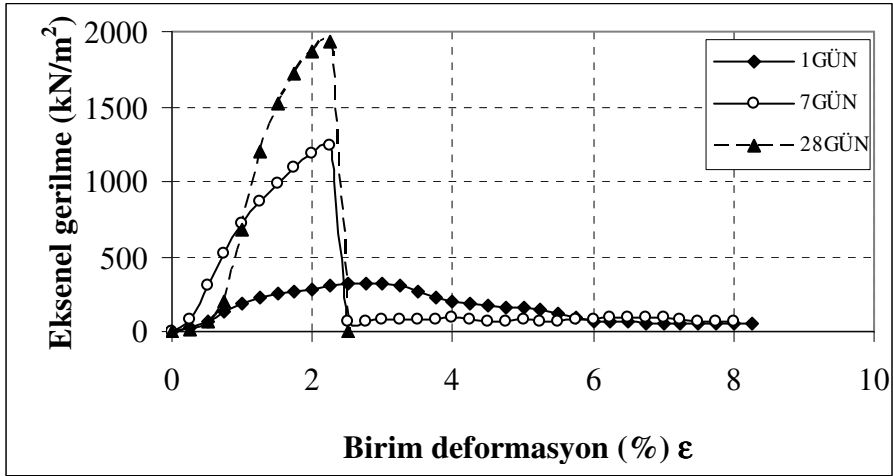
Şekil B. 20 10UK numunesinin 1 gün, 7 gün ve 28 gün kür sürelerine göre serbest basınç mukavemetleri



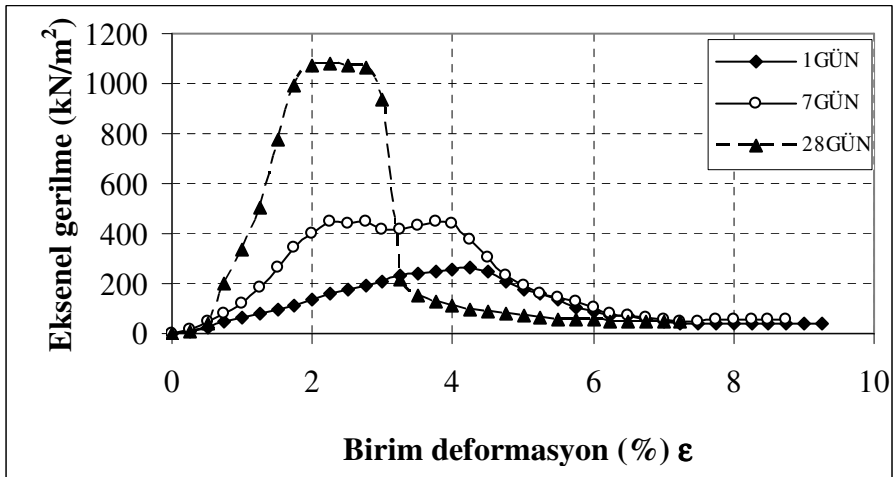
Şekil B. 21 20UK numunesinin 1 gün, 7 gün ve 28 gün kür sürelerine göre serbest basınç mukavemetleri



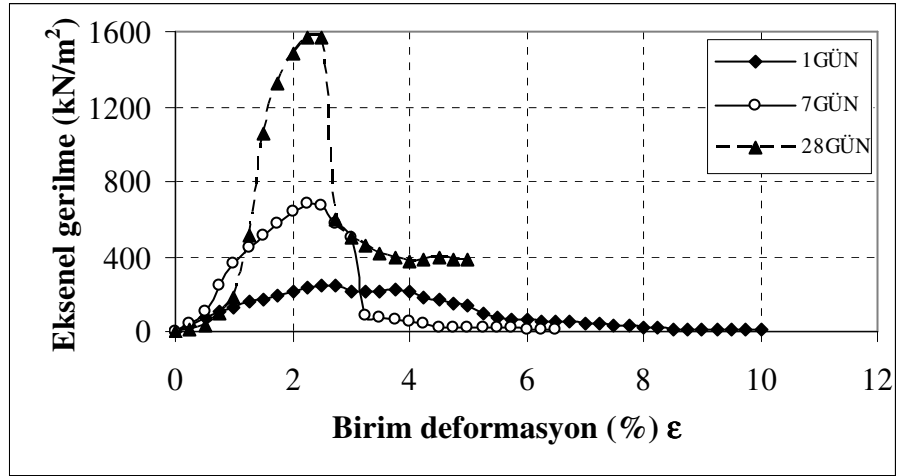
Şekil B. 22 30UK numunesinin 1 gün, 7 gün ve 28 gün kür sürelerine göre serbest basınç mukavemetleri



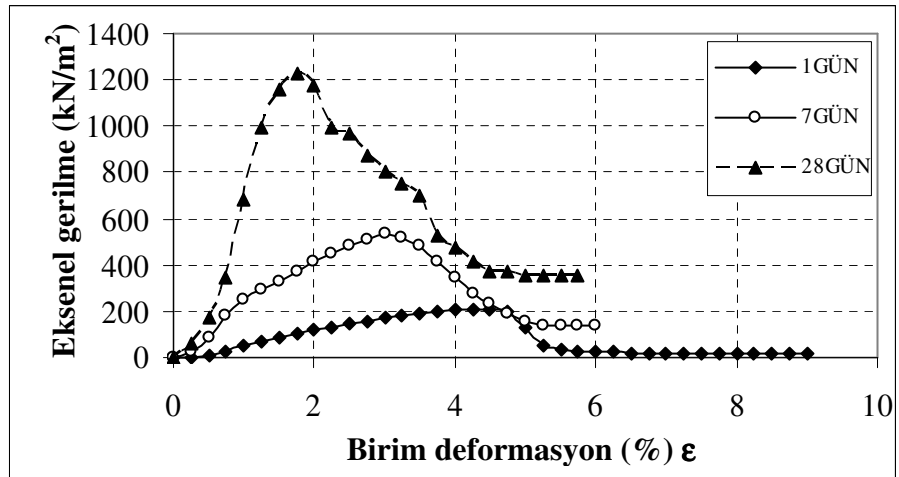
Şekil B. 23 10UK2C numunesinin 1 gün, 7 gün ve 28 gün kür sürelerine göre serbest basınç mukavemetleri



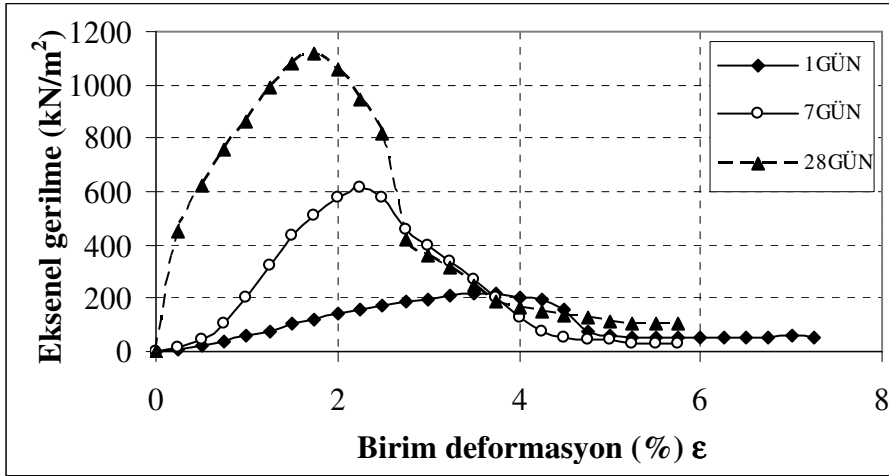
Şekil B. 24 10UK5C numunesinin 1 gün, 7 gün ve 28 gün kür sürelerine göre serbest basınç mukavemetleri



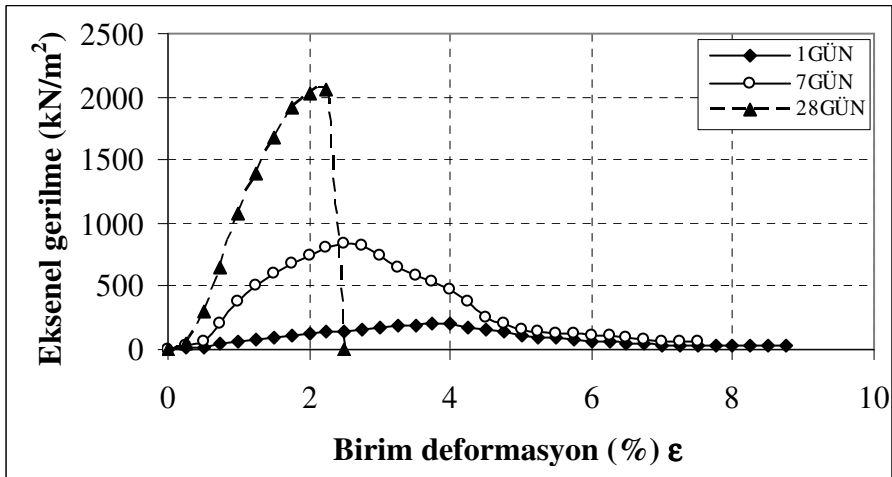
Şekil B. 25 10UK8C numunesinin 1 gün, 7 gün ve 28 gün kür sürelerine göre serbest basınç mukavemetleri



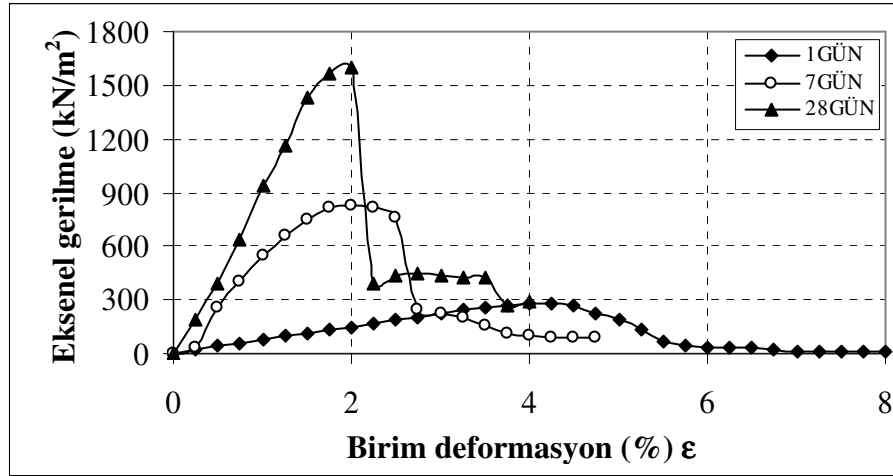
Şekil B. 26 20UK2C numunesinin 1 gün, 7 gün ve 28 gün kür sürelerine göre serbest basınç mukavemetleri



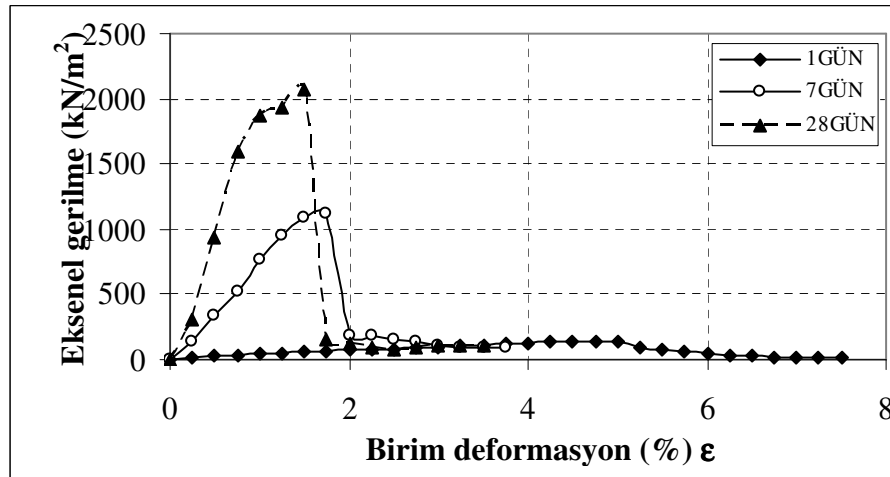
Şekil B. 27 20UK5C numunesinin 1 gün, 7 gün ve 28 gün kür sürelerine göre serbest basınç mukavemetleri



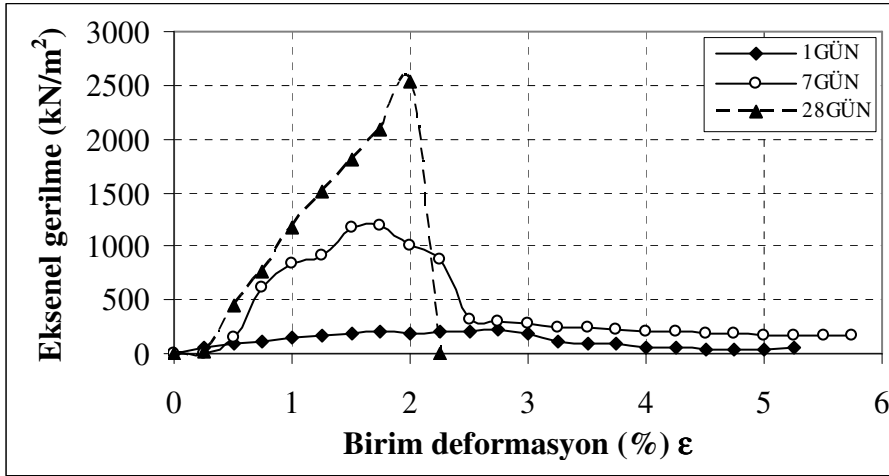
Şekil B. 28 20UK8C numunesinin 1 gün, 7 gün ve 28 gün kür sürelerine göre serbest basınç mukavemetleri



Şekil B. 29 30UK2C numunesinin 1 gün, 7 gün ve 28 gün kür sürelerine göre serbest basınç mukavemetleri

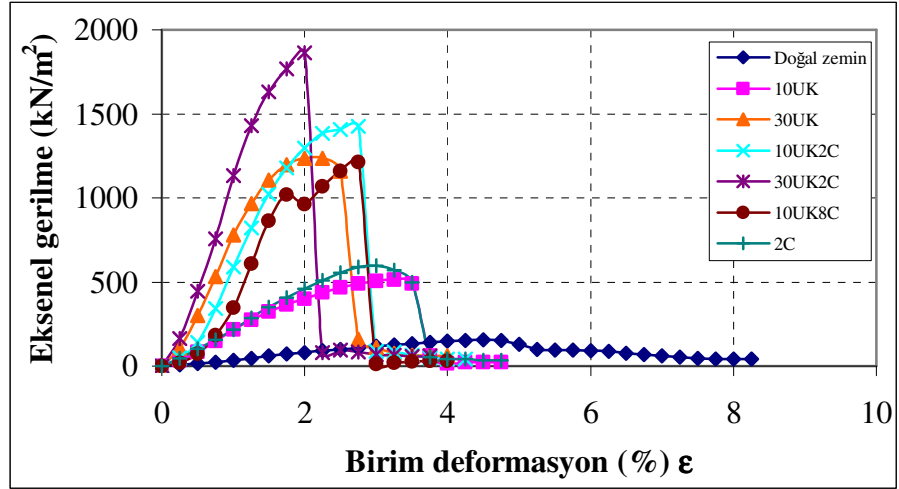


Şekil B. 30 30UK5C numunesinin 1 gün, 7 gün ve 28 gün kür sürelerine göre serbest basınç mukavemetleri

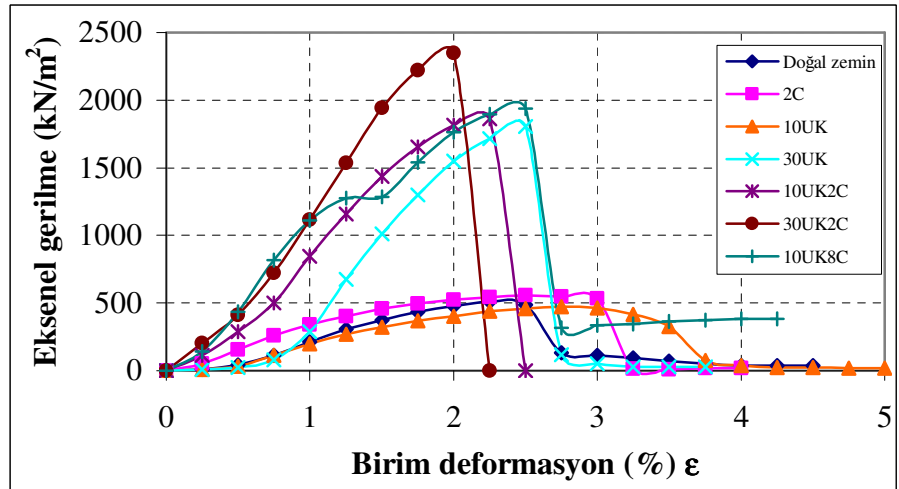


Şekil B. 31 30UK8C numunesinin 1 gün, 7 gün ve 28 gün kür sürelerine göre serbest basınç mukavemetleri

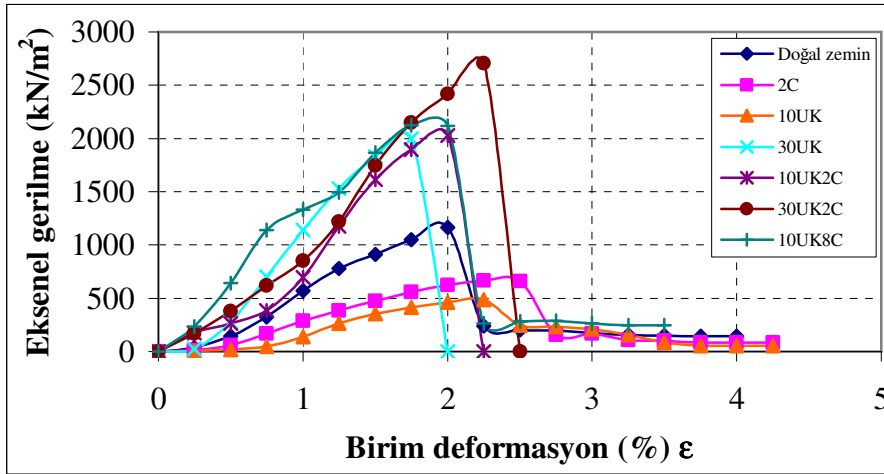
EK C. Donma-Çözülme Deney Sonuçları



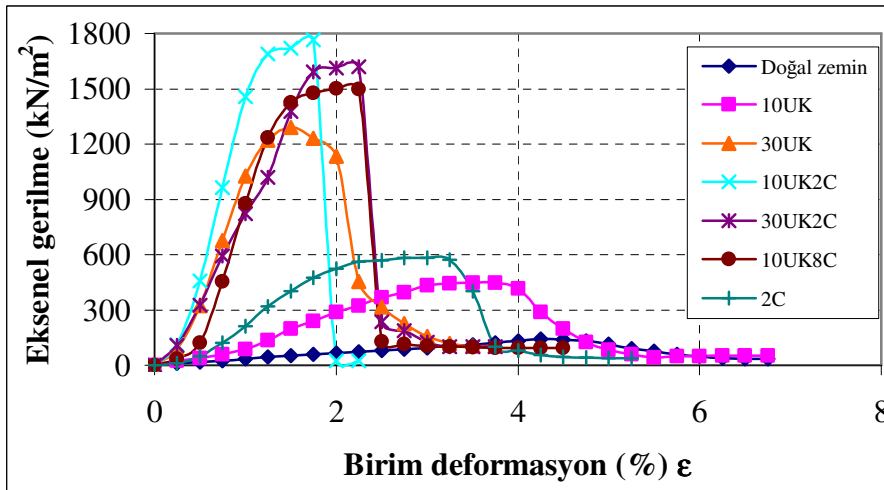
Şekil C. 1 1 çevrimlik donma-çözülme deney sonuçları birinci grup numunelerin eksenel gerilme-birim deformasyon eğrileri



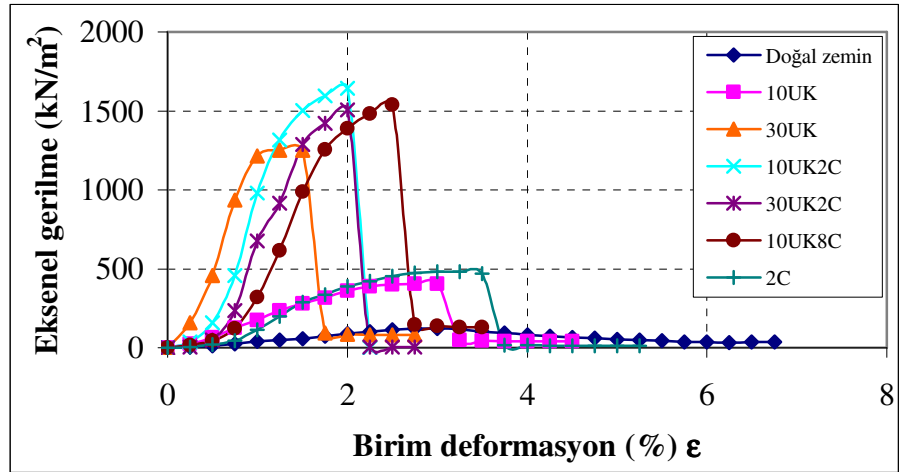
Şekil C. 2 3 çevrimlik donma-çözülme deney sonuçları birinci grup numunelerin eksenel gerilme-birim deformasyon eğrileri



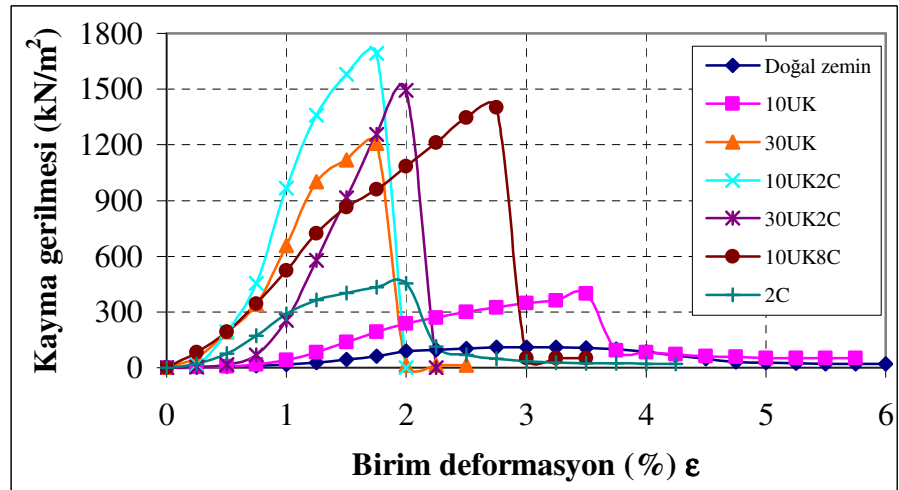
Şekil C. 3 7 çevrimlik donma-çözölmeye bırakılan birinci grup numunelerin eksenel gerilme-birim deformasyon eğrileri



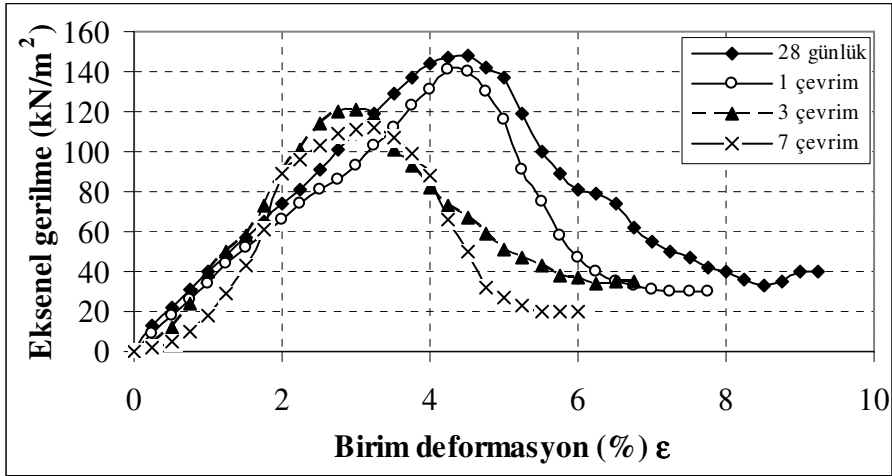
Şekil C. 4 1 çevrimlik donma-çözölmeye bırakılan ikinci grup numunelerin eksenel gerilme-birim deformasyon eğrileri



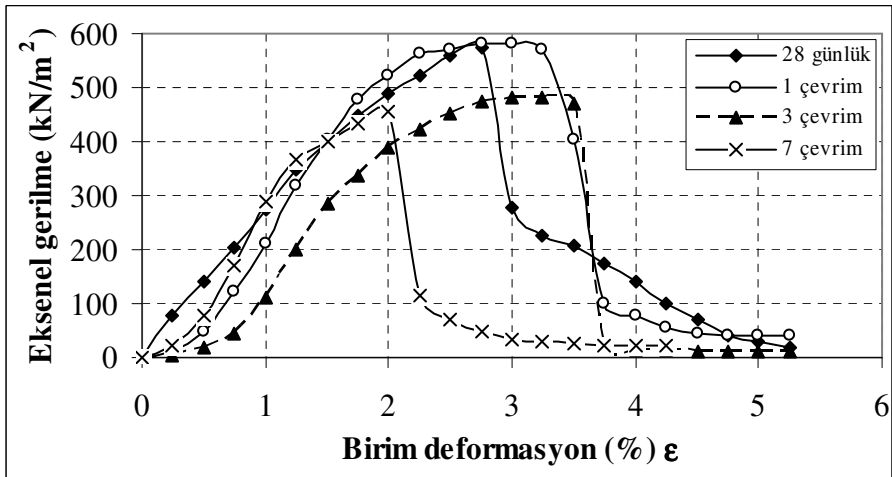
Şekil C. 5 3 çevrimlik donma-çözölmeye bırakılan ikinci grup numunelerin aksel gerilme-birim deformasyon eğrileri



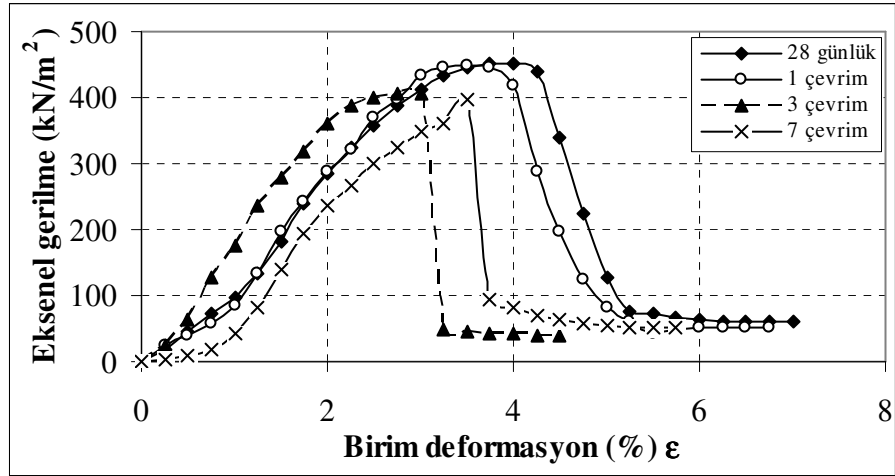
Şekil C. 6 7 çevrimlik donma-çözölmeye bırakılan ikinci grup numunelerin aksel gerilme-birim deformasyon eğrileri



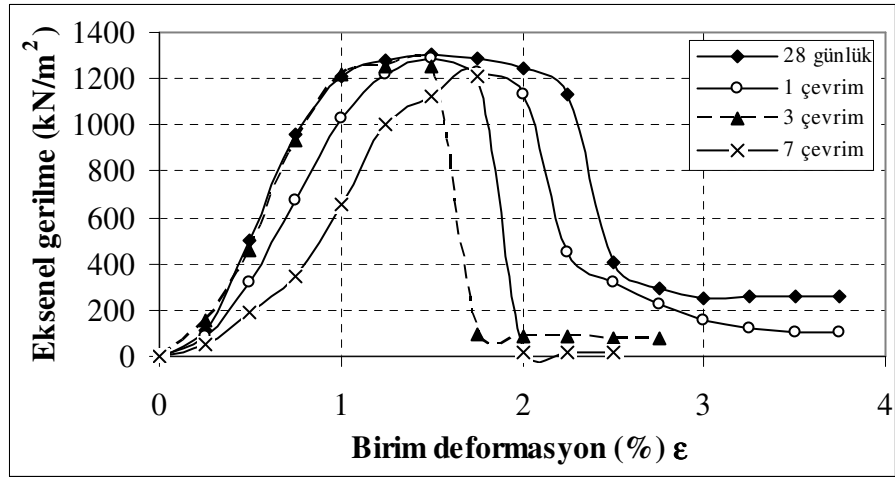
Şekil C. 7 İkinci grup doğal zemin numunesinin çevrim sayılarına göre serbest basınç mukavemetleri



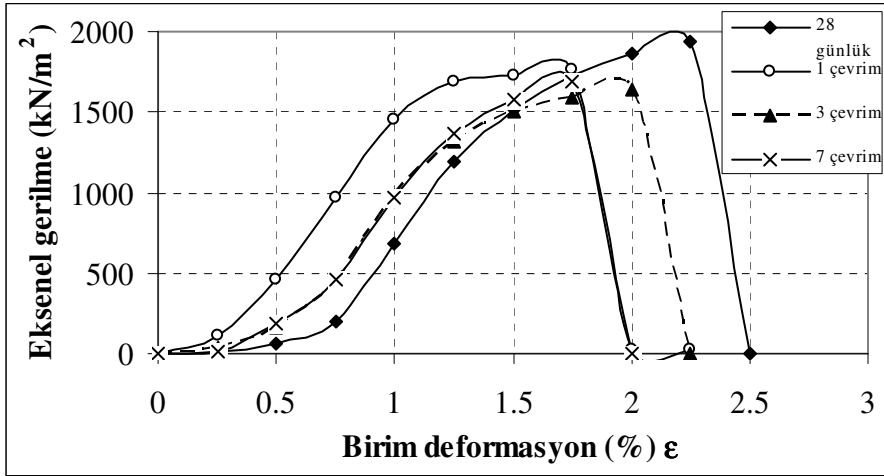
Şekil C. 8 İkinci grup 2C numunesinin çevrim sayılarına göre serbest basınç mukavemetleri



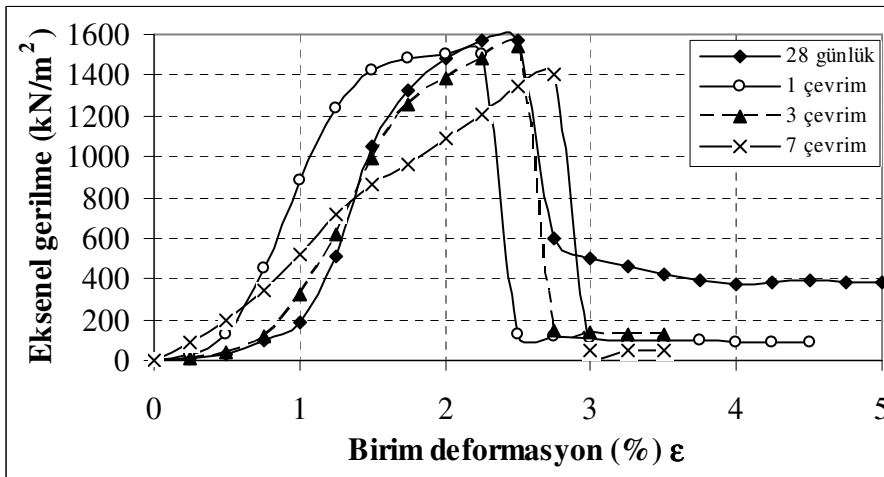
Şekil C. 9 İkinci grup 10UK numunesinin çevrim sayılarına göre serbest basınç mukavemetleri



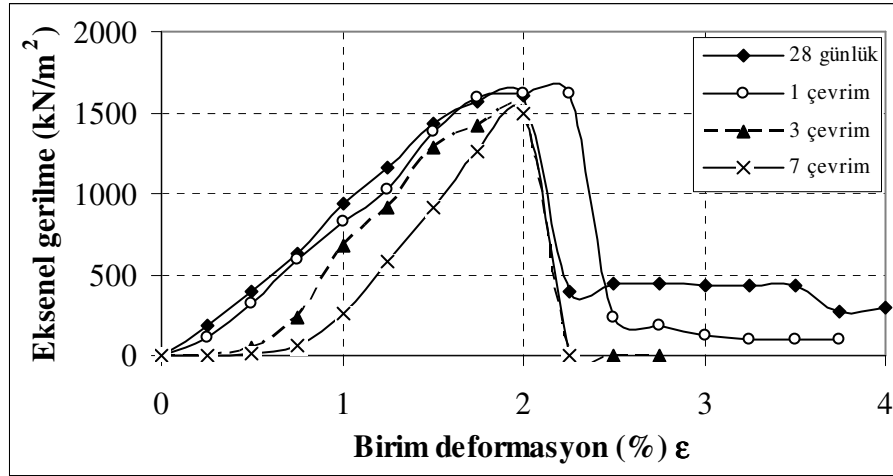
Şekil C. 10 İkinci grup 30UK numunesinin çevrim sayılarına göre serbest basınç mukavemetleri



Şekil C. 11 İkinci grup 10UK2C numunesinin çevrim sayılarına göre serbest basınç mukavemetleri



Şekil C. 12 İkinci grup 10UK8C numunesinin çevrim sayılarına göre serbest basınç mukavemetleri



Şekil C. 13 İkinci grup 30UK2C numunesinin çevrim sayılarına göre serbest basınç mukavemetleri

ÖZGEÇMİŞ

Alper Erol, 1981 yılında Salihli/MANİSA’da doğdu. İlk öğrenimini Altınordu İlkokulu’nda, orta öğrenimini Salihli Sekine Evren Anadolu Lisesi’nde tamamladı. Lisans çalışmasını Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde 2003 yılında tamamladı. Halen Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Ana Bilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.

