

**T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KİLLERİN STABİLİZASYONUNDA DOĞAL PUZOLANİK KATKI
MADDESİ İNCELİĞİNİN DAYANIM VE DURABİLİTEYE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Duygu FİDAN

Kasım - 2016

BAYBURT

**KİLLERİN STABİLİZASYONUNDA DOĞAL PUZOLANİK KATKI
MADDESİ İNCELİĞİNİN DAYANIM VE DURABİLİTEYE ETKİSİ**

İnş. Müh. Duygu FİDAN

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Fatih YILMAZ**

**T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KİLLERİN STABİLİZASYONUNDA DOĞAL PUZOLANİK KATKI
MADDESİ İNCELİĞİNİN DAYANIM VE DURABİLİTEYE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Duygu FİDAN

2016

BAYBURT

Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAY SAYFASI

KİLLERİN STABİLİZASYONUNDA DOĞAL PUZOLANİK KATKI MADDESİ İNCELİĞİNİN DAYANIM VE DURABİLİTEYE ETKİSİ

Yrd. Doç. Dr. Fatih YILMAZ danışmanlığında, İnş. Müh. Duygu FİDAN tarafından hazırlanan bu tez çalışması 18/11/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Fahri Uluç ÖZBAYOĞLU İmza :

Üye : Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Fatih YILMAZ

İmza :

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.


Doç. Dr. Metin UÇURUM

Enstitü Müdür Vekili

Not: Bu tezde kullanılan ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bu çalışmada şahsıma ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.


Duygu FİDAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KİLLERİN STABİLİZASYONUNDA DOĞAL PUZOLANİK KATKI MADDESİ İNCELİĞİNİN DAYANIM VE DURABİLİTEYE ETKİSİ

Duygu FİDAN

Bayburt Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Fatih YILMAZ

Mühendislik özellikleri zayıf olan zeminlerin fiziksel, kimyasal, mekanik ve hidrolik özelliklerinin iyileştirilmesine zemin stabilizasyonu denilmektedir. Bu çalışma kapsamında tek başına çimentolaşma kabiliyeti yetersiz olan perlit, puzolanik katkı olarak şişen bir zeminin stabilizasyonunda kullanılmıştır. Birincil bağlayıcı olarak yüksek CaO içeriğinden dolayı kireç seçilmiştir.

Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre düşük plastisiteli kil olan doğal zemine %6 kireç (optimum kireç oranı) ve %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında perlit karıştırılmıştır. Puzolanik katkı olarak kullanılan perlit doğal ve ince öğütülmüş biçimde iki farklı şekilde stabilizasyon çalışmasında kullanılmıştır. Hazırlanan karışımların indeks, dayanım, durabilite ve şişme gibi geoteknik özellikleriyle bu özelliklerin perlitin inceltilmesiyle nasıl değiştiği çalışma kapsamında ele alınmıştır.

Deneylerden elde edilen veriler ışığında, puzolanik katkı olan perlitin inceltilmesinin dayanım ve durabilite değerlerini doğrudan etkilediği ve daha güçlü veriler ortaya çıkardığı tespit edilmiştir. Perlitin inceltilmesiyle birlikte daha düşük perlit oranlarında daha yüksek mukavemet değerlerinin meydana geldiği belirlenen bu deneysel çalışma sonunda, puzolanik katkı inceliğinin zemin stabilizasyon çalışmalarında olumlu etkilerinin olduğu sonucuna varılmıştır.

2016, 112 sayfa

Anahtar kelimeler: Zemin stabilizasyonu, Puzolanik katkı maddesi, Perlit, Kireç, Kil

ABSTRACT

MS Thesis

FINENESS EFFECT OF NATURAL POZZOLANIC ADDITIVE ON STRENGTH AND DURABILITY IN STABILIZATION OF CLAYS

Duygu FIDAN

Bayburt University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Department of Civil Engineering
Supervisor : Assist. Prof. Dr. Fatih YILMAZ

Improvement of physical, chemical, mechanical and hydraulic properties of poor bearing soil is called soil stabilization. Within the scope of this study perlite, has inadequate cementing ability by oneself, was used as a pozzolanic additive in stabilization of an expansive soil. Lime was chosen as a primary binder due to its high CaO content.

Low plasticity clayey soil according to Unified Soil Classification System, was mixed with 6% of (optimum lime ratio) and 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% of perlite. Pozzolanic additive perlite was evaluated in natural and finely granulated forms in stabilization study. Geotechnical properties such as index, strength, durability and swelling features of mixtures and how this properties may change by fining perlite was considered in the scope of this study.

Within the light of data obtained from experiments, it was found that fineness of pozzolanic additive perlite has direct effect in strength and durability values and it reveals more powerful datas. As a result of this study, in which by fining of perlite lower perlite rate gives higher strength values, it was revealed that fineness of pozzolanic additive has positive impact in stabilization of soil.

2016, 112 pages

Keywords : Soil stabilization, Pozzolanic additive, Perlite, Lime, Clay

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum bu çalışma, Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca yardım, ilgi ve desteklerini hiçbir şekilde esirgemeyen, aktardığı bilgi ve deneyimleriyle çalışmamın her aşamasına katkıda bulunan tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Fatih YILMAZ'a sonsuz teşekkür ederim.

Hem lisans hem de yüksek lisans eğitimimin süresince bu seviyeye gelmemde emekleri geçen tüm hocalarıma ve kendimi geliştirmem, mesleğim hakkında gereken tecrübeleri edinmem açısından teşvik ve ilgisini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Fahri Uluç ÖZBAYOĞLU'na saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her aşamasında yanımda olan mutluluğum için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan annem Ayşe FİDAN ve rahmetli babam Emirpaşa FİDAN'a, değerli ablam Derya FİDAN ATEŞ ve eşine, yeğenime, başarılarımın gizli kahramanı canım ablam Deniz FİDAN'a, kan bağı olmasa da can bağı olan kardeşim M. Yavuz ÖZTÜRK'e teşekkür ederim.

Rahmetli canım babam Emirpaşa FİDAN ve kıymetli ailesine...

Duygu FİDAN

Kasım /2016

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaçlar	4
2. KAYNAK ÖZETLERİ	6
2.1. Zemin Stabilizasyon Yöntemleri.....	6
2.1.1. Mekanik Stabilizasyon	10
2.1.2. Kimyasal Stabilizasyon	11
2.1.2.1. Kireç ile Zemin Stabilizasyonu	14
2.1.2.2. Çimento ile Zemin Stabilizasyonu	18
2.1.2.3. Bitüm ile Zemin Stabilizasyonu	19
2.1.2.4. Puzolanlar ile Zemin Stabilizasyonu	20
3. MATERYAL ve YÖNTEMLER	32
3.1. Materyal	32
3.1.1. Doğal Malzeme	33
3.1.2. Kireç	36
3.1.3. Perlit	39
3.2. Yöntemler	42
3.2.1. Deneyle Referans Alınan ASTM Standartları	42
3.2.2. Zeminin Sınıflandırılması	42

3.2.3. Kıvam Limitleri.....	43
3.2.4. Kompaksiyon Deneyi.....	44
3.2.5. Serbest Basınç Deneyi.....	45
3.2.6. Islanma-Kuruma Periyodu Deneyi.....	46
3.2.7. Donma-Çözülme Çevrimi	47
3.2.8. Şişme Yüzdesi Deneyi	49
3.2.9. Şişme Basıncı Deneyi	50
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	51
4.1. Deneylelerden Elde Edilen Veriler	51
4.1.1. Kıvam Limitleri.....	52
4.1.2. Kompaksiyon Parametreleri.....	57
4.1.3. Serbest Basınç Dayanımları	61
4.1.4. Durabilite Tetkikleri.....	71
4.1.4.1. Islanma-Kuruma Periyodu	71
4.1.4.2. Donma-Çözülme Çevrimi	84
4.1.5. Şişme Yüzdesi Deneyi	88
4.1.6. Şişme Basıncı Deneyi	89
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	90
KAYNAKLAR	94
EKLER.....	99
EK 1 Düşen koni penetrasyon deneyi sonuçları	99
EK 2 Kompaksiyon deneyi sonuçları	106
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	Aktivite
CH	Yüksek plastisiteli inorganik kil
cm ²	Santimetrekare
cm ³	Santimetreküp
CL	Düşük plastisiteli inorganik kil
CAH	Kalsiyum alümina hidrate
CSH	Kalsiyum silika hidrate
GC	Killi çakıl
GM	Siltli çakıl
GP	Kötü derecelenmiş çakıl
G _s	Özgül ağırlık
GW	İyi derecelenmiş çakıl
kPa	Kilopaskal (kN/m ²)
K-Ç-P	Kireç, çimento ve puzolan birleşimi
LL	Likit limit
mm	Milimetre
m ³	Metreküp
Mg	Megagram
MH	Yüksek plastisiteli inorganik silt
ML	Düşük plastisiteli inorganik silt
P	Ağırlıkça elekten geçen malzeme yüzdesi
PI	Plastisite indisi
PL	Plastisite limit

S	Doğal zemin
SL	Doğal zemin, kireç karışımı
SLP	Doğal zemin, kireç, perlit karışımı
sn	Saniye
SM	Siltli kum
SW	İyi derecelenmiş kum
SP	Kötü derecelendirilmiş kum
pH	Hidrojen gücü
w	Su muhtevası
w _{opt}	Optimum su muhtevası
μ	Mikro
μm	Mikrometre
φ	İçsel sürtünme açısı
°	Derece
°C	Santigrat derece
ρ _k	Kuru yoğunluk
ρ _{kmax}	Maksimum kuru yoğunluk

Kısaltmalar

AASHTO	Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ASCE	Amerika İnşaat Mühendisleri Derneği
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
CBR	Kaliforniya taşıma oranı
CPT	Koni penetrasyon deneyi
SPT	Standart penetrasyon deneyi
USCS	Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Dane boyutuna göre zemin stabilizasyon yöntemlerinin belirlenmesi.....	2
Şekil 1.2 Zemin stabilizasyon yöntemleri	3
Şekil 2.1 Zemin üçgen gradasyonu	12
Şekil 2.2 İtalya'daki puzolanın ortaya çıktığı yer.....	20
Şekil 2.3 Puzolanların sınıflandırılması	22
Şekil 2.4 Doğal puzolanların bazıları (volkanik tüf, volkanik cam, diatomit)	23
Şekil 2.5 Uçucu kül, silis dumanı, pirinç kabuğu külü, yüksek fırın cürufu (yapay puzolanlar).....	25
Şekil 3.1 Doğal malzemenin alındığı Demirözü ilçesinin yeri.....	34
Şekil 3.2 Lazer kırınım yönteminden bir görüntü	35
Şekil 3.3 Doğal malzemenin dane boyutu dağılım eğrisi	35
Şekil 3.4 ASTM D 6276'ya (2006) uygun optimum kireç oranının belirlenmesi.....	38
Şekil 3.5 Kirece ait dane boyutu dağılımı	38
Şekil 3.6 Erzincan Mollaköy'deki perlit ocağı	39
Şekil 3.7 Doğal perlit ve elek açıklığı 0,075 mm altı perlit	40
Şekil 3.8 Doğal perlitinin dane boyutu dağılım eğrisi	41
Şekil 3.9 Elek açıklığı 0,075 mm altı perlitin dane boyutu dağılım eğrisi	41
Şekil 3.10 Düşen koni penetrasyon aleti ile likit limit değerinin belirlenmesi	43
Şekil 3.11 Standart proktor deneyinin belirlenmesi	45
Şekil 3.12 Tek eksenli basınç deneyi düzeneği	46
Şekil 3.13 Islanma-kuruma periyodu deneyi	47
Şekil 3.14 Donma-çözülme deney düzeneği	48
Şekil 3.15 Şişme yüzdesi deney düzeneği	49
Şekil 3.16 Şişme basıncı deney düzeneği	50
Şekil 4.1 SLP1 karışımlarına ait likit limitler	54

Şekil 4.2 SLP2 karışımlarına ait likit limitler	54
Şekil 4.3 SLP1 karışımlarına ait plastik limitler	55
Şekil 4.4 SLP2 karışımlarına ait plastik limitler.....	55
Şekil 4.5 SLP1 karışımlarına ait plastisite indisleri.....	56
Şekil 4.6 SLP2 karışımlarına ait plastisite indisleri.....	56
Şekil 4.7 SLP1 karışımlarının optimum su içerikleri	59
Şekil 4.8 SLP2 karışımlarının optimum su içerikleri	59
Şekil 4.9 SLP1 karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları	60
Şekil 4.10 SLP2 karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları	60
Şekil 4.11 Serbest basınç deneyi numunelerinin bazılarının görüntüleri	61
Şekil 4.12 Deney numunelerine desikatör içerisinde kür uygulanması.....	62
Şekil 4.13 Deney numunelerinin hazırlanışı	62
Şekil 4.14 Tek eksenli serbest basınç dayanımı testi	63
Şekil 4.15 SLP1 karışımlarının 7 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları	67
Şekil 4.16 SLP2 karışımlarının 7 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları	67
Şekil 4.17 SLP1 karışımlarının 28 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları	68
Şekil 4.18 SLP2 karışımlarının 28 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları	68
Şekil 4.19 SLP1 karışımlarının 84 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları	69
Şekil 4.20 SLP2 karışımlarının 84 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları	69
Şekil 4.21 Kireçli karışımların serbest basınç dayanım değerleri değişimi(7.gün)....	70
Şekil 4.22 Kireçli karışımların serbest basınç dayanım değerleri değişimi(28.gün)..	70
Şekil 4.23 Kireçli karışımların serbest basınç dayanım değerleri değişimi(84.gün)..	71
Şekil 4.24 Islanma-kuruma periyodu için hazırlanan deney numuneleri	72

Şekil 4.25 S ve SLP1 numunelerinin 12 adet ıslanma-kuruma periyodundan birine ait görüntü	72
Şekil 4.26 SL ve SLP2 numunelerinin 12 adet ıslanma-kuruma periyodundan birine ait görüntü	73
Şekil 4.27 SL karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi	73
Şekil 4.28 SLP1/5 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi....	74
Şekil 4.29 SLP1/10 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi..	74
Şekil 4.30 SLP1/15 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi..	75
Şekil 4.31 SLP1/20 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi..	75
Şekil 4.32 SLP1/25 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi..	76
Şekil 4.33 SLP1/30 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi..	76
Şekil 4.34 SL ve SLP1 karışımlarının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi.....	77
Şekil 4.35 12 kez ıslanma-kurumaya maruz kalmış SL ve SLP1 karışım numunelerinin görüntüleri.....	78
Şekil 4.36 SLP2/5 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi....	79
Şekil 4.37 SLP2/10 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi..	79
Şekil 4.38 SLP2/15 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi..	80
Şekil 4.39 SLP2/20 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi..	80
Şekil 4.40 SLP2/25 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi..	81
Şekil 4.41 SLP2/30 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi..	81
Şekil 4.42 SL ve SLP2 karışımlarının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi.....	82
Şekil 4.43 12 kez ıslanma-kuruma sonrasındaki SLP2 karışım numunelerinin görüntüleri	83
Şekil 4.44 Donma-çözülme çevrimi ve tek eksenli basınç dayanımı işlemleri	84
Şekil 4.45 SLP1 karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımları	87
Şekil 4.46 SLP2 karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımları	87

Şekil 4.47 SLP karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımı değişimi.....	88
Şekil 4.48 Şişme yüzdesi deney numuneleri	88
Şekil 4.49 Şişme basıncı deneyinden bir görüntü.....	89

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Zemin iyileştirme yöntemlerinin stabilizasyon amacına göre kullanımı ..7	7
Çizelge 2.2 Farklı tür zeminlere uygulanan stabilizasyon yöntemleri8	8
Çizelge 2.3 Zemin iyileştirmesinde yaklaşık maliyet tablosu9	9
Çizelge 2.4 Mekanik stabilizasyonda gerekli olan gradasyon sınırları10	10
Çizelge 2.5 Zemin stabilizasyonunda katkıların seçimi13	13
Çizelge 2.6 Kireç, çimento, puzolan-kireç ve puzolan-çimento-kireç birleşimlerinde sağlaması gerekli olan durabilite şartları14	14
Çizelge 2.7 Farklı zemin çeşitleri için yaklaşık kireç miktarları15	15
Çizelge 2.8 Kireç karışım oranları15	15
Çizelge 2.9 Değişik zemin sınıflarına göre çimento miktarı19	19
Çizelge 2.10 Doğal puzolanların kimyasal bileşimdeki oksit içerikleri24	24
Çizelge 2.11 Uçucu kül ve taban külünün kimyasalları26	26
Çizelge 2.12 Termik santrallerin Türkiye'deki faaliyetleri27	27
Çizelge 2.13 Bazı ülkelerdeki silis dumanı kimyasalları28	28
Çizelge 2.14 Bazı ülkelerdeki yüksek fırın cürufu kimyasalları29	29
Çizelge 2.15 ASTM C 989'a (1994) göre yüksek fırın cürufunda olması gereken özellikler30	30
Çizelge 3.1 Deney numuneleriyle ilgili notasyonlar33	33
Çizelge 3.2 Doğal zeminin özellikleri36	36
Çizelge 3.3 Söndürülmüş kalker kirecine ait kimyasal ve fiziksel özellikler.....37	37
Çizelge 3.4 Kirecin analiz sonuçları37	37
Çizelge 3.5 200 No'lu elek altı perlite ait kimyasal ve fiziksel analizler40	40
Çizelge 3.6 Deneylerle ilgili ASTM standartları42	42
Çizelge 4.1 Deneydeki numunelere ait kıvam limitleri52	52
Çizelge 4.2 SLP1 karışımlarının kompaksiyon parametreleri57	57

Çizelge 4.3 SLP2 karışımlarının kompaksiyon parametreleri	58
Çizelge 4.4 SLP1 karışımlarına ait tek eksenli basınç dayanımı sonuçları	64
Çizelge 4.5 SLP2 karışımlarına ait tek eksenli basınç dayanımı sonuçları	64
Çizelge 4.6 SLP1 karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli basınç dayanımı sonuçları	85
Çizelge 4.7 SLP2 karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli basınç dayanımı sonuçları	85

1. GİRİŞ

Zemin, kayaların ayrışmasıyla meydana gelen katı danelerle içerisinde su ve/veya hava dolu boşluklardan oluşan ve organik maddeler içerebilen doğal malzemelerdir. Mekanik ve hidrolikle ilgili kurallardan yararlanarak, zeminlerin davranış özelliklerini inceleyen bilim dalına zemin mekaniği adı verilir.

Stabilizasyon, zeminlerin belirli özelliklerinin amaçlanan bir mühendislik uygulamasında kullanılarak iyileştirilmesi işlemidir. Zeminin zayıf özelliklerinin iyileştirilmesi üç kategoride incelenebilir:

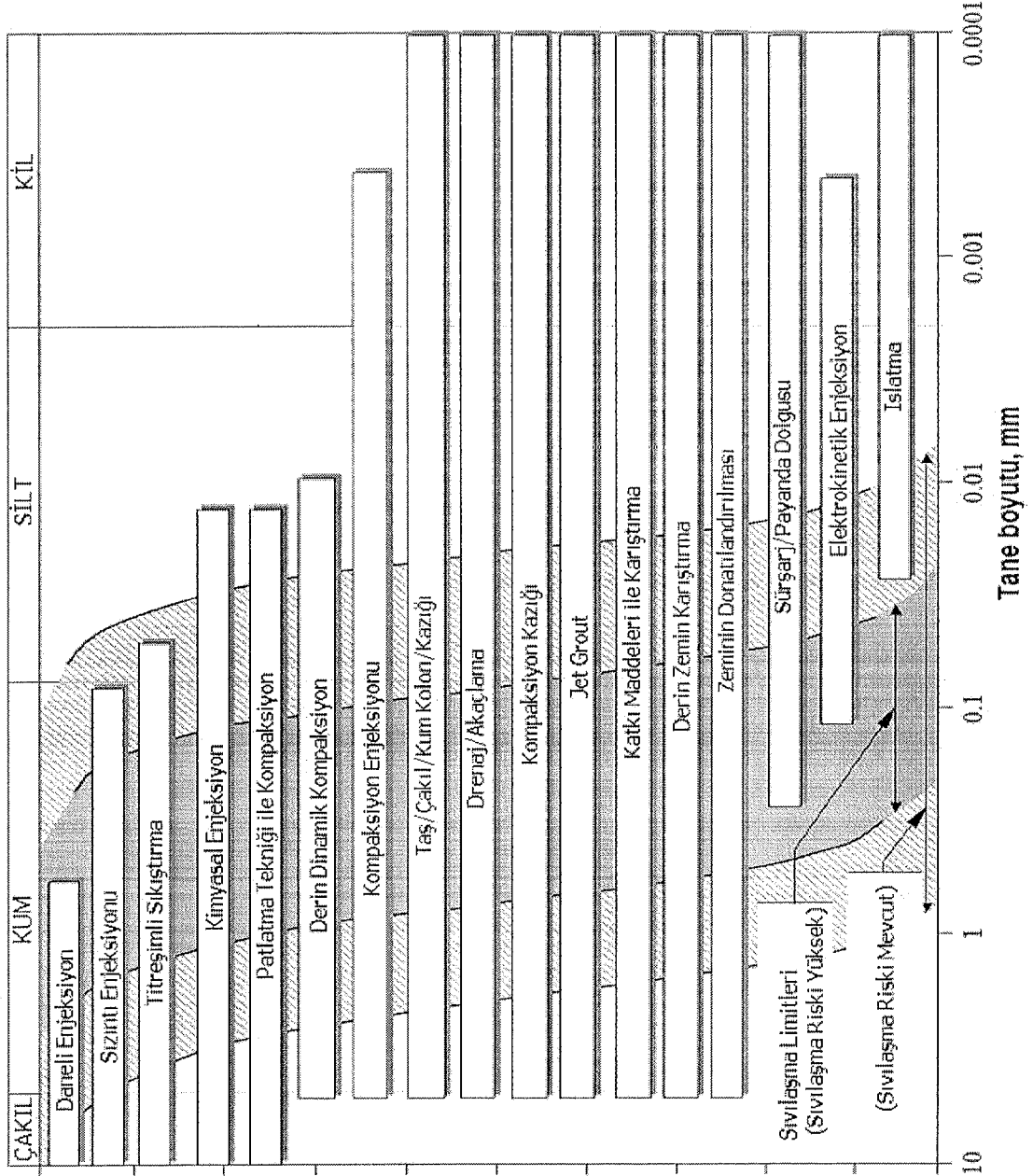
- ◆ Zemini geçici olarak iyileştirme (Yeraltı su seviyesinin düşürülmesi, ısıtma işlemler ve elektro-osmoz yöntemleri)
- ◆ Zemini kalıcı olarak ve başka bir malzeme katmadan iyileştirme (Yüzey kompaksiyonu, patlama ile sıkıştırma, vibro-kompaksiyon ve dinamik konsolidasyon yöntemleri)
- ◆ Zemini kalıcı olarak ve katkı maddeleri kullanarak iyileştirme (Kireç, çimento, bitüm gibi katkı maddeleri ile zeminin üniform bir şekilde karıştırılması, kireç kazıkları, zeminin değiştirilmesi, ön yükleme ile birlikte dikey drenlerin kullanılması, enjeksiyon ve geotekstiller ile stabilizasyon).

Zemin iyileştirme yöntemlerindeki esas amaç, zeminin mekanik araçlarla boşluk oranının azaltılması veya çeşitli karışımlarla zemin boşluklarının doldurulması işlemidir. Kayma direnci, geçirimsizlik, oturma ve benzeri özelliklerinden dolayı kullanım amacına uygun olmayan zeminlerin ortaya çıkardığı problemlerin çözümünde kullanılacak yöntemler:

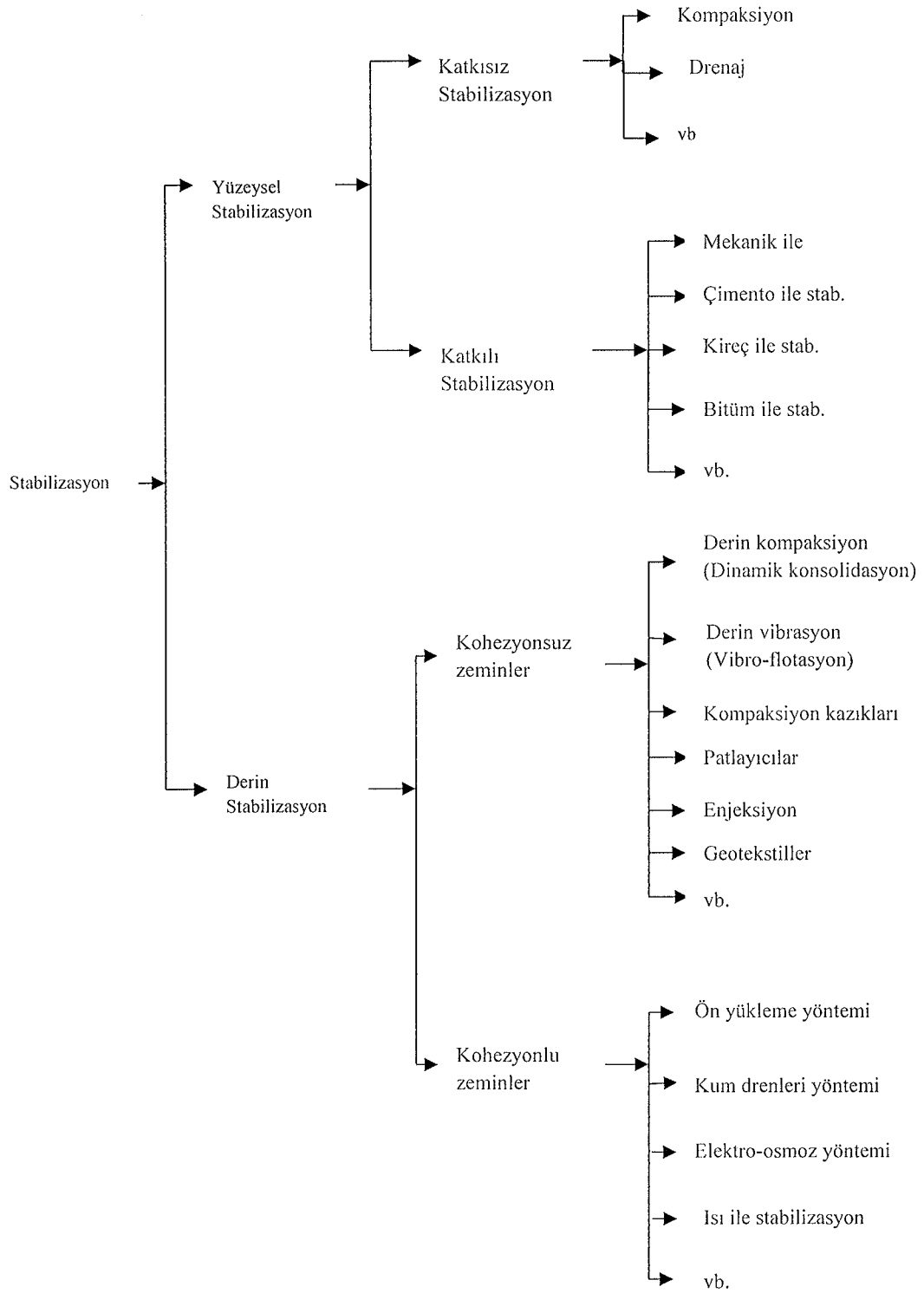
- Kötü özellikleri bulunan zeminin kazılması ile yerine uygun özelliklerdeki zemini taşıyarak koyma,
- Zeminde değişiklik yapılmadan, üstyapı projesi için malzemenin kalitesinin artırılması ve yapısal öğelerinin ebatlarının değiştirilmesi

- Var olan zeminin iyileştirilmesi (Balta, 1984).

Zemin türlerine göre uygulanabilecek zemin stabilizasyon yöntemlerini Mitchell ve Gallagher (1998) Şekil 1.1'deki gibi verirken, Uzuner (2013) zemin ıslah yöntemlerini Şekil 1.2'deki gibi açıklamıştır.



Şekil 1.1 Dane boyutuna göre zemin stabilizasyon yöntemlerinin belirlenmesi (Mitchell ve Gallagher, 1998)



Şekil 1.2 Zemin stabilizasyon yöntemleri (Uzuner, 2013)

Kirecin maliyetinin ucuz olması ve oldukça çok miktarda bulunmasından dolayı zemin-kireç stabilizasyonu karayollarında fazlaca uygulanan stabilizasyon

yöntemidir. Kil oranına bakılarak zemine karıştırılacak kirecin miktarının da belirlenmesiyle kireç stabilizasyonu uygulanabilir.

Kireç stabilizasyonunda zemine kuru ağırlığının %5-10'u oranında kireç katılabilir. Kohezyonlu zeminlerde kullanılan kireç stabilizasyonu zeminin plastisite indisini düşürebilir. Serbest basınç deneyi ile katılacak kireç miktarı belirlenebilir (Uzuner, 2013).

Puzolanlar, normal sıcaklık değerlerinde, sulu ortamda ve bilhassa kireçle birleşerek bağlayıcılık özelliğine sahip olabilen malzemelerdir (Yılmaz, 2015). Kireçle birlikte kimyasal reaksiyon sonucunda oluşan bileşikler suda çözünmeyen bir kararlılık göstermektedir (Massazza, 1989).

Silikat (SiO_2) ve alüminat (Al_2O_3) içeren doğal puzolan olan perlit, yetersiz CaO içermesinden dolayı kendi başlarına bağlayıcılık özelliğine sahip değildirler. Yüksek CaO içeren kireç veya çimento gibi katkı maddeleriyle uygun su içeriğinde ve normal ortam sıcaklığında bu eksiklik tamamlanabilir. Bundan dolayı yüksek CaO içermeyen puzolanlar ikincil bağlayıcıdır.

Türkiye'deki perlit oluşumları yüzeye yakındır. Bu yüzden üretim zorluğu bulunmamaktadır. Perlit kalitemiz de oldukça iyidir (Çalık, 2012).

1.1 Amaçlar

Bu çalışmanın ana amacı; doğal puzolan olan perlitin kireçle birlikte zemin stabilizasyonunda kullanılması, kullanılan perlitin öğütülerek inceltmesi sonucu meydana gelen incelik etkisinin indeks, dayanım, durabilite ve şişme değerleri üzerinde nasıl sonuçlar meydana getirebileceğinin araştırılmasıdır.

Doğal zemine optimum kireç oranında ilave edilen karışıma hem doğal perlitin hem de 200 No'lu elekten elenmiş perlitin belirlenen oranlarda katılmasıyla çalışmanın amacına uygun tüm deneyler gerçekleştirilmiştir.

Hazırlanmış numunelere 7, 28 ve 84 günlük kür sonrasında tek eksenli serbest basınç dayanımı yapılarak dayanım değerlerinde hangi incelikteki perlitin hangi oranı ve/veya oranları kullanılmasının daha iyi sonuçlar ortaya çıkardığı araştırılmıştır.

Hazırlanan karışımların durabilite davranışlarını belirlemek için, tüm numuneler ıslanma-kuruma ve donma-çözülme deneylerine tabi tutulmuştur. Şişme davranışlarının da ayrıca ele alındığı çalışma kapsamında puzolanik bir katkı olan perlit doğal ve öğütülmüş biçimde tüm karışımlara ilave edilmiş ve her bir deney için puzolanik katkı maddesi inceliğinin etkisi irdelenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Zemin stabilizasyon yöntemleri ve bu yöntemlere ait farklı uygulamalara bu bölümde yer verilmiştir.

2.1 Zemin Stabilizasyon Yöntemleri

Zemin, çevre koşulları etkisindeki kayaların ayrışması ve parçalanmasıyla meydana gelmektedir. Kayaların ayrışması sonucunda ana kayanın olduğu yerde danelerin kalmasıyla zemin tabakaları oluşmaktadır. Kimi zaman da rüzgâr, su gibi etkenlerden gelen kuvvetlerin etkisinde uzak yerlere kadar taşınabilmekte ve bazı bölgelerde çökerek zemin tabakalarının oluşmasına neden olmaktadır.

Genellikle mekanik veya kimyasal olarak zemin iyileştirme yöntemleri kullanılmasına rağmen bazı durumlarda elektriksel veya termal iyileştirme yöntemleri de kullanılabilir (Holtz vd., 2015). Yük altında sıkışmaları azaltmak, yüzey bozulmalarına karşı direnci arttırmak, sızıntı suyu kontrolü yapmak, gerilmeler altındaki şekil değiştirmeleri azaltmak bu yöntemlerin uygulanmasının başlıca ilkesidir.

Mekanik stabilizasyon, zeminlerin fiziksel, hidrolik ve mekanik özelliklerini fiziksel işlemler yardımıyla değiştirmeye yarayan zemin iyileştirme tekniğidir.

Kimyasal stabilizasyon, zemine katkılarla kimyasal reaksiyon yaptırılıp zeminin özelliklerinin değiştirilmesi işlemleridir (Lambe vd., 1990).

Zemin iyileştirme yöntemlerinin stabilizasyon amacına göre kullanımı Çizelge 2.1’de verilmiştir (U.S. Army Corps. of Eng., 2003). Çizelge 2.2’de farklı tür zeminlere uygulanan stabilizasyon yöntemleri belirtilmiştir (Tunç, 2002).

Çizelge 2.1 Zemin iyileştirme yöntemlerinin stabilizasyon amacına göre kullanımı
(U.S. Army Corps. of Eng., 2003)

Amaçlar	Stabilizasyon yöntemleri
Sıvılaşma direncini arttırmak, Deplasmanları azaltmak.	Vibrokompaksiyon Taş kolonlar Derin dinamik kompaksiyon Patlayıcı tekniği ile kompaksiyon Çakıl kolonlar Jet grout Kompaksiyon enjeksiyonu Granüler kolonlar (kum ve çakıl)
Farklı oturmaya maruz kalabilecek yapıların zeminlerini ıslah etmek. Farklı oturma, deformasyon ve kırılma direncini arttırmak.	Kompaksiyon enjeksiyonu Jet grout Mini kazıklar
Ani oturmaları azaltmak.	Vibrokompaksiyon Derin dinamik kompaksiyon Patlayıcı tekniği ile kompaksiyon Kompaksiyon enjeksiyonu Jet grout Granüler kolonlar (kum ve çakıl)
Konsolidasyon oturmalarını azaltmak.	Ön yükleme (sürşarj) Jet grout Kompaksiyon enjeksiyonu Taş kolonlar Elektro-osmoz
Konsolidasyon oturması oranını arttırmak.	Sürşarj dolgulu veya dolgusuz düşey drenler Granüler kolonlar (kum ve çakıl)
Şev stabilitesini arttırmak.	Payanda dolgusu Çakıl drenler Granüler kolonlar (kum ve çakıl) Kompaksiyon enjeksiyonu Jet grout Zemin çivi ve vidaları
Şişen zeminleri ıslah etmek.	Kireç stabilizasyonu Çimento stabilizasyonu Mekanik stabilizasyon Drenaj

Çizelge 2.1 Zemin iyileştirme yöntemlerinin stabilizasyon amacına göre kullanımı (U.S. Army Corps. of Eng., 2003) (devam)

Erozyon direncini arttırmak.	Bioteknik stabilizasyon Mekanik stabilizasyon Kompaksiyon
Sızıntı yollarını kapamak ve/veya su akımı doğrultusundaki borulanmayı azaltmak.	Kompaksiyon enjeksiyonu Penetrasyon enjeksiyonu
Çatlaklardan ve birleşim yerlerinden su kaçaklarını engellemek.	Kompaksiyon enjeksiyonu
Göçen zeminleri ıslah etmek.	Derin dinamik kompaksiyon Vibrokompaksiyon Enjeksiyon

Çizelge 2.2 Farklı tür zeminlere uygulanan stabilizasyon yöntemleri (Tunç, 2002)

Amaç	Zemin cinsi	Stabilizasyon metodu
Yük taşıma ve deformasyon direncini arttırmak	İnce granüler	Asfalt, çimento, mekanik karıştırma, kompaksiyon
	Kaba granüler	Asfalt, çimento, mekanik karıştırma, kompaksiyon
	Düşük PI killer	Kompaksiyon, çimento, kireç
	Yüksek PI killer	Kireç
Don duyarlılığını azaltmak	İnce granüler	Çimento, asfalt, uçucu kül
	Düşük PI killer	Çimento, kireç
Su geçirimsizliği	Düşük PI killer	Çimento, asfalt, kireç
Kabarma-büzülme kontrolü (hacim stabilitesi)	Düşük PI killer	Çimento, kompaksiyon, kireç
	Yüksek PI killer	Kireç
Esnekliği azaltmak	Yüksek PI killer	Kireç
	Elastik kil veya siltler	Çimento

Zemin stabilizasyonu yönteminde seçilen yöntem ne olursa olsun elde edilen sonuçları sahada standart penetrasyon deneyi (SPT) ve koni penetrasyon deneyi (CPT) ile kontrol etmek çok önemlidir. İstenilen özelliklerde veriler elde edilene kadar stabilizasyon işlemleri tekrarlanmalıdır (Kayabalı, 2010).

Jet grout yöntemi gibi zemin stabilizasyon maliyetinin yüksek olduğu çalışmaların yanı sıra kompaksiyon gibi maliyetin az olduğu çalışmalar da vardır. Çizelge 2.3'de zemin iyileştirme yöntemlerinin yaklaşık maliyet tablosu verilmektedir (U.S. Army Corps. of. Eng., 2003).

Çizelge 2.3 Zemin iyileştirmesinde yaklaşık maliyet tablosu (U.S. Army Corps. of. Eng., 2003)

Metodlar	Göreceli Maliyet	\$/m	\$/m ²	\$/m ³	Referans
Derin dinamik kompaksiyon	Düşük	-	8-32	5	FHWA (1998)
Vibrokompaksiyon	Düşük-Orta	Arka dolgusuz 15, Granüler arka dolgulu 25	-	1-4	
Taş kolonlar	Orta	45-60	-	-	
Çakıl drenler	Orta	11-22	-	-	Ledbetter (1985)
Patlatma tekniği ile kompaksiyon	Düşük	-	-	2-4	Adailer (1996)
Jet grout	Yüksek-Çok yüksek	Sızma kontrolü 30-200, Kazı sahasının desteklenmesi 95-650	-	-	FHWA (1998)
Zemin çivileri	Orta-Yüksek	-	Geçici 165-775, sürekli 160-400	-	
Kompaksiyon enjeksiyonu	Düşük-Orta	-	-	5-50	
Derin zemin karıştırılması	Yüksek-çok yüksek	-	-	100-150	
Kimyasal enjeksiyonu	Yüksek	-	-	150-400	Hayward (1996)
Bioteknik stabilizasyon	Uygulamaya bağlı	Bitkilendirilmiş geogridler 40-100	Şevi ağ şeklinde saran bitkilendirme 275-550	-	ASCE (1997)
Zeminin değiştirilmesi	Orta	-	-	10-20	Hayward (1996)
Düşey drenler	Düşük	1,2-4	-	-	FHWA (1998)
Taneli enjeksiyon	Orta	-	-	3-30	Adailer (1996)

2.1.1 Mekanik Stabilizasyon

Mekanik stabilizasyon, herhangi bir katkı maddesini zemine karıştırmadan ve zeminde herhangi bir kimyasal reaksiyon oluşturmadan, sıkıştırma veya kompaksiyon gibi yöntemlerle zemin özelliklerin amacına uygun hale getirilmesidir (Aytekin, 2004).

Mekanik stabilizasyonun hedefleri; gradasyonun düzeltilmesi, likit limitin ve plastisite indisinin düşürülmesi, dayanım ve durabilitenin artırılması, oturmaların azaltılması, dren yeteneğinin artırılması şeklinde ifade edilebilir (Winterkorn ve Fang, 1975).

Mekanik stabilizasyonda kullanılan katkı maddelerinin oranı için önerilen belirli bir sistem veya yöntem yoktur. Farklı tür zeminlerden çeşitli oranlarda karışımlar hazırlanmakta ve bu deneme karışımlarının özellikleri incelenerek karar verilmektedir (Çalık, 2012). Mekanik stabilizasyonun başarılı sonuç vermesi için elde edilen karışımın gradasyonu (tane dağılımı, granülometri eğrisi) ile ince kısmının plastik özellikleri önemlidir. AASHTO'da (1993) yapılacak karışımların uyması gereken gradasyon sınırları belirlenmiştir. Çizelge 2.4'te bu sınırlar verilmektedir. Çizelgedeki Tip I kaba gradasyonlu zeminleri, Tip II kumlu zeminleri temsil etmektedir.

Çizelge 2.4 Mekanik stabilizasyonda gerekli olan gradasyon sınırları (AASHTO, 1993)

Elek No	Tip I				Tip II	
	A	B	C	D	E	F
2'' (50 mm)	100	100	---	---	---	---
1'' (25 mm)	---	75-95	100	100	100	100
3/8'' (9.5) mm	30-65	40-75	50-85	60-100	---	---
No.4 (4.75mm)	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100
No.10 (2 mm)	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100
No.40 (0.425 mm)	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70
No.200 (0.075 mm)	2-8	5-15	5-15	8-15	6-15	8-15

Zemin için maksimum tane boyutunun çok büyük olması işlenebilirliği azaltmaktadır. Zeminde kaba malzemenin fazla olduğu durumlarda segregasyon olmaktadır. Zemindeki ince malzeme miktarının fazla olması yüksek su muhtevasında karıştırmayı zorlaştırmaktadır. Zeminin kuru haldeki durumunda topaklanmalar oluşmakta ve homojen karışım yapılamamaktadır (Rodriquez vd., 1973).

2.1.2 Kimyasal Stabilizasyon

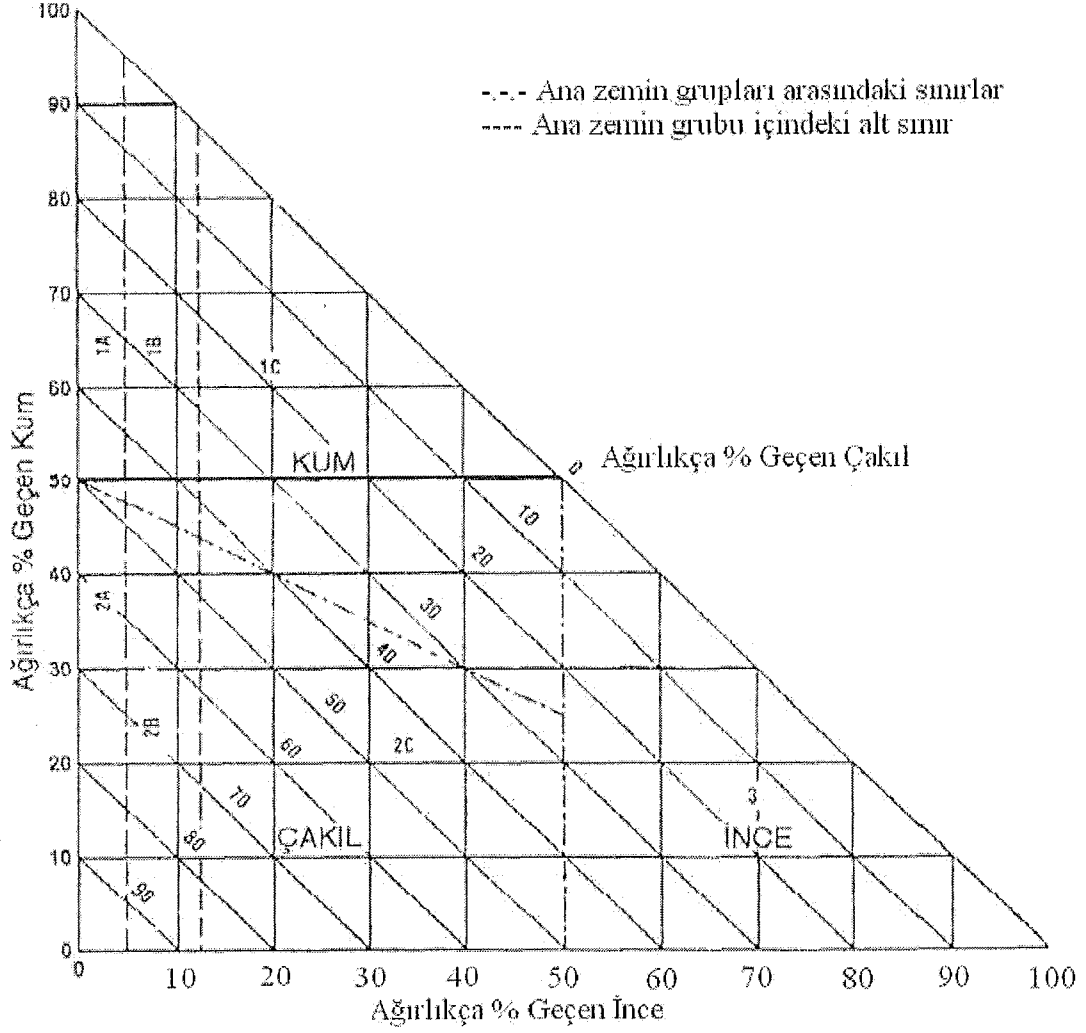
Kimyasal stabilizasyonda, zemin içerisine çeşitli katkı maddeleri karıştırılır, zeminde kimyasal reaksiyonların meydana gelmesi sonucunda zeminin mühendislik özellikleri iyileştirilir (Aytekin, 2004).

Zemin özelliklerinin iyileştirilmesi açısından kimyasal stabilizasyon yöntemi en etkili ve en ekonomik yöntemdir (Kukko, 2000). Kimyasal stabilizasyonun amaçları dayanımı arttırmak, oluşacak olan deformasyonları azaltmak, taşıma gücünü arttırmak, oturmaları azaltmak, durabiliteyi arttırmak, geçirgenliği azaltmak şeklinde ifade edilebilir.

Kimyasal stabilizasyonda iki önemli reaksiyon gerçekleşmektedir. Bu reaksiyonların ilki katyon alışverişi, ikincisi ise çimentolaşmadır (Mitchell, 1993). Kalsiyumlu ve organik kimyasallar, katyon alışverişi reaksiyonu için kullanılmaktadır. Portland çimento, puzolan, kireç, sodyum silikat, bitüm emülsiyonları çimentolaşma reaksiyonu için zemine ilave edilmektedir. En iyi sonuçları elde etmek için hem katyon değişimi hem de çimentolaşma reaksiyonun beraber olduğu iyileşme çalışmaları kullanılmaktadır.

Kimyasal stabilizasyonda; zemin cinsinin, stabilizasyonun amacının, zeminin hangi özelliğinin iyileştirileceğinin, stabilizör seçiminin, maliyetinin ve malzemenin kolaylıkla bulunması gibi özelliklerin dikkate alınması gerekir.

Şekil 2.1’de verilen, zemin üçgen gradasyonunda zemine ait alan numarası bulunup zemindeki ufalanma karakteristiği tespit edilir. Zemindeki karakteristik ile PI, LL ve gradasyon özellikleri de kullanılarak uygun olan stabilizör cinsi Çizelge 2.5 yardımıyla seçilir.



Şekil 2.1 Zemin üçgen gradasyonu (U.S. Army Corps. of Eng., 2003)

Katkı maddeleri kullanılarak yapılan zeminin ıslahında gradasyon, mukavemet ve durabilite açısından sağlaması gereken minimum değerler vardır.

Çizelge 2.6'da kireç, çimento, puzolan-kireç ve puzolan-çimento-kireç birleşiminin sağlaması gereken durabilite şartları verilmiştir (U.S. Army Corps. of Eng., 2003).

Çizelge 2.5 Zemin stabilizasyonunda katkıların seçimi (U.S. Army Corps. of Eng., 2003)

Alan no	Zemin sınıfı	Önerilen katkı	Kısaltmalar	200 No.lu elekten geçen	Açıklamalar
1A	SW SP	Bitüm Çimento K-Ç-P*	- - PI<25	-	
1B	SW SP SW-SC	Bitüm Çimento Kireç	PI<10 PI<30 PI<12	-	
1C	SM SC SM-SC	Bitüm Çimento Kireç K-Ç-P*	PI<10 ** PI>12 PI<25	En fazla %30 - - -	
2A	GW GP	Bitüm Çimento K-Ç-P*	- - PI<25	-	Çimento katkısı sadece iyi gradasyonlu zeminlerde ve 4 No.lu elekten geçen en az %45 olduğu durumlarda
2B	GW GP GW-GC GP-GC	Bitüm Çimento Kireç K-Ç-P*	PI<10 PI<30 PI>12 PI<25	-	
2C	GM GC GM-GC	Bitüm - Kireç K-Ç-P*	PI<10 ** PI>12 PI<25	En fazla %30 - - -	
3	CH CL ML ML-CL	Çimento Kireç	LL<40 ve PI<20 PI>12	- -	Organik ve kuvvetli asidik zeminler uygun olmamaktadır.

* K-Ç-P: Kireç, çimento ve puzolan birleşimi

**PI ≤ 20 - ((50-200 No.lu elekten geçen yüzde)/4)

Çizelge 2.6 Kireç, çimento, puzolan-kireç ve puzolan-çimento-kireç birleşimlerinde sağlaması gerekli olan durabilite şartları (U.S. Army Corps. of Eng., 2003)

Zemin türü	12 defa ıslanma-kuruma veya donma-çözülme periyodunun sonunda numune ağırlığında izin verilen maksimum kayıp, %
Granüler, PI<10	11-14
Granüler, PI>10	8-14
Silt	8-14
Kil	6-14
A-1, A-2-4, A-2-5, A-3	14
A-2-6, A-2-7, A-4, A-5	10
A-6, A-7	7

2.1.2.1 Kireç ile Zemin Stabilizasyonu

Killi zeminlerde kirecin kullanılması zeminlerin mühendislik davranışının geliştirilmesi bakımından oldukça önemli bir yere sahiptir. Karayolu ve havaalanı kaplamaları gibi alanlarda kireç stabilizasyonunun kullanılması geçmişten günümüze sıklıkla uygulanan bir yöntemdir. Killi zeminlerin iyileştirilmesinde kireç ile zemin stabilizasyonu en çok uygulanan yöntemlerin başında gelir (Tunç, 2002).

Kireçle birlikte yapılan stabilizasyon çalışmalarında sönmüş kireç (hidrate kireç, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) veya sönmemiş kireç (CaO) kullanılmaktadır.

Sönmüş kireç toz halinde bir malzemeyken sönmemiş kireç ise granüler bir malzemedir. Yakıcı özelliği bulunmayan hidrate kireç olan sönmemiş kireç genellikle stabilizasyon yöntemleri için tercih edilir.

Zeminlerin iyileştirilmesinde sönmemiş kirecin daha etkin olduğunu gösteren çalışmalar bulunmaktadır. Ancak sönmemiş kireç (CaO) yakıcı ve tehlikeli özelliğe sahiptir. Bu yüzden arazide sönmemiş kireç ile yapılan uygulamalarda çalışan personelin vücutlarında deri yanması riski oldukça yüksektir.

Zemin çeşitlerine bağlı olarak kullanılması önerilen kireç miktarları Nelson ve Debora (1992) tarafından Çizelge 2.7’de verilmiştir.

Ingles ve Metcalf (1972) tarafından kireç karışım oranları Çizelge 2.8’de sunulmuştur.

Çizelge 2.7 Farklı zemin çeşitleri için yaklaşık kireç miktarları (Nelson ve Debora, 1992)

Zemin Türü	Tavsiye edilen yaklaşık kireç miktarları, %	
	Sönmemiş kireç	Sönmüş kireç
Killi çakıl (GC, GM-GC)	2-3	2-4
Siltli kil	3-8	5-10
Kil	3-6	3-8

Çizelge 2.8 Kireç karışım oranları (Ingles ve Metcalf, 1972)

Zemin cinsi	Modifiye için (%)	Stabilizasyon için (%)
İnce çatlaklı kaya	2~3	önerilmez
İyi derecelendirilmiş killi çakıl	1~3	~3
Kumlar	önerilmez	önerilmez
Kumlu killer	önerilmez	~5
Siltli killer	1~3	2~4
Plastik killer	1~3	3~8
Yüksek plastisiteli killer	1~3	3~10
Organik zeminler	önerilmez	önerilmez

Bazı araştırmacılar, ağırlıkça küçük oranlarda ilave edilmiş kirecin (%2-8) önemli değerde; likit limiti, plastisite indisi, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve şişmeyi düşürdüğünü ve optimum su muhtevası, plastik limit ve zeminin mukavemetini yükselttiğini tespit etmişlerdir (Croft, 1967; Abduljawad, 1995).

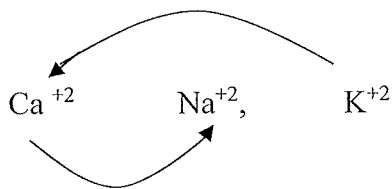
Ola (1978), killi zeminlerde %10'dan daha fazla kireç bulunmasının mukavemet artışında yok denecek kadar az etki ettiğini belirlemiştir. Bell (1996), yaptığı stabilizasyon çalışmasında killi zemine belli yüzdelerde kireç ilave ederek en uygun kireç yüzdesinin %4-6 olduğunu belirlemiştir. Ayrıca çalışmasında %4 kireç içeriği ve 28 gün kür süresinde en yüksek tek eksenli sıkışma dayanımına ulaşılmıştır.

Kireç ile zeminlerin iyileştirilmesinde kimyasal ve fiziksel olarak iki olay gerçekleşmektedir.

Kimyasal olaylar;

- İyon değişimi,
- Çimentolaşma,
- Karbonatlaşma olmak üzere üç aşamadan meydana gelmektedir (Tüdeş, 1996).

İlk aşamada kireç bünyesinde bulunan Ca^{+2} katyonları zemin bünyesinde bulunan Na^{+} ve K^{+} gibi zayıf katyonlarla yer değiştirmektedir.



İkinci aşamada ise zemin-kireç karışımı arasında puzolanik reaksiyonlar oluşmaktadır. Puzolanik reaksiyonların neticesinde çimentolaşma ürünleri olan CSH ve CAH açığa çıkmaktadır. Bu denklemler (2.1), (2.2) ve (2.3)'te verilmektedir.





Üçüncü aşamada ise kireç ile CO₂ reaksiyona girerek CaCO₃'ü oluşturmaktadır. Bu reaksiyon ise denklem (2.4)'te verilmektedir.



Fiziksel olaylar;

- Plastisite indisi ve hacim değişimi,
- Folikülasyon,
- Maksimum kuru birim hacim ağırlığında optimum su muhtevasındaki değişimler,
- Boşluk suyu basıncı,
- Don, mukavemet ve rutubet gibi özellikler için etkilidir (Tüdeş, 1996).

Kireç katkılı stabilizasyon çalışmalarında reaksiyon hızlarının yüksek olmaması stabilizasyon sırasında sorunlar çıkarmamaktadır. Bu özellik avantaj sağlamaktadır. Killi zeminlerde kireç stabilizasyonunun kullanılması elde edilen faydalar ve ekonomik kazançlar açısından çimento stabilizasyonuna göre daha iyidir. Killi zeminlerde yaygın ve etkin olarak kireç stabilizasyonu kullanılmaktadır (Ladd vd., 1960).

Kireç stabilizasyonu sonucunda zeminde geoteknik özellikler bakımından meydana gelen değişimler, kısa dönemde zeminde oluşan değişimler ve uzun dönemde zeminde oluşan değişimler olmak üzere ikiye ayrılır.

Kısa dönemde zeminde oluşan değişimler şu şekildedir;

- Plastisite indisi değeri düşer,
- Plastik limit değeri artar,
- Optimum su muhtevası artar ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı değeri düşer,
- Proktor eğrisi düzleşir,
- CBR değerlerinde artış olur.

Uzun dönemde zemindeki oluşan değişimleri ise şu şekilde sıralamak mümkündür;

- * CBR değerleri artar,
- * Serbest basınç mukavemeti artar,
- * Kayma mukavemetindeki değer artar,
- * şişme ve büzölmeye karşı stabilite artar,
- * Don etkisine karşı direnç artar.

Kireç, zeminde oluşacak şişmeyi azaltması ve işlenebilirliği arttırmasından dolayı özellikle karayolu projelerinde çokça kullanılmaktadır.

2.1.2.2 Çimento ile Zemin Stabilizasyonu

Çimento, esasında doğal kalker taşları ve kil karışımının yüksek sıcaklık kullanılmasıyla ısıtılan sonra da öğütölməsi işlemleri sonucunda elde edilen hidrolik bir bağlayıcı malzemedir. Hidrolik bağlayıcı maddeler, su ile reaksiyona girmesiyle sert bir kütle oluşturduktan sonra su içersinde dağılmayan, sertliğini ve mukavemetini muhafaza eden veya arttıran bağlayıcı maddelerdir.

Çimento stabilizasyonunda, zemine kuru birim hacim ağırlığının %5-15'i kadar çimento ilavesi yapılarak karıştırma işleminin devamında kompaksiyon uygulanır. Stabilizasyon çalışmalarında genellikle portland çimentosu kullanılır. Çimento, daneler arasında bağlar oluşturur. Çimento ile stabilizasyon yöntemi saf kohezyonlu ve organik zeminler dışında bulunan tüm zeminler için uygundur.

Kum ve çakılların geçirimliliğini çimento stabilizasyonu büyük ölçüde azaltmaktadır. Ancak silt ve killerde geçirimliliği arttıran bir etkendir. Zemin cinsi ve iyileştirmedeki amaca uygun olarak çimento miktarı değişmektedir. Zemine çimento ilave edilerek ince daneli zeminlerde likit limit ve plastisite indisi düşmekte ve işlenebilirlik de artmaktadır (Kılıç, 2008).

Çimento içinde bulunan silika puzolanik aktiviteyi oluşturur. Dolayısıyla kil mineralleri olmayan zeminlerde çimento stabilizasyonu uygulanabilir bir yöntemdir.

Zemin ile çimento stabilizasyonu yönteminin 1920'li yıllarda Amerika Birleşik Devletleri'nin eyalet karayollarında uygulamaları görölmektedir. Türkiye'de

endüstrisinin gelişmesiyle bu yöntem daha yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Hava meydanlarında ve artan trafik yükleriyle birlikte birçok ulaşım yollarında çimento ile stabilize edilmiş temel ve alt temel uygulamaları mevcuttur (Mitchell, 1993; Demiröz ve Karaduman, 2009).

Değişik zemin sınıflarında bulunan zemin türlerine göre ağırlıkça çimento miktarları Çizelge 2.9'da verilmiştir (Tunç, 2002).

Çizelge 2.9 Değişik zemin sınıflarına göre çimento miktarı (Tunç, 2002)

AASHTO zemin sınıfı	Birleştirilmiş zemin sınıfı	Tipik çimento içeriği (% ağırlıkça)	Çimento ihtiyacı sınırları	
			% hacimce	% ağırlıkça
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM	5	5-7	3-5
A-1-b	GM, GP, SM, SP	6	7-9	5-8
A-2	GM, GC, SM, SC	7	7-10	5-9
A-3	SP	9	8-12	7-12
A-4	CL, ML	10	8-12	7-12
A-5	ML, MH, CH	10	8-12	8-13
A-6	CL, CH	12	10-14	9-15
A-7	MH, CH	13	10-14	10-16

2.1.2.3 Bitüm ile Zemin Stabilizasyonu

Bitümlü madde, zemin ile birleşerek bazen daneleri birbirine yapıştırır bazen de zemini su geçirmez hale getirerek daneler arasındaki su filmlerinin birbirleriyle olan bağını korur veya her iki tesiri aynı anda ortaya çıkarır. Ayrıca danelerin birbirine yapışmasını sağlayan etkisi sonucunda su ve rüzgâr erozyonuna karşı direnç arttırmaktadır. Yaygın olarak karayollarında bitüm ile stabilizasyon kullanılmaktadır (Mitchell, 1993).

Bitüm ile stabilizasyonda genellikle asfalt, katran gibi maddeler kullanılır. Daneli zeminlere (kırma taş, çakıl, kum, vs.) sıcak sıvı bitümlü madde katılıp karıştırılmasıyla kompaksiyon uygulanır.

Bitüm ile stabilizasyon çalışmaları, genellikle granüler ve plastik olmayan zeminler daha iyi sonuçlar vermektedir. Kum veya granüler malzemelerde bağlayıcı film iki

amacı taşır. Birinci amaç, zemini su geçirmez hale getirmektir. İkinci amaç ise, zemin danelerinin birbirine bağlanmasıdır. Böylece zeminin yük taşıma kapasitesi artar. Bundan dolayı ince daneli kohezyonlu zeminlerin stabilizasyonunda bitümlü malzemenin rolü stabilize edilen zemin tabakasının geçirimsizliğini sağlamaktadır (Çakıroğlu, 2007).

Bitümlü malzeme; kireç, çimento ve reçineye göre pahalı olmasından dolayı zemin stabilizasyonunda katkı maddesi olarak çok az kullanılmaktadır. Bitüm danelerinin birbirine yapışması, rüzgâr ve su erozyonuna karşı mukavemeti arttırmaktadır.

Bitüm ile stabilizasyon için uygun zemin türü kil ve organik maddelerden arınmış olan zeminlerdir. Bitümlü maddelerin katkı maddesi oranı %5-10 düzeyindedir. Bu yöntem özellikle yollarda ve yüzey kaplamasında kullanılmaktadır (Uzuner, 2013).

2.1.2.4 Puzolanlar ile Zemin Stabilizasyonu

Puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcılık değeri bulunmayan veya bağlayıcılık özelliği çok az olan, fakat ince taneli haldeyken sulu ortamda kalsiyum hidroksitle ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) bütünleşince hidrolik bağlayıcılık özelliğini kazanan silikalı ve alüminalı malzemelerdir.

İtalya'daki Vezüv Yanardağı'nın eteklerinde bulunan Pozzuoli kasabasının adından dolayı puzolan kelimesi ortaya çıkmıştır. Şekil 2.2'de İtalya'daki puzolanın ortaya çıktığı yer verilmiştir.



Şekil 2.2 İtalya'daki puzolanın ortaya çıktığı yer

Eski Romalılar, Pozzuoli kasabası civarında bu malzeme ile kireç ve suyu belirli oranlarda karıştırarak hidrolik bir özelliğe sahip bir malzeme elde etmişlerdir (Massazza, 1989).

Dünyadaki bilinen ikinci önemli puzolan yatağı İtalya'da Roma ve Napoli arasında yer almaktadır. Ege denizinde nitelikli puzolanların bulunduğu yer Yunanistan'a bağlı Savtroin adalarıdır. Ülkemizde de birçok farklı bölgede puzolan yatakları bulunmaktadır. Türkiye'de İç Anadolu, Karadeniz, Ege, Marmara ve Akdeniz bölgelerinde çokça doğal puzolan kaynakları bulunmaktadır.

Puzolanların yapısında genellikle reaktif silisyum dioksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) bulunur. Puzolanlar ayrıca demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer oksitleri de içermektedir. Puzolanik etkiyi sağlayan en önemli oksit SiO_2 olduğundan silisyum dioksitin miktarı toplam kütlede %25'den az olmamalıdır.

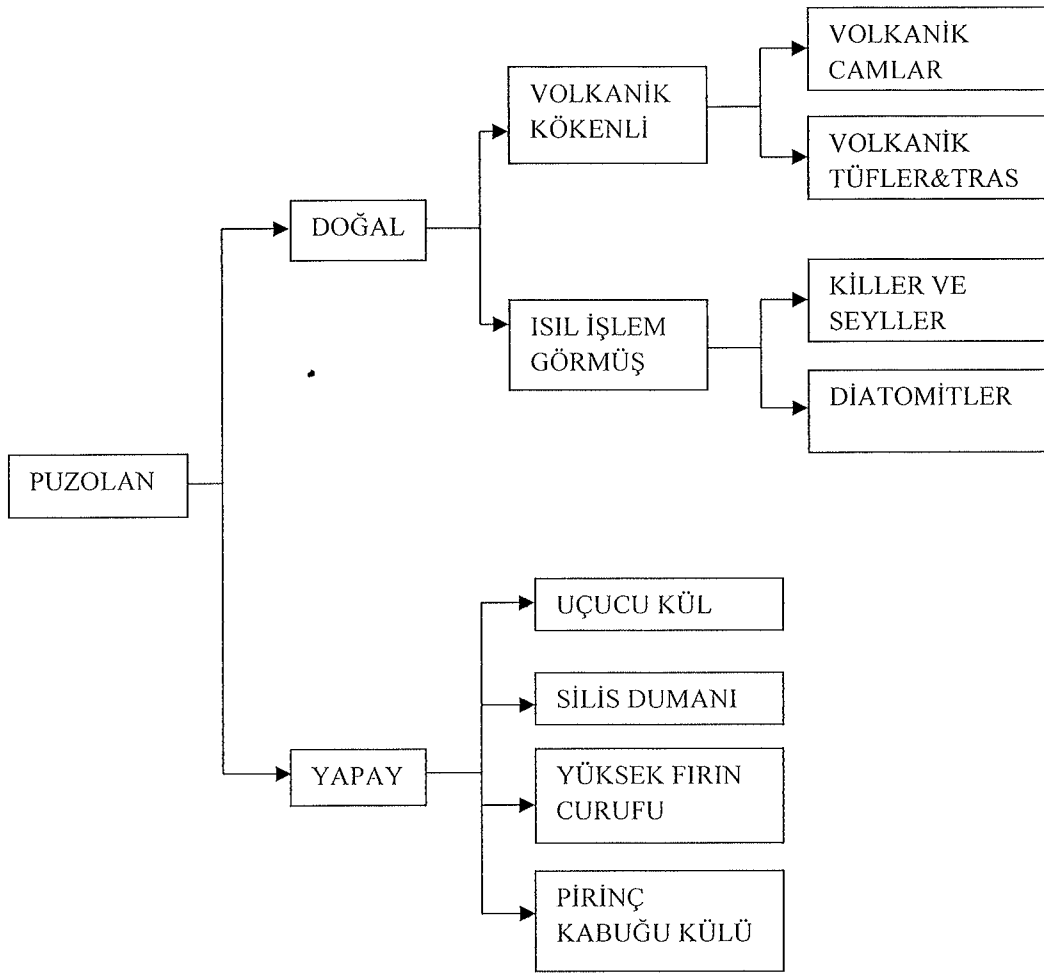
Puzolanlar kimyasal bileşenleri bakımından silikat ve alüminat (SiO_2 ve Al_2O_3) esaslı iken kireç ve çimento CaO esaslıdır. Bu yüzden puzolanların birçoğu kendi başlarına bağlayıcı özellikte değildir. Bu özellikten dolayı puzolanlara ikincil bağlayıcı maddeler denilebilir.

Silisyum dioksit, alüminyum oksit ve demir oksit gibi mineraller etkili sıcaklıkta ergime halinde ve birdenbire soğumaları neticesinde amorf bir yapıya dönüşmektedir (Akman ve Esenli, 1992). Puzolandaki camsı yapının fazlalığı ve kristal yapının azlığı kimyasal reaksiyona girme yeteneğini artırmaktadır.

Doğal ya da yapay puzolanların yapılarındaki kalsiyum ile yapacağı kimyasal reaksiyon üç şekildedir;

- Aktif tertip maddeleri (silisli toprak ve opak, vb.)
- Atıl bileşenler (kristal fazları(zeolitlerden farklılaşmış olan))
- İstenmeyen bileşenler (organik maddeler, karbon, vb.) (Dayı, 2006).

Puzolanlar, doğal ve yapay olmak üzere Şekil 2.3'te verildiği gibi iki grupta değerlendirilir (Ün, 2007).



Şekil 2.3 Pozolanların sınıflandırılması (Ün, 2007)

Doğal pozolanlar, kendi başlarına bağlayıcılık özellikleri bulunmayan ve çok ince öğütüldüklerinde kullanıma hazır hale getirilen silis ve alümin oksitlerce zengin malzemelerdir. Doğal pozolanlar iki grupta değerlendirilmektedir;

- Volkanik orijinli doğal pozolanlar,
- Isısal oluşumlu (killer, şeyller ve toprak malzemeleri) doğal pozolanlar (Erdoğan, 1997).

Doğal pozolanlar yapıları itibariyle çimentoya yakın bir oksit bileşimi gösterdikleri için, bu pozolanlar pişirilmeden doğrudan klinkere katılabilmektedir. Bu durum büyük bir miktarda termik enerji kazancı ortaya çıkarmaktadır.

Doğal puzolanlardan volkanik kökenli olanları, erimiş magmanın püskürmesi sonucunda oluşmaktadır. Volkanik camlar, volkanik tüfler, diatomitler gibi doğal puzolanlardan bazıları Şekil 2.4’te verilmektedir.



Şekil 2.4 Doğal puzolanların bazıları (volkanik tüf, volkanik cam, diatomit)

Volkanik camlar, Yunanistan’a bağlı Santorin Adası’nda, İtalya’da Bacoli ve Japonya’da Shirasu’da çokça bulunmaktadır (Gündeşli, 2008). Türkiye’de Kula cürufu, Kayseri trası, İtalya’da Segni-Latium’da, Almanya’da Ren bölgesinde volkanik tüfler ve traslar bulunmaktadır.

Doğal puzolanların ısıtma işlemleri sonucu ortaya çıkan puzolanları, öğütülmüş pişmiş killer, şeyller ve diatomitlerdir.

Killer, boyutları 0,002 mm’den daha küçük tanelerden oluşmaktadır. Killer, kuruyunca sıkışan, ıslanıldığında şişen ve sıkıştırıldığında içeriğindeki suyu dışarı veren özelliğe sahiptir. Şeyller, killer gibi benzer özellikte bulunurlar fakat su içerikleri killere göre daha azdır. Killerin ve şeyllerin hammaddelerine bakılırsa puzolanik özellikleri yoktur. Ancak ısıtma işlemi sonrasında puzolanik özellik kazanırlar.

Killerin ve şeyllerin öğütülmesiyle ortaya çıkan puzolanlar ABD’de, Brezilya’da ve Hindistan’da çok sayıda baraj inşaatında kullanılmaktadır (Baradan, 2000).

Diatomitlerin hücre çeperleri amorf silisten oluşmaktadır. Bazı diatomeli topraklarda bulunan yüksek miktarlardaki kil, puzolanik aktiviteyi azaltır.

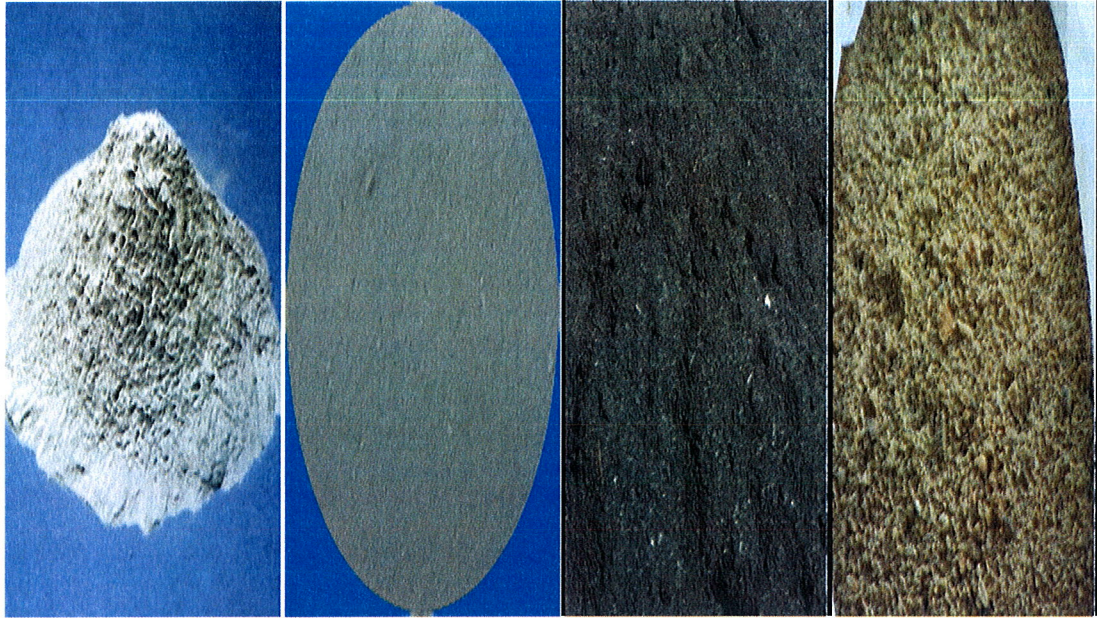
Türkiye’ de Afyon, Ankara, Aydın, Kayseri, Konya gibi bazı şehirlerde tespit edilen diatomit yatakları bulunmaktadır. Kayseri-Hırka diatomit yatağı, ülkemizin rezervi en büyük olan yatağıdır. Dünyada diatomit yataklarına ABD, Cezayir, Kazakistan, Almanya, Özbekistan, Danimarka ve Kanada gibi ülkelerde karşılaşılmaktadır.

Çizelge 2.10’da doğal puzolanlar için bazı önemli oksitlerin oranları verilmiştir. SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 gibi temel oksitler doğal puzolanlar için önemlidir (Erdoğan, 2003).

Çizelge 2.10 Doğal puzolanların kimyasal bileşimdeki oksit içerikleri (Erdoğan, 2003)

	Volkanik cam	Volkanik tuf	Diatomit	Pişmiş kil	Pomza taşı
SiO₂	%65,1	%52,1	%86,0	%42,2	%60,5
Al₂O₃	%14,5	%18,3	%2,3	%16,1	%17,2
Fe₂O₃	%5,5	%5,8	%1,8	%7,0	%3,4
CaO	%3,0	%4,9	-	%21,8	%4,7
MgO	%1,1	%1,2	%0,6	%1,9	%2,1

Yapay puzolanlar, tabiatta doğal olarak bulunmazlar ve endüstriyel yan ürünlerdir. Yapay puzolanlar grubunda bulunan uçucu kül, silis dumanı, pirinç kabuğu külü ve yüksek fırın cürufu Şekil 2.5’te verilmektedir.



Şekil 2.5 Uçucu kül, silis dumani, pirinç kabuğu külü, yüksek fırın cürufu (yapay puzolanlar)

Uçucu kül, termik enerji santralleri içinde öğütülmüş kömürün yanmasıyla ortaya çıkan bir üründür. Uçucu küllerin ASTM C 618'e göre C ve F sınıfı olarak iki farklı tipi bulunmaktadır. F tipi uçucu kül genellikle %10'dan daha az CaO içerir. Antrasit ve bitümlü kömürün yanmasıyla üretilen F tipi uçucu kül, düşük kireçli uçucu kül olarak sınıflandırılır. C tipi uçucu kül %15'ten %35'e kadar CaO içerir. Bitümlü olmayan kömürün ve diğer linyitin yanmasıyla elde edilen uçucu kül C tipidir. C tipi uçucu küllerin yüksek kalsiyum içeriğinden dolayı puzolanik özelliğinin yanında bağlayıcılık özelliği de bulunur.

Uçucu külün fiziksel ve kimyasal niteliklerinden bazıları yanma sistemi, kömür cinsi, filtre sistemi gibi özelliklerdir. Genellikle renklerinin gri olmasına karşı bazı uçucu küller içinde yanmamış karbon miktarındaki fazlalıktan dolayı oluşan koyu renkliliğe sahiptir.

Uçucu küller kireç ve su ile karıştırıldığında belirli bir müddet sonrasında sertleşme ve dayanıma sahip olmaktadır. Uçucu küllerde puzolanik özelliğın temelinde bulunan dayanım kazanma özelliğı oldukça yavaş bir biçimde ortaya çıkmaktadır. Zaman geçtikçe uçucu küllerin dayanımı artar. Uçucu küller çoğunlukla kendi başlarına bağlayıcı özelliğı olmayan ancak sulu ortamda kireç gibi birincil

bağlayıcılarla birleştirildiklerinde bağlayıcılık özelliği ortaya çıkan puzolonik malzemelerdir.

Uçucu küllerin içeriğinde yüksek miktarda sülfat bulunur. Uçucu kül ve taban külünün kimyasalları Çizelge 2.11’de verilmektedir (Alataş, 1996).

Çizelge 2.11 Uçucu kül ve taban külünün kimyasalları (Alataş, 1996)

	Uçucu kül		Taban külü
	C sınıfı	F sınıfı	
CaO	%11,5-29,0	%0,7-6,7	%0-22
SiO₂	%23,1-50,5	%43,6-64,4	%21-60
Al₂O₃	%13,3-21,8	%19,6-30,1	%10-37
Fe₂O₃	%3,7-22,5	%3,8-30,1	%5-37
MgO	%1,5-7,5	%0,9-1,7	%0-4
SO₃	%0,3-1,9	%0,4-7,2	-

Termik santrallerde toplam atıkların %75-%80’i uçucu külden ve geri kalanı ise taban külünden oluşmaktadır.

Türkiye’de Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma gibi termik santralleri faaliyet göstermektedir. Çizelge 2.12’de ülkemizdeki termik santralleri verilmiştir (Tokyay ve Erdoğan, 1998). Dünyada Almanya, Hollanda, Belçika, ABD ve Çin gibi ülkelerde uçucu kül kullanılmaktadır.

Çizelge 2.12 Termik santrallerin Türkiye'deki faaliyetleri (Tokyay ve Erdoğan, 1998)

Santral adı	Yakıt adı	Kurulu güç, MW	Bulunduğu il
Afşin-Elbistan A	Linyit	1355	Kahramanmaraş
Afşin-Elbistan B	Linyit	1440	Kahramanmaraş
Çan	Linyit	320	Çanakkale
Çatalağzı	Taş kömürü	300	Zonguldak
Çayırhan Park	Linyit	620	Ankara
Çolakoğlu	Taş kömürü	190	Kocaeli
Kangal	Linyit	457	Sivas
Kemerköy	Linyit	630	Muğla
Orhaneli	Linyit	210	Bursa
Seyitömer	Linyit	600	Kütahya
Soma A-B	Linyit	1034	Manisa
Sugözü	Taş kömürü	1210	Adana
Tunçbilek	Linyit	429	Kütahya
Yatağan	Linyit	630	Muğla
Yeniköy	Linyit	420	Muğla

Silis dumanı ince ve küresel bir biçime sahip ikincil bağlayıcılardır. Silis dumanı silikon metal veya ferrosilikon alaşım endüstrisinin yan ürünüdür. Üretim sırasında açığa çıkan çok miktarda SiO gazları bulunur. Gaz halindeki SiO, amorf yapıdaki SiO₂'ye dönüşür. Bunlar fiber filtreden geçirilmesiyle yoğunlaştırılmış silis dumanı elde edilmektedir.

Silis dumanının incelik değeri çok yüksektir. Bu yüzden incelik ölçümü için elek analizi ve özgül yüzey değerinin yapılması uygun değildir. Azot adsorpsiyonu analiziyle silis dumanının tane boyutu belirlenmektedir.

Silis dumanı yüksek miktarda SiO_2 içeren, amorf yapılı ve büyük özgül yüzeye sahip olan yapay bir puzolandır. Silika tozu, silika füme gibi isimler silis dumanı yerine kullanılan diğer isimlerdir.

Türkiye'deki silis dumanıyla ilgili bilgiler Antalya Ferrosilikon fırınından elde edilen malzemeye aittir. Bazı ülkelere ait silis dumanının kimyasalları Çizelge 2.13'te verilmiştir.

Çizelge 2.13 Bazı ülkelerdeki silis dumanı kimyasalları (Erdoğan, 2003)

	ABD	Norveç	Türkiye
SiO_2	%90-93	%90-96	%93-95
Al_2O_3	%0,5-1,6	%0,5-3	%0,4-1,4
Fe_2O_3	%0,4-0,7	%0,2-0,8	%0,4-1
CaO	%0,5-0,8	%0,1-0,5	%0,6-1
MgO	%0,3-0,5	%0,5-1,5	%1-1,5
K_2O	%1-1,2	%0,4-1	%0,5-1
Na_2O	%0,1-0,3	%0,2-0,7	%0,1-0,4

ASTM ve Türk Standartlarında silis dumanının puzolan madde kullanılabilirliği için herhangi bir sınır şartı belirtilmemiştir.

Pirinç kabuğu, pirincin üretimi sırasında pirincin beyaz pirince işlenmesi esnasında meydana gelen önemli bir yan üründür. Yetiştigi coğrafyaya ve özel yetiştirme uygulamalarına göre pirinç kabuğu kimyasalları farklılık içermektedir.

Endüstriyel olarak pirinç kabuğu 700 °C'de yakılmaktadır (An vd., 2011). Yakma işlemi, SiO_2 açısından zengin(%85-%98) ve endüstriyel olarak kullanılabilen pirinç kabuğu külünü ortaya çıkarmaktadır. Yanma işleminden önce kabuktaki SiO_2

homojen olmayan bir dağılımdayken yanmadan sonra homojen bir halde bulunmaktadır. Bu yüzden homojen bir haldeki silikanın olmasından dolayı SiO_2 elde etmek için pirinç kabuğu külü uygundur (An vd., 2010).

Yüksek fırın cürufu, demir çelik üretiminde kireç, kok külü ve demirin indirgenerek çıkmasından sonra artan silis ve alümin füzyonu neticesinde oluşur. Yüksek fırından dışarı çıkarılarak atık malzeme eriyik durumdaki cüruf yaklaşık $1500\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıktadır. Eriyik durumdaki cürufun hava ortamında soğutulmasıyla elde edilen bir kristal yapı bulunmaktadır.

Amorf yapıya sahip olan yüksek fırın cürufu, büyük miktarda SiO_2 ve Al_2O_3 içerir, bu malzeme çok daha ince hale getirilirse doğal puzolanlara benzer özellik kazanmaktadır. CaO içeriğinin fazla olması yüksek fırın cürufunun bir miktar bağlayıcı özelliğinin bulunmasını sağlamaktadır. Yüksek fırın cürufunun farklı ülkelerdeki kimyasalları Çizelge 2.14’de verilmektedir.

Çizelge 2.14 Bazı ülkelerdeki yüksek fırın cürufu kimyasalları (Erdoğan, 2003).

	ABD	Güney Afrika	Avustralya	Türkiye
CaO	%29-50	%30-40	%39-44	%34-41
SiO₂	%30-40	%30-36	%33-37	%34-36
Al₂O₃	%7-18	%9-16	%15-18	%13-19
Fe₂O₃	%0,1-1,5	-	%0-0,7	%0,3-2,5
MgO	%0-19	%8-21	%1-3	%3,5-7
MnO	%0,2-1,5	-	%0,3-1,5	%1-2,5
S	%0-2	%1-1,6	%0,6-0,8	%1-2

Cüruf taneleri, saf cam tanecikler, bir miktar kristal içeren camsı tanecikler ve kristal tanecikler olarak sınıflandırılmaktadır. Bir miktar kristal (mervinit) içeren camsı taneciklerin, saf cam taneciklerinden daha iyi tepki gösterdiği yapılan araştırmalar sonucunda bulunmuştur.

Granüle yüksek fırın cürufunun ASTM C 989'a (1994) göre kalitesi üç sınıfta belirlenmektedir. Çizelge 2.15'de ASTM C 989'a (1994) göre yüksek fırın cürufunda bulunması istenen nitelikler verilmektedir.

Çizelge 2.15 ASTM C 989'a (1994) göre yüksek fırın cürufunda olması gereken özellikler

	ASTM C 989 (1994)
İncelik	
45µm göz açıklıklı kalan miktar, maksimum %	20
Dayanım aktivite indeksi	
7. gün, min. %	
Sınıf 80	-
Sınıf 100	75
Sınıf 120	95
28. gün, min. %	
Sınıf 80	75
Sınıf 100	95
Sınıf 120	110
Kimyasal özellikler	
S olarak gösterilen kükürt, maksimum %	2,5
SO ₃ olarak belirtilen sülfat iyonu, maksimum %	4,5

Granüle yüksek fırın cürufunun camsı faz miktarı hidrolik özelliklerinin belirlenmesinde en önemli unsurlardan birisidir. Ülkemizde çalışan 3 entegre tesisten çıkan yüksek fırın cürufunun tamamına yakını, çimento fabrikalarında küçük ekle bileşen veya betonda mineral katkı olarak değerlendirilmektedir.

Mühendislik özelliklerinin incelenmesiyle yüksek fırın cüruflarının puzolanik niteliklere sahip olduğu tespit edilmiştir. 19. yüzyıldan beri bu malzemenin ticari açıdan üretimine başlanmıştır. Yaygın bir şekilde birçok ülkede yüksek fırın cürufu içeren çimento üretimi devam etmektedir (Tokyay, 2002).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Yüksek lisans çalışması kapsamında kullanılan materyallerle (doğal malzeme, kireç ve perlit) hazırlanan karışımların fiziksel, mekanik ve hidrolik özelliklerinin ortaya çıkarılması için gerçekleştirilen zemin mekaniği deneyleri, bu deneylerde referans alınan standartlar, deney numunelerinin hazırlanması, adlandırılması ve kür edilmesiyle ilgili bilgilere bu kısımda yer verilmiştir.

3.1. Materyal

Yüksek lisans çalışmasında yapılan deneylerde kullanılan malzemeler; doğal malzeme, kireç ve iki farklı incelikteki perlittir. Doğal malzeme, Bayburt ili Demirözü ilçesinden temin edilmiştir. Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'na getirilen malzeme zemin yüzeyinin yaklaşık olarak 1,5 m derinliğinden alınmıştır. Tüm deneyler boyunca doğal malzeme 24 saat etüvde kurutulduktan sonra deney numunesi hazırlıklarına geçilmiştir. Kireç, Karsan Kireç Sanayi Ticaret A.Ş. tarafından üretilmiş olan sönmüş kireçtir. Puzolanik madde olarak Erzincan iline bağlı Mollaköy beldesinde bulunan bir perlit ocağından alınan ham, kırılmış ve elenmiş perlit agregası kullanılmıştır.

Deney numuneleri doğal malzeme, kireç ve iki farklı incelikteki perlit katılmasıyla hazırlanmıştır. Doğal malzeme ve optimum kireç oranı (%6) ağırlığı toplamına, iki farklı incelikteki perlitin %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranları katılarak çalışmaya esas olan karışımlar hazırlanmıştır.

Kullanılan perlit iki grupta değerlendirilmiştir. 1. Grup olarak adlandırılan incelikteki perlit, perlit ocağından alınıp etüvde kurutulmuş haldeki; 2. Grup ise, etüvde kurutulduktan sonra 200 No'lu elekten geçmiş olan elek açıklığı 0,075 mm altı perlittir. Deney numuneleriyle ilgili adlandırmalar Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Deney numuneleriyle ilgili notasyonlar

Deney numunelerinin karışım oranları	Notasyon
Doğal zemin	S
Doğal zemin ve kireç	SL
Zemin, kireç ve perlit	SLP
Zemin, kireç ve %5 perlit (1.Grup)	SLP1/5
Zemin, kireç ve %10 perlit (1.Grup)	SLP1/10
Zemin, kireç ve %15 perlit (1.Grup)	SLP1/15
Zemin, kireç ve %20 perlit (1.Grup)	SLP1/20
Zemin, kireç ve %25 perlit (1.Grup)	SLP1/25
Zemin, kireç ve %30 perlit (1.Grup)	SLP1/30
Zemin, kireç ve %5 perlit (2.Grup)	SLP2/5
Zemin, kireç ve %10 perlit (2.Grup)	SLP2/10
Zemin, kireç ve %15 perlit (2.Grup)	SLP2/15
Zemin, kireç ve %20 perlit (2.Grup)	SLP2/20
Zemin, kireç ve %25 perlit (2.Grup)	SLP2/25
Zemin, kireç ve %30 perlit (2.Grup)	SLP2/30

*1.Grup: Perlit ocağından alınıp etüvde kurutulmuş haldeki perlit

*2.Grup: Elek açıklığı 0,075 mm olan elekten elenmiş perlit

3.1.1. Doğal Malzeme

Deneylelerdeki zemin örneği Bayburt İli Demirözü İlçesinde bulunan bir araştırma çukurundan temin edilmiştir. 1975 m rakımlı bu bölgeden alınan doğal malzeme Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'na getirilmiştir. Şekil 3.1'de doğal malzemenin alındığı ilçenin konumu verilmiştir.

Kullanılan zeminin öncelikli olarak hangi zemin sınıfına ait olduğunun belirlenmesi gereklidir. ASTM D 2487 (2011) standardına göre çalışma sırasında kullanılan zemin sınıfı CL olarak belirlenmiştir.

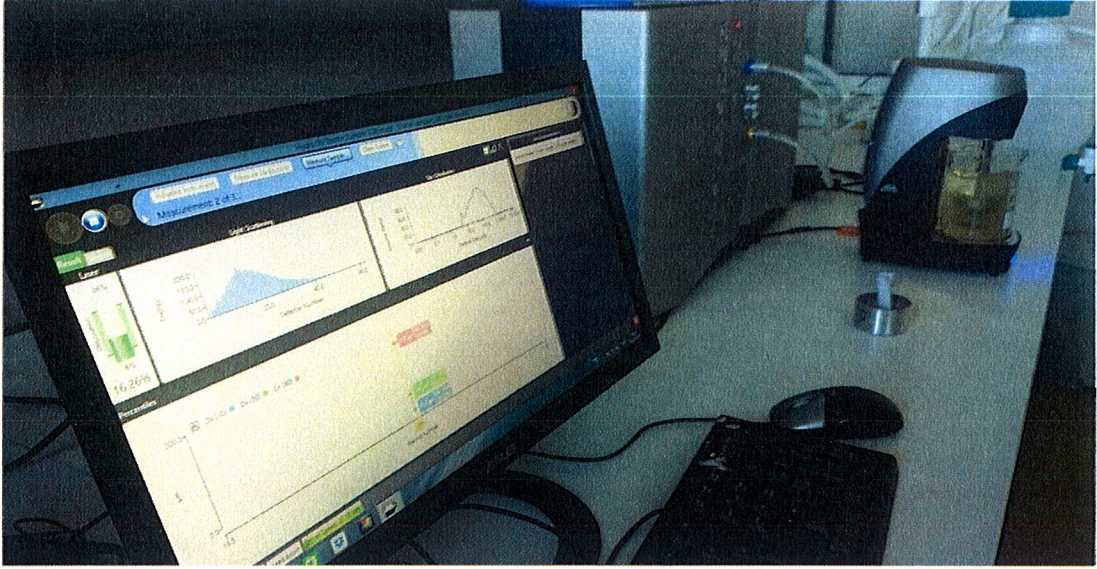


Şekil 3.1 Doğal malzemenin alındığı Demirözü ilçesinin yeri

Zemin sınıfı düşük plastisiteli kil olarak belirlenen doğal malzeme için yıkamalı elek analizi ve lazer kırınım yöntemi yapılmıştır.

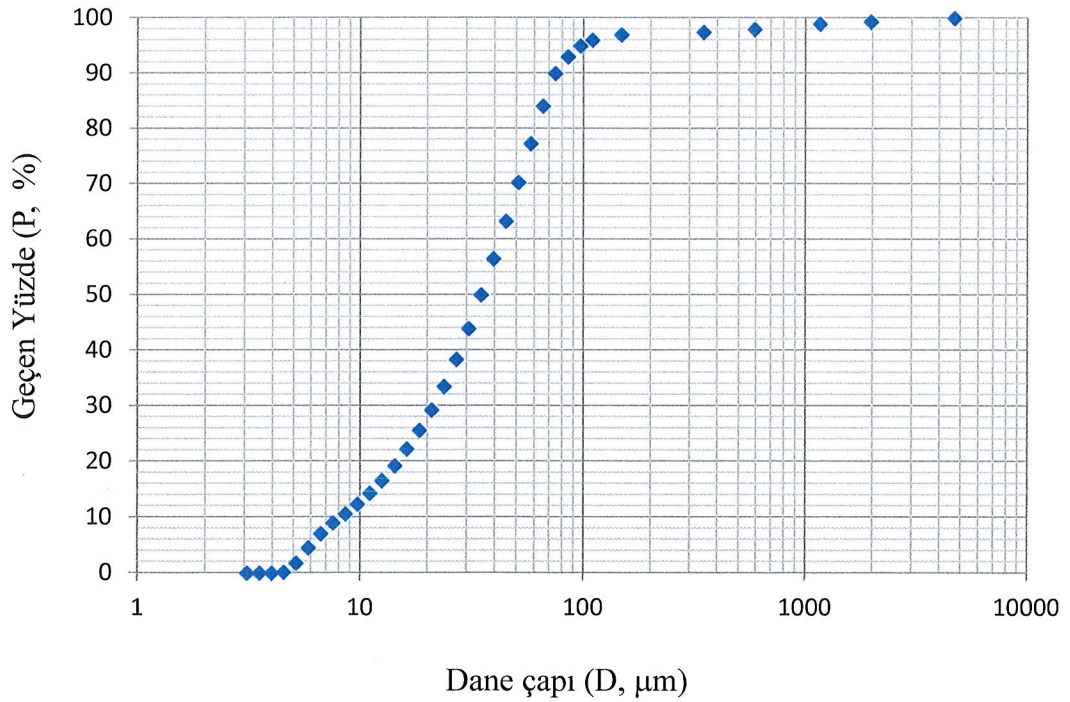
Özer ve Orhan (2007) yaptıkları çalışma neticesinde lazer kırınım yöntemiyle tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi ve hidrometre yöntemiyle karşılaştırılması sonucunda lazer kırınım yöntemiyle belirlenen kil yüzdesinin daha güvenilir olması ve hidrometre yöntemiyle kil yüzdesinin olduğundan daha yüksek hesaplanmasıdır. Tane şekli bunun en önemli nedenidir. Kil taneleri genellikle levhamsı veya yapraksı şeklinde olurlar ve su içerisinde yavaş çökerler. Stokes eşitliğiyle küre şeklindeki taneler daha küçük taneler gibi hesaplanmaktadır. Lazer kırınım yönteminin çok kısa sürede sonuç vermesi, çok az bir örnek gerektirmesi, tanelerin özgül ağırlığından etkilenmemesi ve bilgisayar ile kontrol edilen elektronik bir cihaz olmasından dolayı sonuçların bilgisayar ortamında saklanabilirliğinin bulunması gibi özelliklere sahip olması hidrometre yöntemine göre üstünlüğünü sağlamaktadır. Bu yüzden deney çalışmasında hidrometre yöntemi yerine lazer kırınım yöntemi kullanılmıştır.

Şekil 3.2’de yapılan lazer kırınım yöntemi deneyinden bir fotoğraf sunulmaktadır.



Şekil 3.2 Lazer kırınım yönteminden bir görüntü

200 No'lu elek altı doğal malzemenin bu boyutu Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarları Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yapılan lazer kırınım yöntemi deneyi ile belirlenmiştir. Şekil 3.3'te doğal zeminin dane boyutu dağılım eğrisi verilmektedir.



Şekil 3.3 Doğal malzemenin dane boyutu dağılım eğrisi

Doğal malzemenin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan zemin mekaniği deneyleri sonuçları Çizelge 3.2’de verilmektedir.

Çizelge 3.2 Doğal zeminin özellikleri

USCS sınıflandırma	CL
Likit limit, LL (%)	48,8
Plastik limit, PL (%)	26,5
Plastisite indisi, PI (%)	22,3
Özgül ağırlık, G_s	2,60
Optimum su içeriği, w_{opt} (%)	23,0
Maksimum kuru yoğunluk, ρ_{kmax} (Mg/m ³)	1,63
Renk	Sarımtırak

Mühendislik özelliklerini Çizelge 3.2’de verilen doğal malzemeye ASTM D 2974 (2007) standardına uygun olarak Karadeniz Teknik Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Analitik Kimya Laboratuvarı’nda organik madde tayini analizi yapılmıştır. Elde edilen veriler neticesinde doğal malzemenin içindeki organik madde oranı %4,8 seviyelerinde bulunmuştur. Bu değer kireçle stabilizasyon için uygunluğu bulunmaktadır. Literatür çalışmalarında organik madde içeriği %5’ten daha fazla olan zeminlere kireçle stabilizasyon uygulanması durumunda, zemin içindeki organik maddelerin kimyasal reaksiyonları azaltıcı etkisi olduğu ve ıslanma kuruma periyotlarında zemini ufalayıp dağıttığı tespit edilmiştir (Arman ve Moonfish, 1972; Nelson ve Debora, 1992).

3.1.2. Kireç

Deneyde kullanılan kireç katkı maddesi Karsan Kireç Sanayi Ticaret A.Ş. tarafından üretilmiş olan SKK80-Söndürülmüş Kalker Kirecidir. Kireç ile ilgili kimyasal ve fiziksel özellikler Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.3 Söndürülmüş kalker kirecine ait kimyasal ve fiziksel özellikler

KİMYASAL ANALİZLER	
SiO ₂ (%)	0,23
Al ₂ O ₃ (%)	0,11
Fe ₂ O ₃ (%)	0,40
Aktif CaO (%)	65,00
MgO (%)	1,40
Ca(OH) ₂ (%)	85,80
FİZİKSEL ANALİZLER	
75 µ elek üzeri (%)	3,8
Özgül Ağırlık (G _s)	2,37
pH Değeri	12,4
Yoğunluk (Mg/m ³)	0,48

Numunelerde kullanılması gerekli olan kireç miktarının belirlenmesi için, doğal malzemeye ASTM D 6276 (2006) standardına göre uygun bir şekilde pH deneyi yapılmıştır. Deneyde HANNA 2211 pH/ORP Meter cihazı kullanılmıştır.

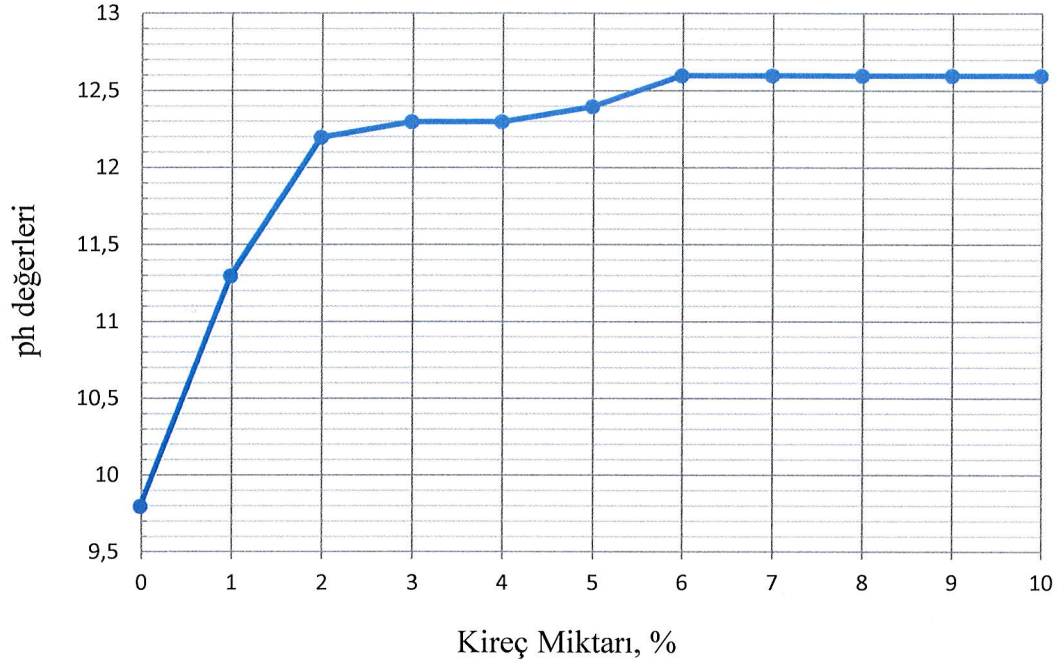
Optimum kireç oranı belirlenmesi için hazırlanan solüsyonlarla ilgili pH verileri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 Kirecin analiz sonuçları

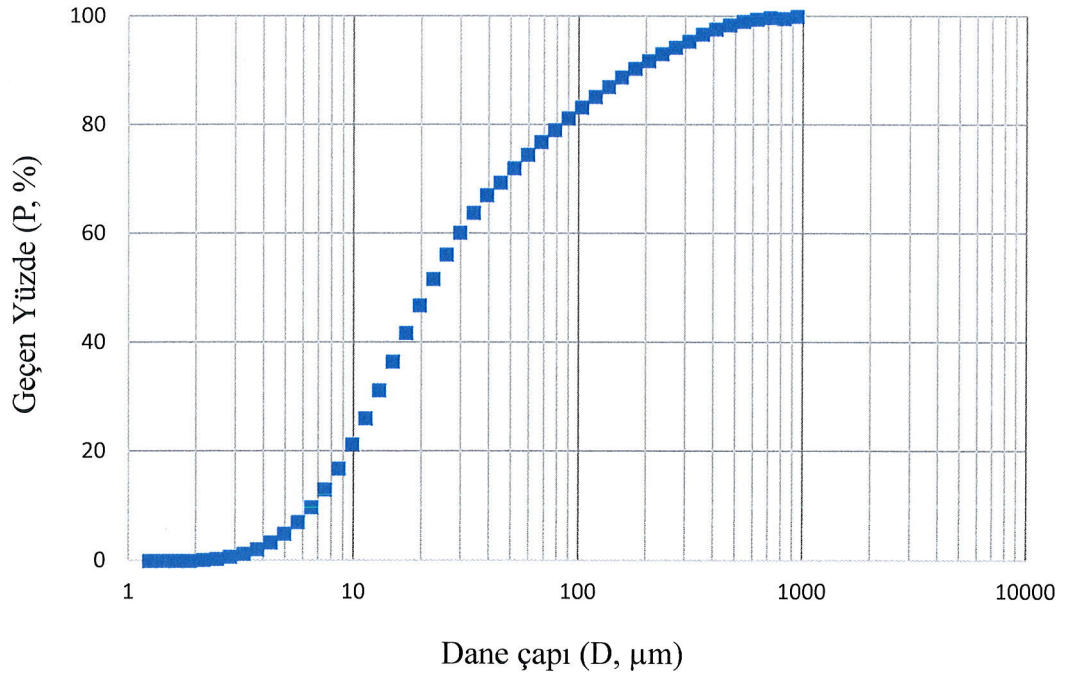
Kireç oranı	%0	%1	%2	%3	%4	%5	%6	%7	%8	%9	%10
pH değeri	9,8	11,3	12,2	12,3	12,3	12,4	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6

Bu değerlere bakıldığında %5 oranında kireçli solüsyon için optimum kireç oranı şartlarını sağladığı görülmektedir. Ancak Al-Rawas vd., (2002); Mathew ve Rao, (1997) çalışmaları dikkate alınarak optimum kireç oranı değerini %6 olarak belirlenmiştir. Şekil 3.4'te optimum kireç oranı tespitinin analiz sonuçlarının yer

aldığı grafik verilmektedir. Kirecin sahip olduğu dane boyutu eğrisi Şekil 3.5'te verilmektedir.



Şekil 3.4 ASTM D 6276'ya (2006) uygun optimum kireç oranının belirlenmesi



Şekil 3.5 Kirece ait dane boyutu dağılımı

3.1.3. Perlit

Perlit, magmanın asit safhasında oluşan lavların soğuyup, gözle veya mikroskopla görülebilecek bir yapıda kırılmasıyla ortaya çıkan, kütle yapısında su damlacıklarına sahip volkanik bir cam türüdür.

Belli oranda su içeren iç yapıya sahip olan perlit özel dokulu, asit bileşimli volkanik bir cam olarak ifade edilmektedir. Fibrik yapılmayan perlit, ayrıca nitrat, sülfat, fosfor, ağır metal ve organik madde de içermez. Kimyasal açıdan saf olan perlit insan sağlığı için herhangi bir sakıncalı bileşik içermemektedir.

Yüksek lisans çalışması kapsamında Erzincan iline bağlı Mollaköy beldesinde yer alan perlit ocağından alınan ham, kırılmış, elenmiş perlit agregası kullanılmıştır. Deneyleerde kullanılan perlitin alındığı tesise ait fotoğraflar Şekil 3.6'da sunulmuştur.



Şekil 3.6 Erzincan Mollaköy'deki perlit ocağı

Deney çalışmalarında kullanılan doğal perlit ve elek açıklığı 0,075 mm altı perlite ait fotoğraflar Şekil 3.7’de verilmiştir.



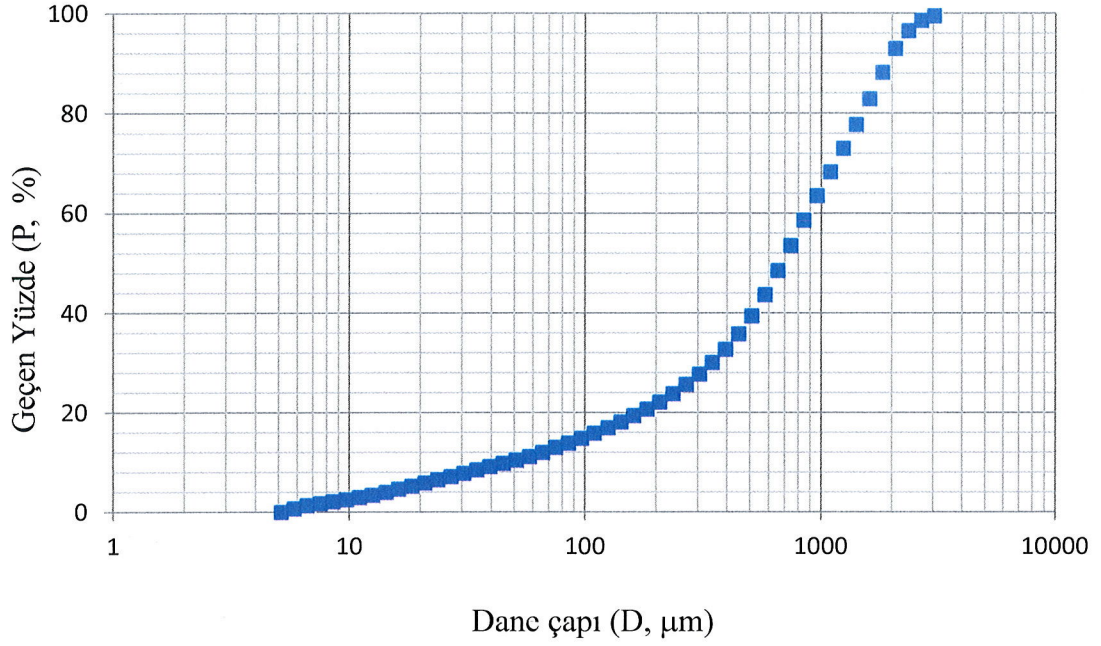
Şekil 3.7 Doğal perlit ve elek açıklığı 0,075 mm altı perlit

200 No’lu elek altı perlite ait kimyasal analizler ve fiziksel analizler Çizelge 3.5’te verilmektedir.

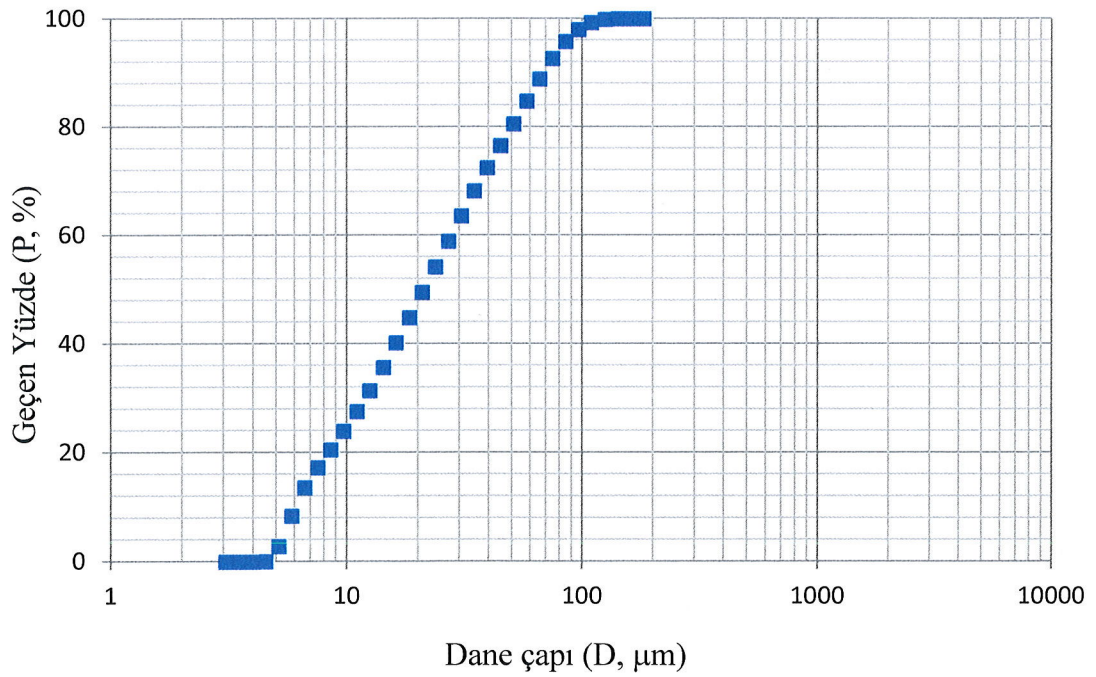
Çizelge 3.5 200 No’lu elek altı perlite ait kimyasal ve fiziksel analizler

KİMYASAL ANALİZLER		FİZİKSEL ANALİZLER	
SiO ₂ (%)	69,21	45 µ elek üzeri (%)	0,9
Al ₂ O ₃ (%)	11,94	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,24
Fe ₂ O ₃ (%)	1,34	Blaine (cm ² /g)	3515
CaO (%)	2,36	Puzolanik Aktivite	10,4
MgO (%)	0,94		
SO ₃ (%)	0,06		
K ₂ O (%)	2,78		
Na ₂ O (%)	5,42		
Kızdırma Kaybı (%)	4,16		
Cl (%)	0,0332		

Lazer kırınım sonrası perlitlerin dane boyutu grafikleri sırasıyla Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.8 Doğal perlitinin dane boyutu dağılım eğrisi



Şekil 3.9 Elek açıklığı 0,075 mm altı perlitin dane boyutu dağılım eğrisi

3.2. Yöntemler

Bu bölümde yüksek lisans tez çalışması kapsamında yapılan deneylere ait referans alınan standartlar sunulmuş olup ayrıca yapılan çalışmalarda kullanılan yöntemler belirtilmiştir.

3.2.1. Deneylerde Referans Alınan ASTM Standartları

Yüksek lisans çalışması kapsamında yapılan zemin deneyleri Çizelge 3.6’da verildiği gibi ilgili ASTM standartlarını referans alarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.6 Deneylerle ilgili ASTM standartları

Deneyin adı	Standart
X-ışını kırınım analizi	ASTM D 934 (2003)
Özgül ağırlık deneyi	ASTM D 854 (2010)
Elek analizi	ASTM D 422 (2007)
Kıvam limitlerinin belirlenmesi	ASTM D 4318 (2010)
Standart kompaksiyon deneyi	ASTM D 698 (2007)
Serbest basınç deneyi	ASTM D 2166 (2006)
Serbest şişme yüzdesi deneyi	ASTM D 4546 (2008)
Şişme basıncı deneyi	ASTM D 4546 (2008)
Optimum kireç miktarının tespiti	ASTM D 6276 (2006)
Organik madde tayini	ASTM D 2974 (2007)
Donma çözülme deneyi	ASTM D 560 (1996)
Durabilite testi (İslanma-kuruma periyodu)	ASTM D 559 (2003)

3.2.2. Zeminin Sınıflandırılması

Zemindeki tanelerin yüzde miktarlarının belirlenmesi; zeminin diğer mühendislik özellikleri hakkında önemli bilgiler edinilmesini sağlamaktadır. Kullanılan zeminin hangi zemin sınıfına ait olduğunun belirlenmesi için elek analizi yapılmıştır. İnce taneli zemin oranının fazla olduğu durumlarda yıkamalı yöntem kullanılmaktadır.

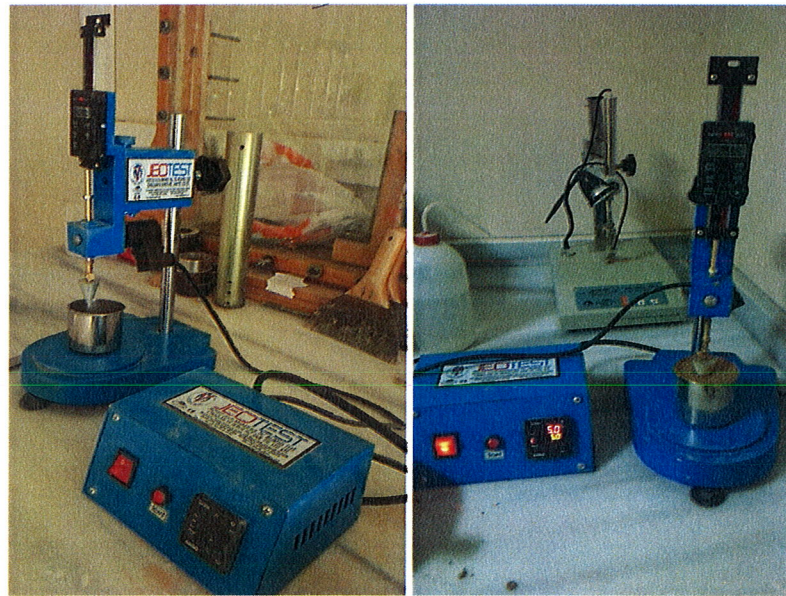
Birleşik zemin sınıflandırılma sistemine uygun olarak zemin sınıfı belirlenmiş, bunun yanı sıra doğal malzemeye tez çalışması kapsamında lazer kırınım yöntemi de yapılmıştır.

3.2.3. Kıvam Limitleri

Zeminin su içeriğine bağlı olarak değişik tutum sergilemesi, 1911'de Atterberg tarafından deneysel olarak ifade edilmektedir. Atterberg sınırları başlıca olarak likit limit, plastik limit ve rötne limitidir (Atterberg, 1911).

Likit limit, zeminin kendi ağırlığı altında akabilmesi için gerekli su muhtevasıdır. Casagrande veya düşen koni penetrasyon yöntemi olarak iki farklı şekilde elde edilmektedir.

Tez çalışması kapsamında likit limit deneyi için düşen koni penetrasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde standart koninin 5 saniyede zemin örneği içerisine 20 mm batmasına karşılık gelen su muhtevası likit limit olarak tanımlanmaktadır. Düşen koni penetrasyon yönteminde amaç, belli ağırlıktaki bir koni ucun 5 sn süreyle bir kap içerisine doldurulan zemine batma miktarının ölçülmesiyle su muhtevaları için batma miktarı-su muhtevası ilişkisinden likit limiti belirlemektir. Deneyde kullanılan bu yöntemde ait alet Şekil 3.10'da verilmektedir.



Şekil 3.10 Düşen koni penetrasyon aleti ile likit limit değerinin belirlenmesi

Deney için 40 nolu elekten elenmiş bir miktar zemin, su ilavesi yapılarak spatula yardımıyla iyice karıştırılmaktadır. Hazırlanan karışım metal deney kaba iyice yerleştirilip yüzeyi düzeltilmektedir. Koni zeminin yüzeyine batmayacak şekilde indirilir. Alet sıfırlanarak koniyi serbest bırakan düğmeye basılır. 5 sn sonunda koninin batma miktarı okuması yapılmaktadır. Koni kaldırılır ve bir miktar numune su muhtevasını belirlemek üzere koni deliği civarından alınır. Bu işlem su muhtevasında değişiklik yapılarak tekrarlanır. Alınan numuneler tartılıp su muhtevası belirlenmesi için etüve konulur. Elde edilen sonuçlardan 20 mm batma miktarına karşılık gelen su muhtevası likit limit olarak belirlenmiştir.

Plastik limit, zemin malzemesinin plastik kıvamdan yarı plastik kıvama geçtiği sınır su muhtevasıdır. 40 No'lu elekten geçen bir miktar zemin su ile yoğrularak çapları 3 mm olan silindirler ortaya çıkarılır. Bunlar, bir cam plaka üzerinde yuvarlanır. Böylece, kısmen suyunu kaybeden silindirler zeminin plastikliğinin azalmasıyla artık harekete devam edemezler ve çeşitli parçalar halinde kırılmak üzere yarırlar. Bu haldeki zeminin su muhtevasına plastik limit adı verilir. Bu yöntemle zeminin henüz yuvarlanabildiği limit hali belirlenmiş olur.

3.2.4. Kompaksiyon Deneyi

Kompaksiyon, zeminin farklı yöntemler kullanılarak tabakalar halinde serilerek, zeminin boşluk oranının azaltılması ve zemin tanelerinin birbirine yaklaştırılması neticesinde zeminin daha sıkı duruma gelmesini sağlayan mekanik işlemlerdir. Kompaksiyon ile zeminin mukavemetinin ve taşıma gücünün artması, oturmaların azalması, geçirimsizlik ve hacim değiştirme direncinin artması sağlanabilmektedir.

Kompaksiyon deneyi, standart kompaksiyon ve değiştirilmiş (ağır, modifiye) kompaksiyon deneyi olarak iki şekilde yapılmaktadır. Bu çalışma kapsamında standart proktor deneyi yapılmıştır. Bu deneyin amacı maksimum kuru birim hacim ağırlık değerine karşılık gelen optimum su muhtevası değerinin bulunmasıdır.

Tez çalışması deneyi için kurutulmuş belirli bir miktar zemin kullanılmaktadır. Zemine belirli miktarda su ilave edilerek iyice karıştırılır. Hazırlanan nemli zemin standartlara uygun silindirik çelik kalıba düz bir yerde üst yakası da takılmış olarak eşit miktarlarda üç kademe şeklinde ve her tabakasına tokmakla 25 darbe

uygulanarak kalıbın içine sıkıştırılır. Sıkıştırılmış zemin kalıptan çıkartılır. Sıkıştırılmış numunenin bir parçası üzerinde su muhtevası deneyi yapılır. Bu işlem numuneye su katılarak en az beş değer verecek şekilde tekrarlanır. Deney sonuçları, $\rho_k - w$ eksen takımına işaretlenerek, kompaksiyon eğrisi çizilir. Bu eğrinin tepe noktasından, w_{opt} ve ρ_{max} elde edilir (Uzuner, 2007). Tez çalışmasında yapılan standart proktor deneyine ait görüntü Şekil 3.11’de yer almaktadır.



Şekil 3.11 Standart proktor deneyinin belirlenmesi

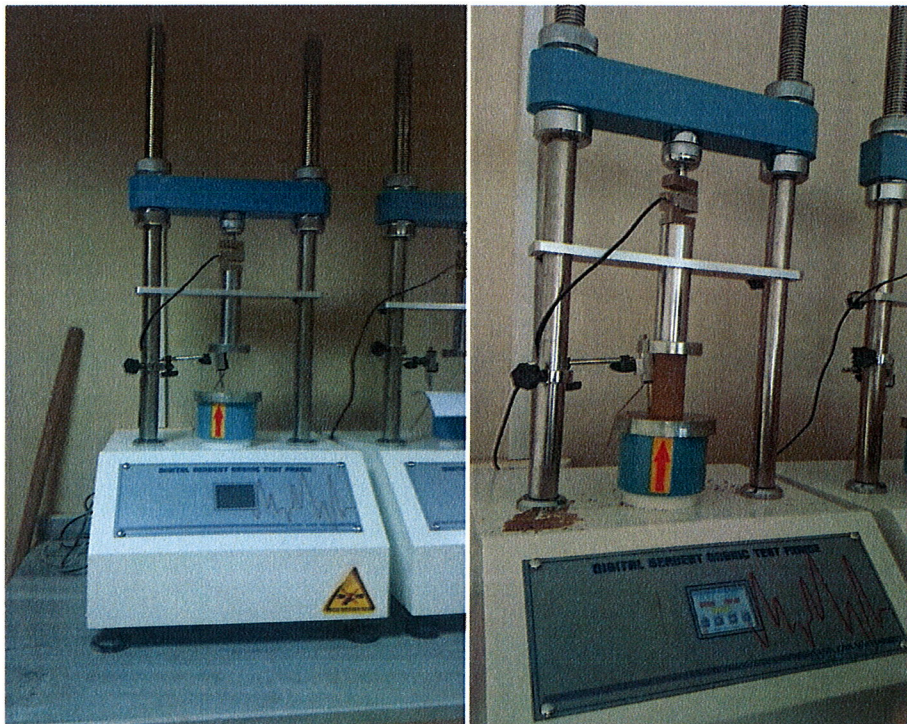
3.2.5. Serbest Basınç Deneyi

Genellikle suya doymun killi zeminlerde ($\phi=0$) kayma direncinin belirlenmesi için kullanılan bir deneydir. Numunedeki oluşacak olan kayma düzleminin alt ve üst

yükleme başlıkları ile kesişmemesi için boy uzunluğu/çap oranı (h/d) en az iki olmalıdır.

Yüksek lisans çalışması kapsamında hazırlanan deney numuneleri 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde silindirik numunelerdir. Deney numuneleri 7 gün, 28 gün ve 84 gün kür süresinde desikatörde bekletilmiştir. Serbest basınç deneyi için tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır.

Tek eksenli dayanım; zemine tek yönde uygulanmış olan kuvvetlere karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilebilir. Tek eksenli deneyi çabuk sonuç verir, sonuçların yaklaşık olması ve ekonomik olması bakımından tercih edilebilir. Şekil 3.12'de tek eksenli basınç dayanımı deney düzeneği verilmektedir.

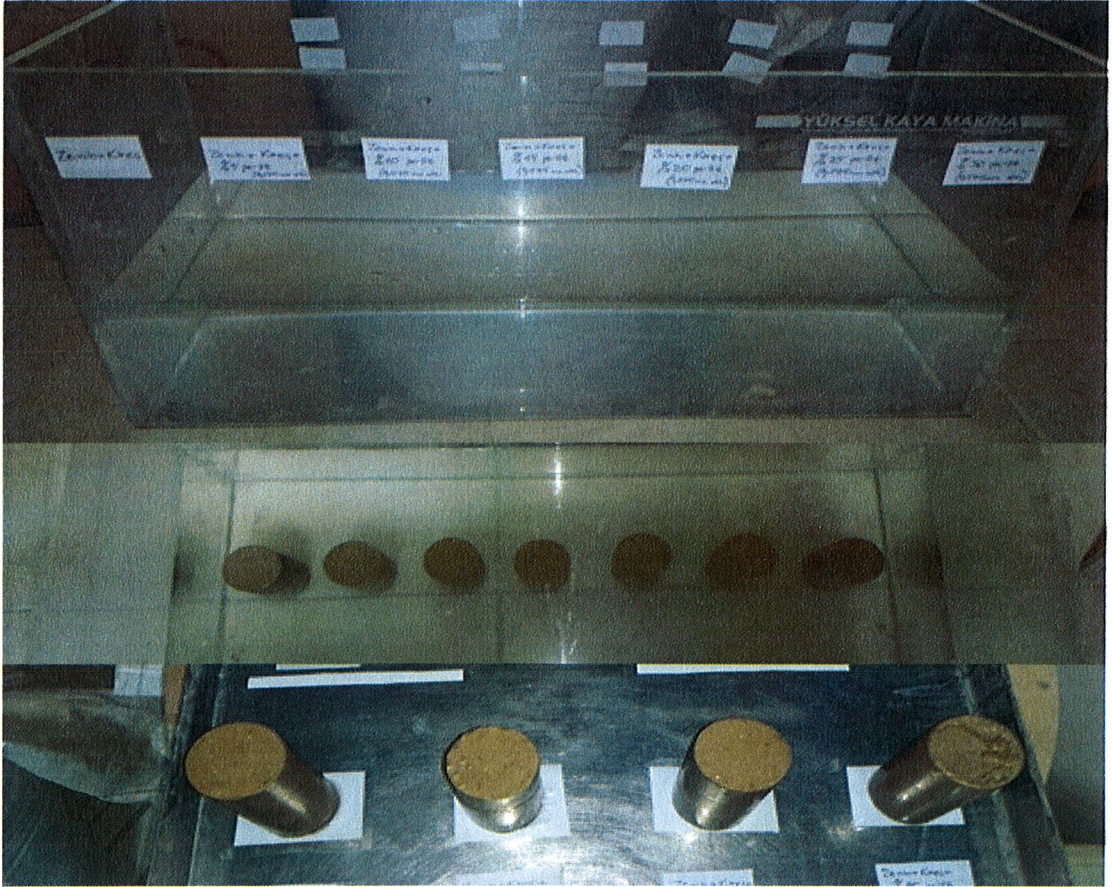


Şekil 3.12 Tek eksenli basınç deneyi düzeneği

3.2.6. Islanma-Kuruma Periyodu Deneyi

Deney numuneleri hazırlanarak önce desikatörün içinde 28 gün süre ile kür edilerek ıslanma-kuruma periyodu için hazır hale getirilir. Kür sürecinin ardından deney

numuneleri ASTM D 559'a (2003) göre 12 adet ıslanma-kuruma periyoduna tabi tutulmuştur. Desikatörden çıkarılan deney numuneleri kuru haldeyken tartılır. Sonra bu deney için hazırlanan su konulmuş olan kabın içerisine bırakılır. Ertesi gün numuneler su içerisinden alınıp kuru bir yerde kurumaya bırakılır ve bir gün sonra kuruyan numuneler tartılır. Bu işlem 12 ıslanma-kuruma periyodu şeklinde devam eder. Deney sonunda numunelerdeki kütle kayıpları tespit edilerek numunelerin hacimsel bütünlüğü koruyup koruyamadığı neticesine bakılır. Bu çalışma kapsamında çapı 50 mm, yüksekliği 100 mm olan silindirik deney numuneleri hazırlanmıştır. Şekil 3.13'te ıslanma-kuruma periyodunun süreci verilmiştir.



Şekil 3.13 Islanma-kuruma periyodu deneyi

3.2.7. Donma-Çözülme Çevrimi

Deney numunelerine ASTM D 560 (1996) standardına göre donma-çözülme çevrimi uygulanmıştır. Hazırlanan deney numuneleri 28 gün kür süresinde desikatörde

bekletilmiştir. Kür sonrasında numuneler donma-çözülme kabineine konularak numunelere 12 kez donma-çözülme çevrimi uygulanmıştır. Donma-çözülme çevrimi $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 1 gün olmak üzere kapalı sistem şeklinde donma-çözülme kabininde gerçekleştirilmiştir. Donma-çözülme çevriminin tamamlanmasının ardından bu numunelerin dayanımları tek eksenli basınç deneyi ile belirlenmiştir. Şekil 3.14'te numunelerin donma-çözülme çevrimi kabini ve işlemleri verilmiştir.



Şekil 3.14 Donma-çözülme deney düzeneği

3.2.8. Şişme Yüzdesi Deneyi

Kil mineralleri, genellikle yüzeyde negatif, kenarlarda ise pozitif elektrik yüklerine sahiptir. Serbest şişme yüzdesi deneyi, zeminlerin şişme potansiyellerinin tahmininde oldukça yaygın kullanılan bir yöntemdir. ASTM D 4546 (2008) standardına göre serbest şişme yüzdesi deneyi yapılmaktadır.

Serbest şişme yönteminde konsolidasyon düzeneği kullanılır. Serbest şişme yüzdesinin ölçüldüğü konsolidasyon düzeneği ile herhangi bir yük uygulanmayan numunenin hacimsel değişimi ölçülmektedir. Bu deneydeki düzende kalıp kullanılır. Kalıp bir setten oluşmaktadır. Bu kalıp setinin içerisinde iki tane rijit poroz taş, iki tane filtre kağıdı, bir rijit konsolidasyon halkası ve bunların içerisine yerleştirildiği pirinçten imal edilmiş kap, disk kapak ve oluklu kapak bulunmaktadır. Şekil 3.15'te serbest şişme yüzdesi deneyinin işlemleri ve aleti verilmektedir.



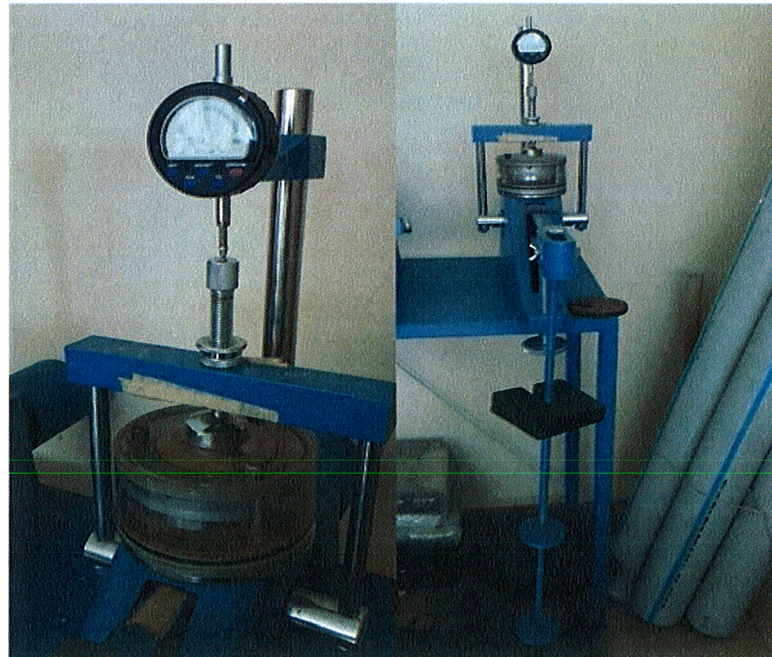
Şekil 3.15 Şişme yüzdesi deney düzeneği

Deneyde hazırlanan numunenin sıkıştırma işleminin tamamlanmasının ardından, numune konsolidasyon hücresine yerleştirilir. Konsolidasyon hücresine yerleştirilerek deney için hazır hale gelen numune konsolidasyon deney düzeneğine yerleştirilir. İlk okuma not edilir. Su ile şişme işlemi 24 saat süreyle devam ettirilir. 24 saat sonunda deney tamamlanır ve komparatör saatten son okuma ile deney sonlandırılır. Son okuma ve ilk okumanın farkı numunedeki boy artışını vermektedir. Boy artışının ilk boya oranı da serbest şişme yüzdesine eşittir.

3.2.9. Şişme Basıncı Deneyi

Şişme basıncı, şişme potansiyeline sahip killi zeminde su içeriğinin artmasıyla gerçekleşen hacim değişikliğine engel olabilecek basınca denir.

Yük halkası kolu numune üzerine gelecek bir biçimde sisteme yerleştirilir. Sisteme su verilir ve numune tamamen suya doygun hale getirilir. Numunelere su verilmesinden hemen sonra, farklı zaman aralıklarında (0.5, 1, 4, 9, 25, 36, 49, 225, 360 ve 1225 dakika) şişme basıncı değişimleri, sisteme bağlı bulunan dijital saatler kullanılarak ölçülür. Bu işlem sırasında farklı yüklemeler yapılır. Şekil 3.16'da şişme basıncı deneyine ait düzenek verilmiştir.



Şekil 3.16 Şişme basıncı deney düzeneği

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Zeminler yapı yüklerini taşıyan alanlar olmasının yanı sıra birçok zemin bünyesinin hammaddesi olarak da kullanılır. Bu yüzden zeminlerin nasıl bir yapıya sahip olduklarının belirlenmesi geoteknik uygulamaları açısından önem taşımaktadır. Zeminlerin mühendislik parametreleri eksiksiz bulunabildiği zaman geoteknik uygulamaları tamamlanıp gerçekleştirilebilmektedir.

Yüksek lisans tez çalışmasının konusu, Bayburt ili Demirözü ilçesinden temin edilen doğal malzemenin kireç ve belirli incelikteki perlitte stabilizasyonudur. Optimum kireç oranı ilavesi yapılan zemine perlitin incelik faktörünü dikkate alarak iki farklı incelikte, belirlenen oranlarda katılarak numuneler hazırlanmıştır. Bu tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmalar; kıvam limitleri, kompaksiyon deneyleri, serbest basınç deneyleri, ıslanma-kuruma periyodu ve donma-çözülme çevrimi deneyleri ile şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleridir.

Bu deneylerin ardından elde edilen bulgular ve bulguların araştırılması bu bölümde detaylı şekilde anlatılmaktadır.

4.1. Deneylerden Elde Edilen Veriler

Doğal malzemeye kireç ve perlit ilavesi ile yapılan kimyasal stabilizasyonda deneysel çalışma kapsamında öncelikli olarak likit ve plastik limit değerleri saptanmıştır. Belirlenen oranlarda hazırlanan numunelere kompaksiyon deneyleri yapılarak maksimum kuru yoğunlukları ve optimum su içeriği değerleri tespit edilmiştir. Kompaksiyon deneyleri tamamlanan tez kapsamında diğer deney çalışmalarına geçilmiştir.

4.1.1. Kıvam Limitleri

Tez çalışması kapsamında oluşturulan ve daha önce notasyonları ifade edilmiş karışımların ASTM D 4318 (2010) standardına uygun olarak yapılan likit limit ve plastik limit deneylerinden elde edilen sonuçlarla plastisite indisi değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Deneydeki numunelere ait kıvam limitleri

Deney Numuneleri	Likit Limit(%)	Plastik Limit(%)	Plastisite İndisi(%)
S	48,8	26,5	22,3
SL	43,4	32,4	11,0
SLP1/5	42,9	33,0	9,9
SLP1/10	42,2	33,0	9,2
SLP1/15	41,3	32,1	9,2
SLP1/20	40,6	31,0	9,6
SLP1/25	40,0	29,0	11,0
SLP1/30	39,1	28,0	11,1
SLP2/5	42,9	33,0	9,9
SLP2/10	41,9	34,0	7,9
SLP2/15	41,7	34,0	7,7
SLP2/20	41,7	34,0	7,7
SLP2/25	41,2	32,0	9,2
SLP2/30	41,0	31,0	10,0

Çalışma kapsamında hazırlanan doğal malzeme harici tüm karışımlar optimum kireç oranı (%6) ile birlikte hazırlanmıştır. Hazırlanan katkılı tüm karışımlar kireçli olarak hazırlanmıştır. Çalık (2012) tarafından yapılan çalışmada perlitin kireçsiz olarak doğrudan zemine katılmasının zeminin mühendislik özelliklerinde etkin bir iyileştirme oluşturmadığı tespit edilmiştir.

Karışımlar hazırlandıktan hemen sonra kıvam limitleri yapılmıştır. Doğal zemin numunesine ait likit limit ve plastisite indisi değerlerinin tüm katkılı karışımlara göre yüksek olduğu görülmektedir.

Doğal zemine optimum kireç ilavesi yapılarak hazırlanan SL karışımının zemin numunesine göre likit limit değerinde azalma olduğu görülmüştür. SLP karışımlarının likit limit değerleri SL karışımının likit limit değerinden daha azdır.

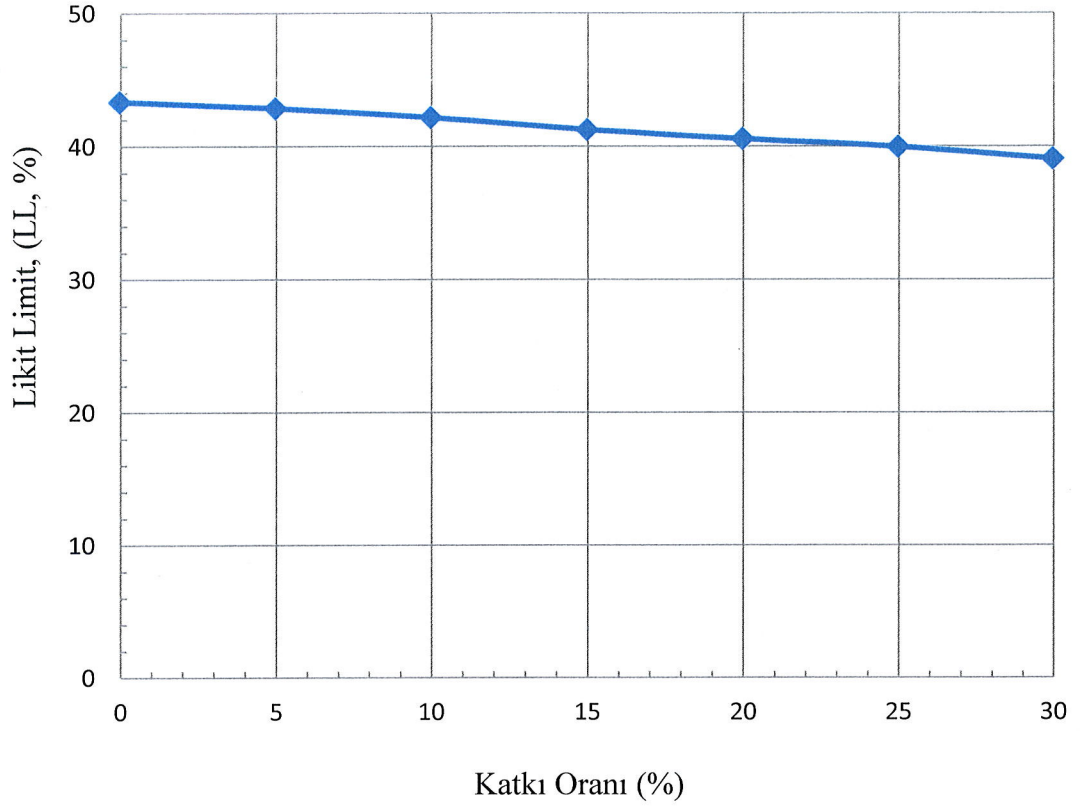
SLP1 ve SLP2 karışımlarına ait likit limit değerlerinde karışımların artan perlit oranında likit limit değerlerinde düşüşler meydana gelmiştir. SLP1 karışımlarının SLP2 karışımlarına göre daha düşük likit limit değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Likit limit değerinin en düşük olduğu değer doğal perlitin %30 oranında kullanıldığı SLP1/30 olduğu tespit edilmiştir.

SL karışımının zemin numunesine göre plastik limit değerinde artış görülmüştür. Artan perlit oranındaki SLP1 ve SLP2 karışımlarına ait plastik limit değerlerinde düzensiz bir davranış söz konusudur.

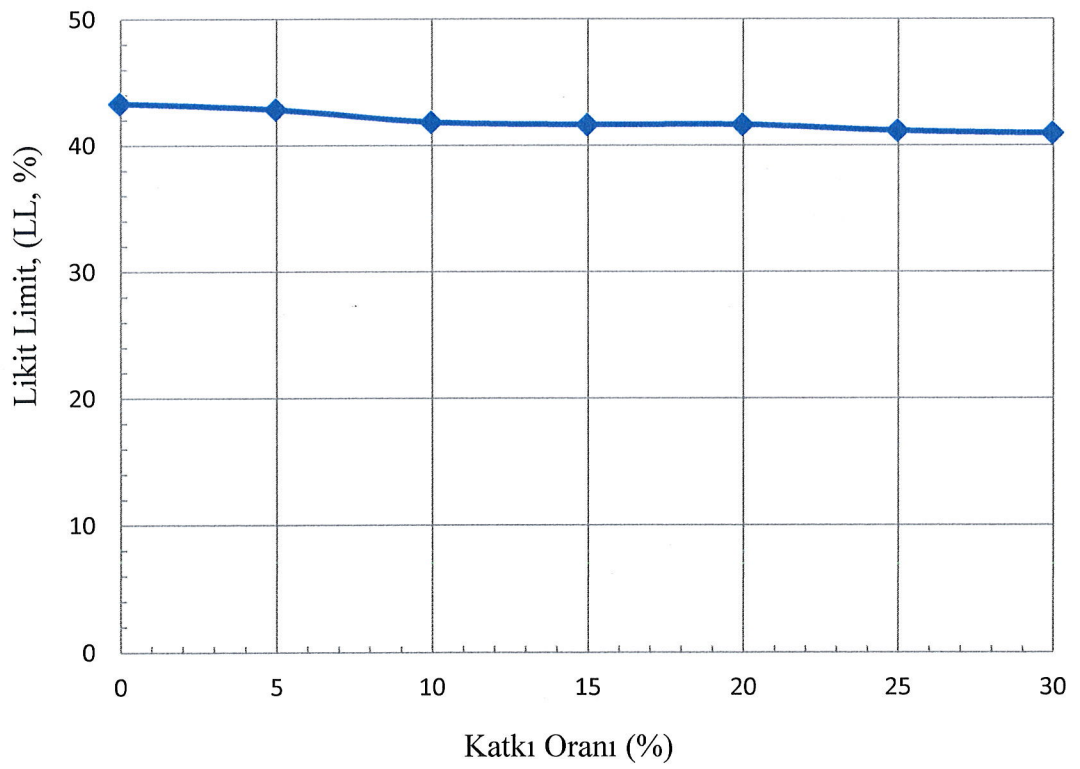
Doğal zemine göre SL karışımının plastisite indisi değerinde azalma meydana gelmiştir. Artan perlit oranındaki SLP karışımlarına ait plastisite indisi değerlerinde zemine göre düşüşler görülmüştür.

Karışımların likit limitlerini belirlemede kullanılan düşen koni penetrasyon deneyi sonuçları Ek-1'de verilmiştir.

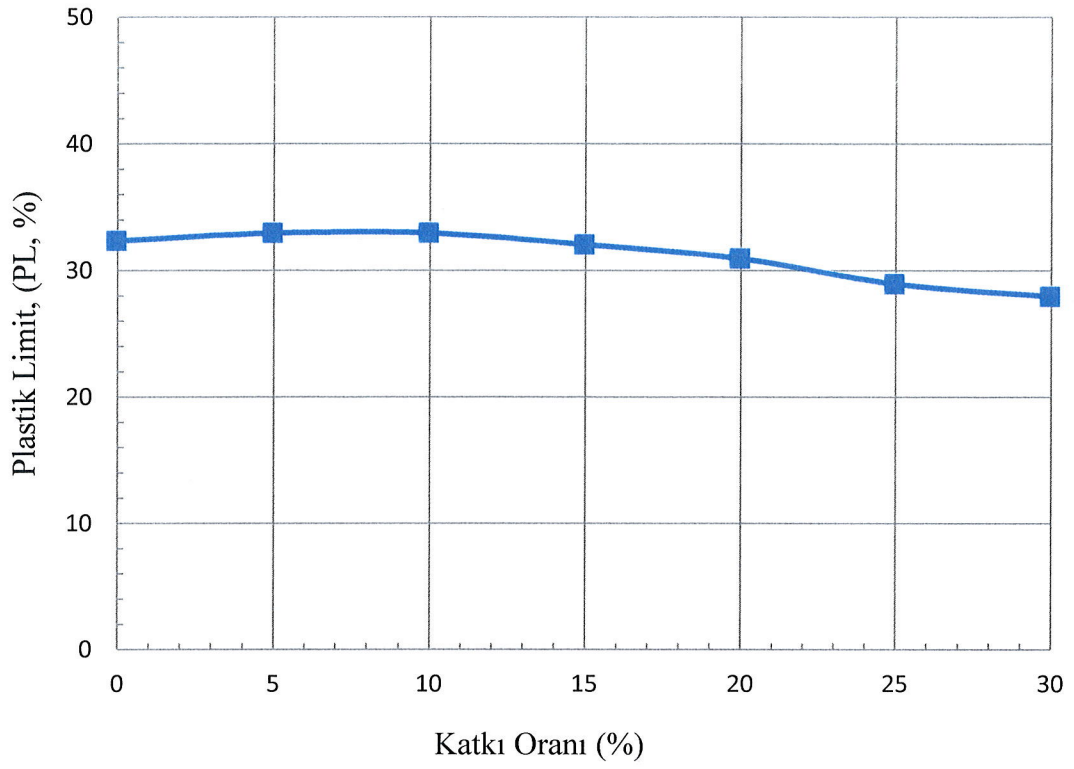
Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6'da içeriğinde %6 oranında kireç bulunan SLP1 ve SLP2 karışımlarının likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerlerindeki değişimler sırasıyla verilmektedir.



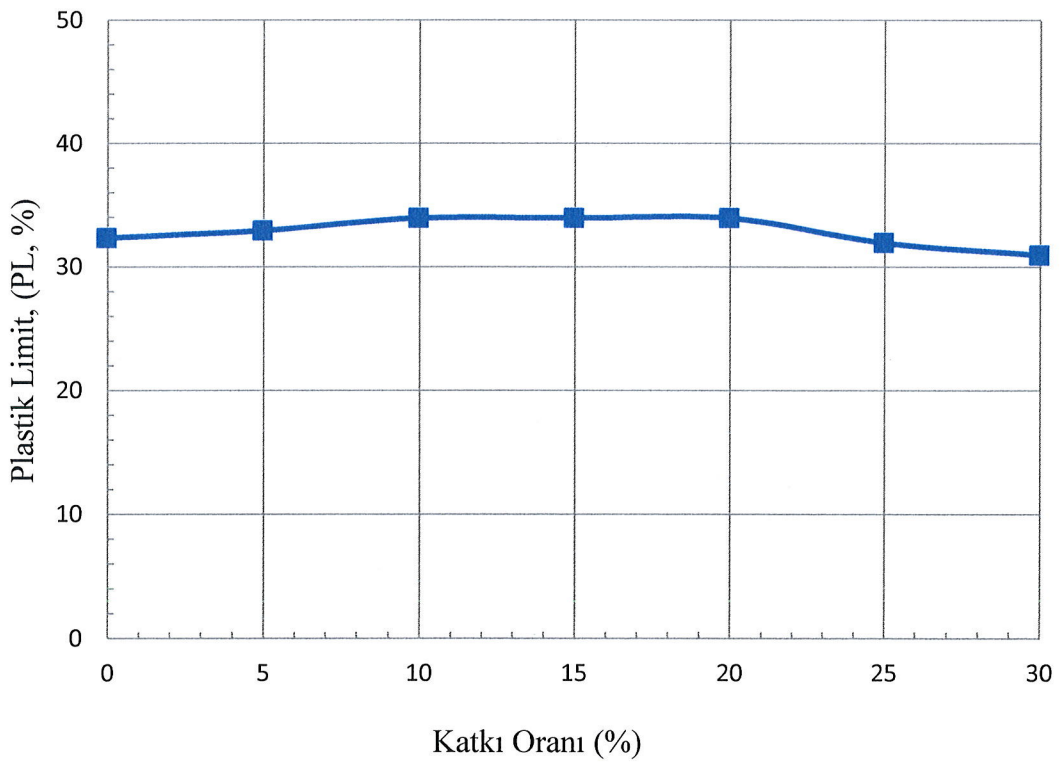
Şekil 4.1 SLP1 karışımlarına ait likit limitler



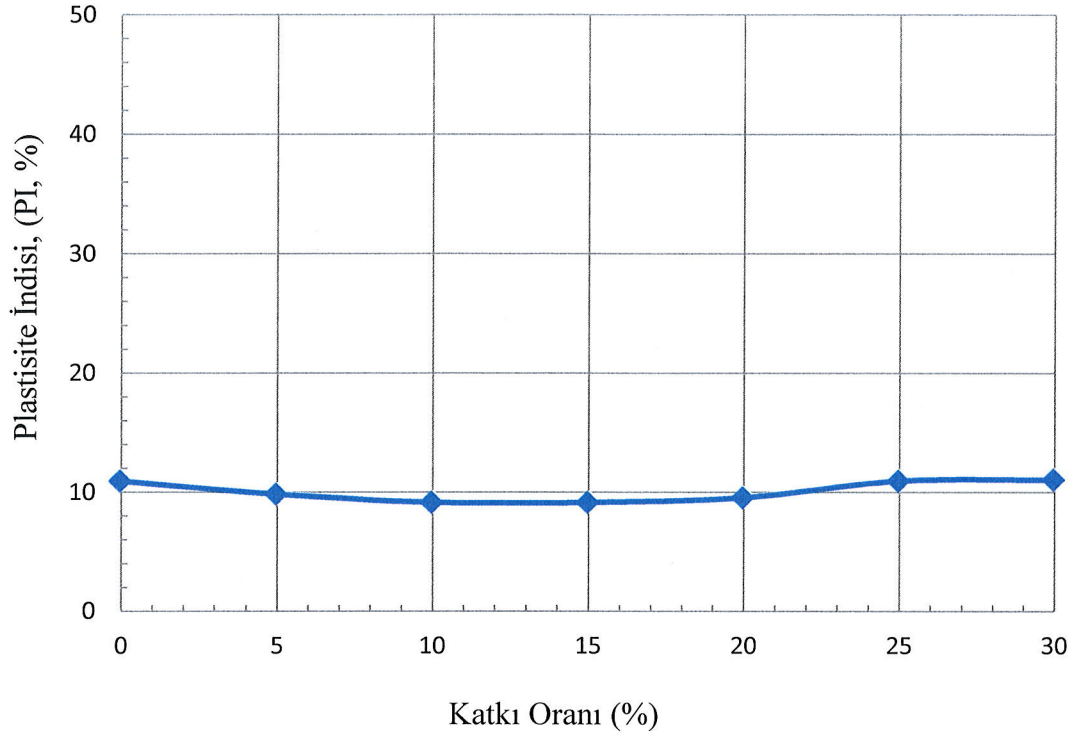
Şekil 4.2 SLP2 karışımlarına ait likit limitler



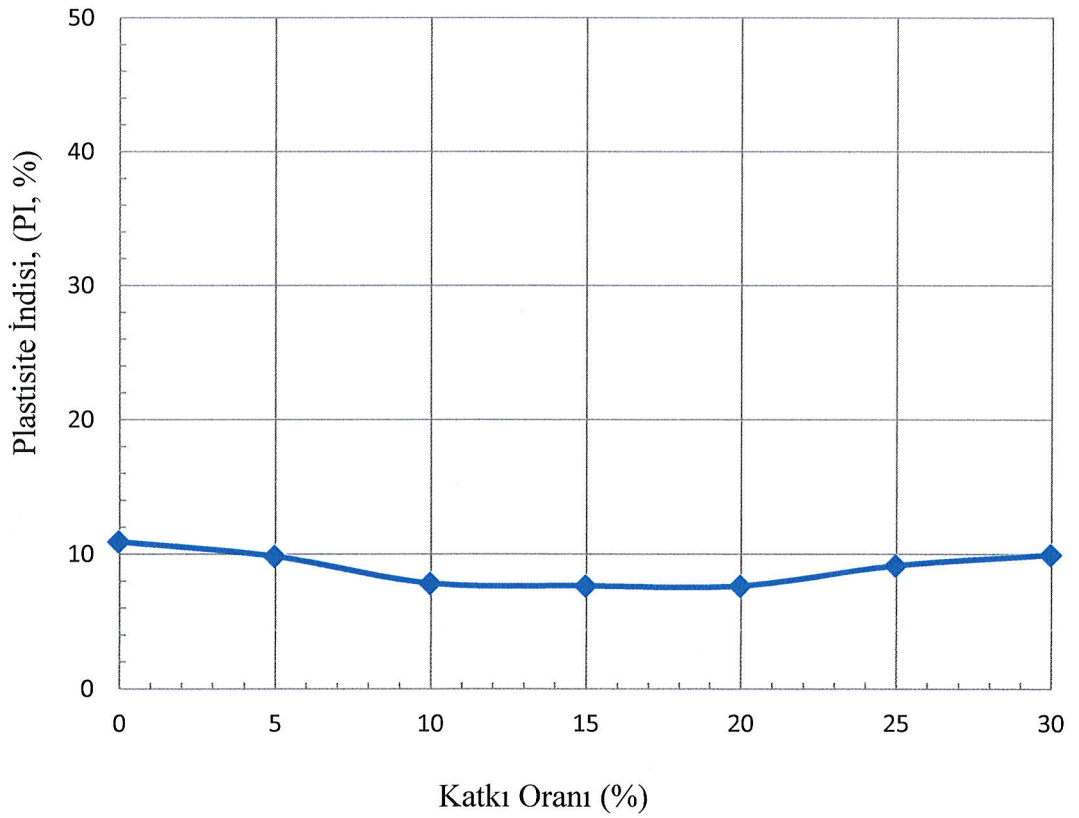
Şekil 4.3 SLP1 karışımlarına ait plastik limitler



Şekil 4.4 SLP2 karışımlarına ait plastik limitler



Şekil 4.5 SLP1 karışımlarına ait plastisite indisleri



Şekil 4.6 SLP2 karışımlarına ait plastisite indisleri

4.1.2. Kompaksiyon Parametreleri

Yüksek lisans tez kapsamında notasyonları belirlenen toplamda 14 farklı numune bulunmaktadır. Perlit oranı %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30 olan ve içeriğinde %6 oranında kireç bulunan karışımların kompaksiyonu yapılarak maksimum kuru yoğunlukları ve optimum su içeriği değerleri ASTM D 698 (2007) standardına uygun olarak elde edilmiştir.

Kompaksiyon deneyleri neticesinde meydana gelen kompaksiyon eğrisi grafikleri Ek-2’de verilmektedir.

Kompaksiyon deneylerine öncelikle doğal zemin ve SL karışımı ile başlanmıştır. SLP1 karışımı için %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarına ait optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunluk değerleri Çizelge 4.2’de sunulmaktadır.

SLP2 karışımı için %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarına ait optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunluk değerleri Çizelge 4.3’te verilmektedir.

Çizelge 4.2 SLP1 karışımlarının kompaksiyon parametreleri

Numune	Maksimum Kuru Yoğunluk, Mg/m ³	Optimum Su İçeriği, %
S	1,63	23,0
SL	1,55	25,5
SLP1/5	1,57	24,5
SLP1/10	1,58	24,0
SLP1/15	1,58	23,5
SLP1/20	1,59	22,0
SLP1/25	1,60	21,0
SLP1/30	1,61	20,0

Çizelge 4.3 SLP2 karışımlarının kompaksiyon parametreleri

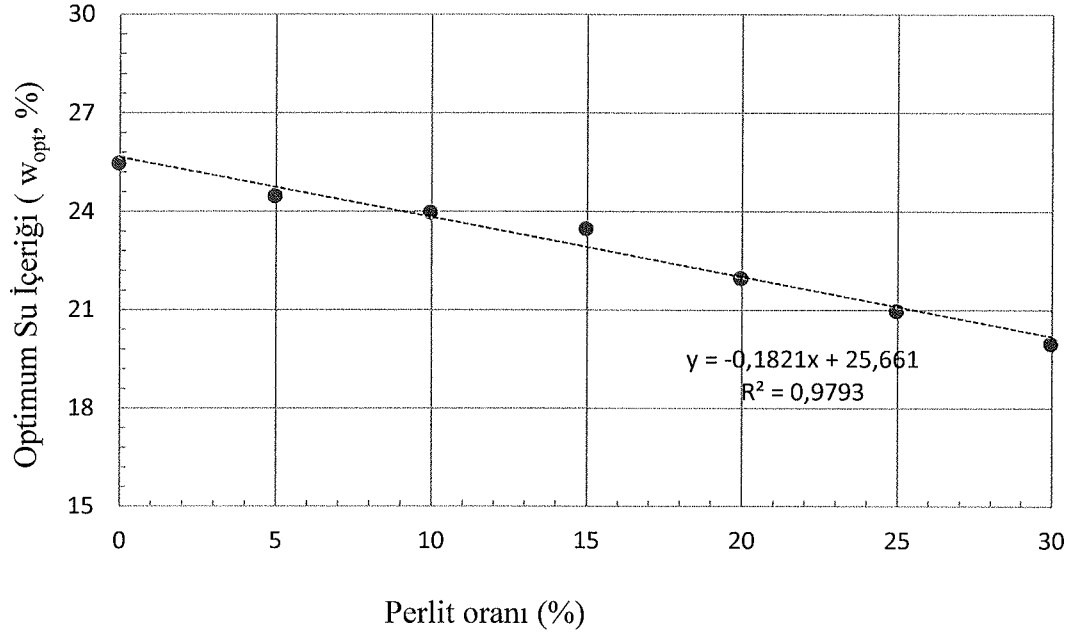
Numune	Maksimum Kuru Yoğunluk, Mg/m ³	Optimum Su İçeriği, %
S	1,63	23,0
SL	1,55	25,5
SLP2/5	1,56	25,2
SLP2/10	1,57	25,0
SLP2/15	1,58	24,8
SLP2/20	1,59	24,7
SLP2/25	1,59	24,0
SLP2/30	1,59	23,5

Doğal zemine sadece kireç katılması ile elde edilen SL numunelerinin kompaksiyon deneyi sonuçları incelendiğinde, optimum su içeriği değerinin kireçli numunede doğal zemine göre arttığı, maksimum kuru yoğunluk değerinin ise azaldığı görülmektedir. Yani doğal zemine optimum kireç oranında (%6) kireç katılmasıyla maksimum kuru yoğunluk değerleri azalmış, optimum su içeriği değeri de artmıştır.

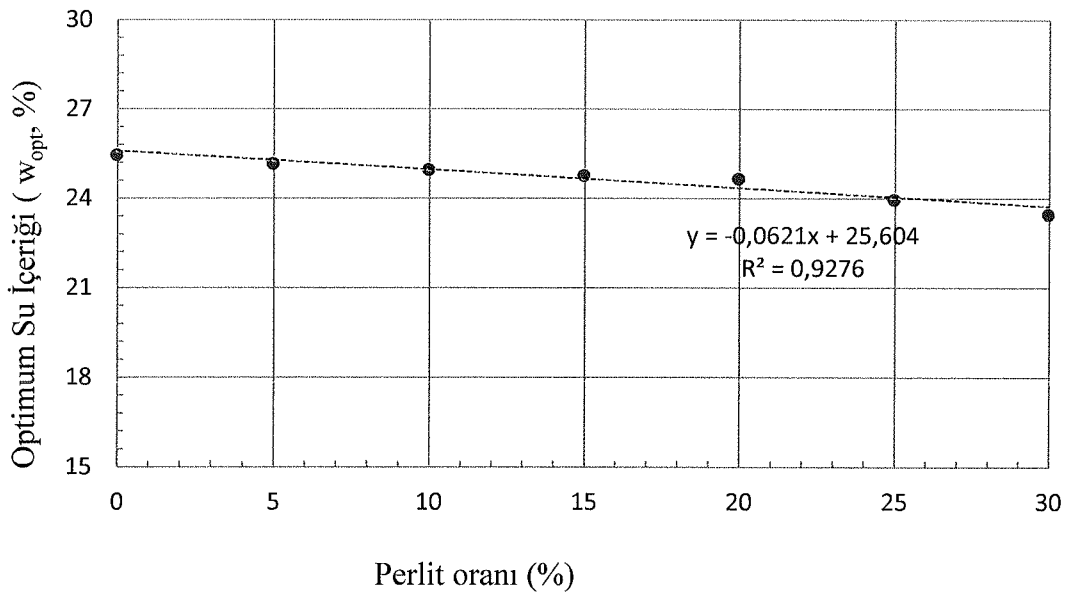
SLP1 karışımlarının maksimum kuru yoğunluk değerleri SL karışımına göre artarken, optimum su içeriği değerlerinde ise azalmalar meydana gelmiştir. %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranı ve optimum oranda (%6) kireç ile hazırlanan SLP1 karışımlarında elde edilen numunelerde maksimum kuru yoğunluk değerlerinde perlit oranlarının artması sonucunda artış olduğu görülmektedir. SLP2 karışımlarının maksimum kuru yoğunluk değerleri SL karışımına göre artarken, optimum su içeriği değerlerinde ise azalmalar meydana gelmiştir. Hazırlanan numunelerde artan perlit oranlarının sonucunda SLP2 karışımlarının maksimum kuru yoğunluk değerlerinde artış olduğu görülmektedir.

Genel olarak katkılı numunelerin maksimum kuru yoğunluk değerleri 1,55-1,61 Mg/m³ arasında değişim göstermektedir. Optimum su içeriği değerleri kireçli karışımlarda incelendiğinde ise %20 ile %25,5 arasında değişimler meydana geldiği

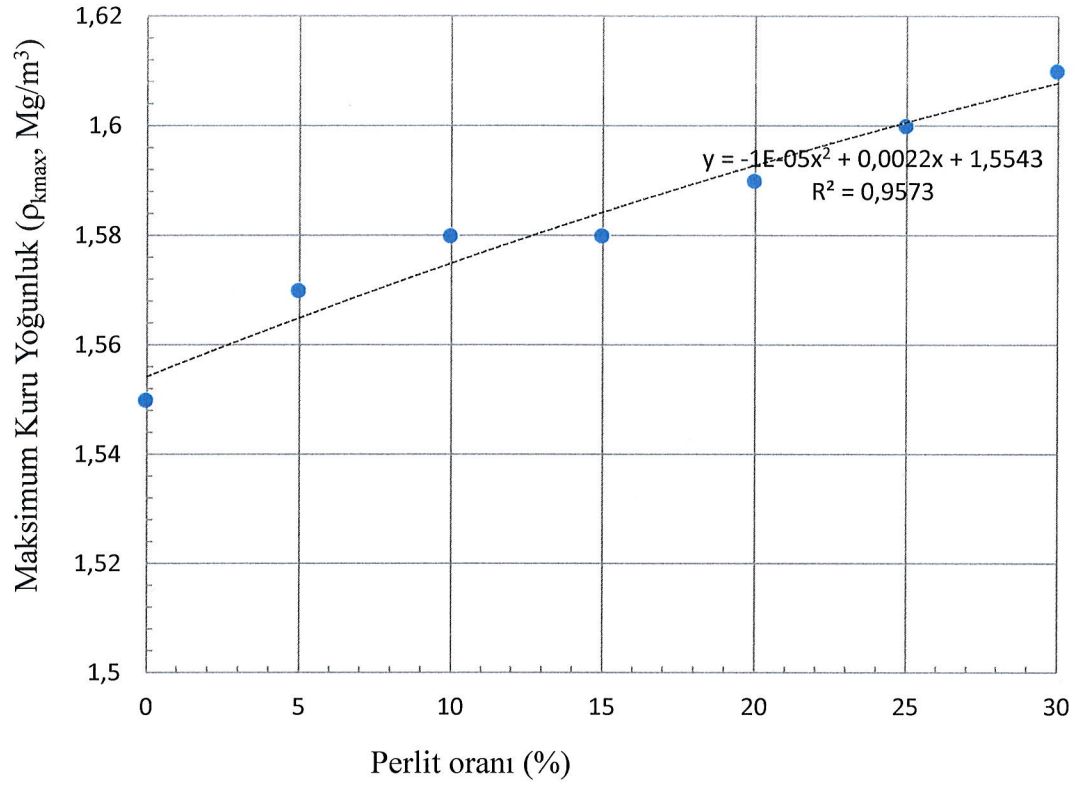
tespit edilmiştir. En düşük optimum su içeriği değeri SL karışımına, doğal perlitin %30 oranında ilave edilmiş SLP1/30 karışımıdır. SLP1 ve SLP2 karışımlarına ait optimum su içeriği grafikleri sırasıyla Şekil 4.7, Şekil 4.8’de verilmiştir. SLP1 ve SLP2 karışımlarının maksimum kuru yoğunluk değerindeki değişim grafikleri ise sırasıyla Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da sunulmuştur.



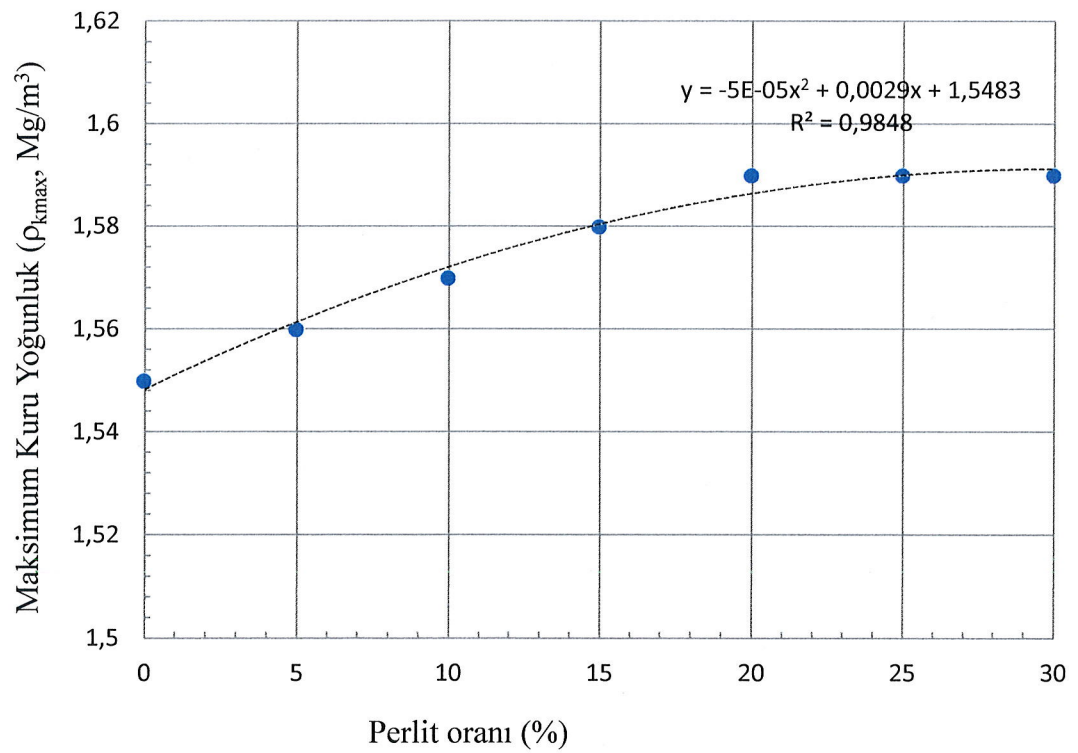
Şekil 4.7 SLP1 karışımlarının optimum su içerikleri



Şekil 4.8 SLP2 karışımlarının optimum su içerikleri



Şekil 4.9 SLP1 karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları



Şekil 4.10 SLP2 karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları

4.1.3. Serbest Basınç Dayanımları

Yüksek lisans tez kapsamında hazırlanan karışımlarının optimum su içerikleri belirlendikten sonra, serbest basınç deneyine geçilmiştir. Deney numuneleri 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde silindirik olarak hazırlanmıştır. Deneyde serbest basınç için toplamda 126 adet numune hazırlanmıştır. Her biri için üçer numune hazırlanarak işlemler yapılmış olup ortalamaları hesaba katılmıştır. Deney numuneleri için belirlenen kür süreleri 7, 28 ve 84 gündür. Belirtilen kür sürelerinde, zemine optimum kireç oranında (%6) ilave edilen kireç ile farklı inceliklerdeki perlitin belirlenen oranlarda katılmasının zemin stabilizasyonunda mukavemet değerleri araştırılmıştır.

Puzolanik katkı maddesi inceliğinin tek eksenli serbest basınç dayanımı değerlerine etkisini araştırılan bu çalışmada, serbest basınç dayanımını belirlemek için hazırlanan katkılı numune örnekleri Şekil 4.11'de sunulmuştur. Bu numunelerin desikatörde küre bırakılması ise Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Serbest basınç deneyi numunelerinin bazılarının görüntüleri



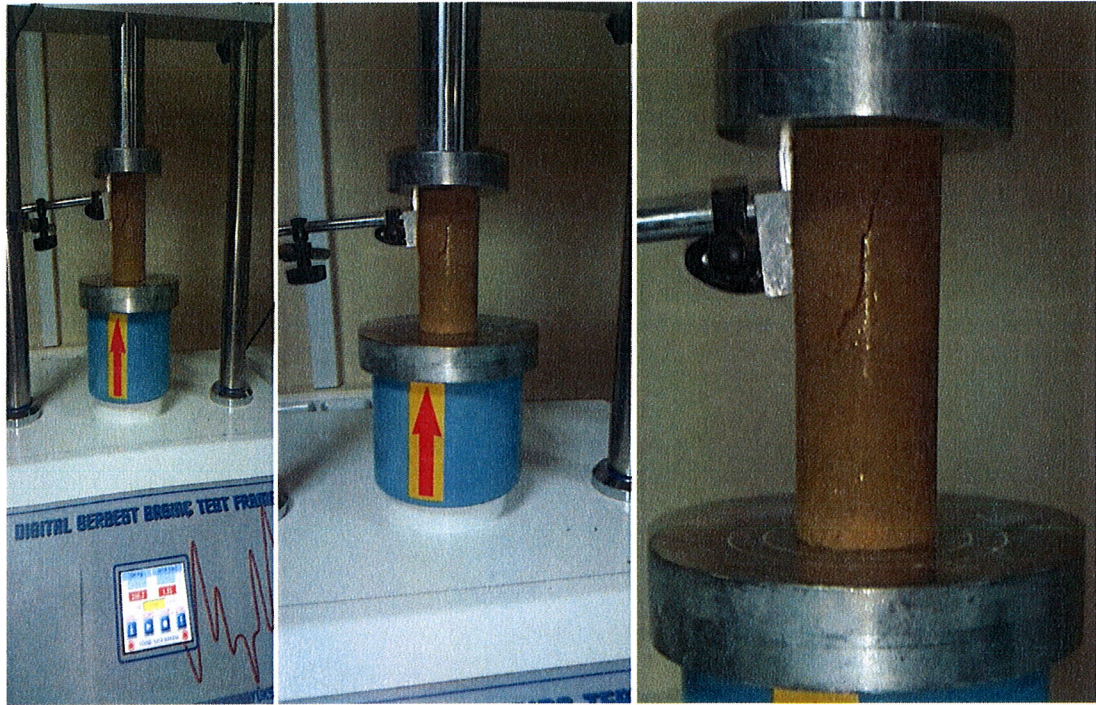
Şekil 4.12 Deney numunelerine desikatör içerisinde kür uygulanması

Deney numuneleri hazırlama işlemleri öncelikle zemine belirlenen notasyonlara göre katkıların katılarak 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğindeki kalıplarda sıkıştırılmış numuneler çıkarıcı yardımıyla çıkarılarak yapılmıştır. Şekil 4.13'te deney numunelerinin hazırlanış aşamaları verilmiştir.



Şekil 4.13 Deney numunelerinin hazırlanış

Kıvam ve kompaksiyon parametreleri belirlenmiş olan numunelerin dayanım parametrelerini belirlemek için ilgili standartlarda uygun bir biçimde hazırlanan numunelere 7 gün, 28 gün ve 84 günlük kür sonrasında tek eksenli basınç dayanımı testi yapılmıştır. Şekil 4.14'te tek eksenli basınç dayanımı testinin düzeneği verilmiştir.



Şekil 4.14 Tek eksenli serbest basınç dayanımı testi

Tek eksenli basınç dayanımı deneylerine öncelikle zemin numunesi ile başlanmıştır. Tüm deneyler boyunca doğal zemine %6 kireç (optimum kireç oranı) ile farklı incelikte bulunan perlit %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranı katılmasıyla numuneler hazırlanmıştır.

Çalık (2012) tarafından yapılan çalışmada perlitin kireçsiz olarak doğrudan zemine katılmasıyla hazırlanan karışımların artan perlit oranı ve zamana bağlı serbest basınç dayanımı yapılmıştır. Tüm kireçsiz numunelerin dayanım değerlerinde, doğal zemine %10 perlit ilave edilen karışımı hariç düşüşler meydana geldiği belirlenmiştir. Bu yüzden çalışma kapsamında kireçsiz numune hazırlanmamıştır.

Çizelge 4.4'te SLP1 karışımlarına ait 7, 28 ve 84 günlük kür sonrasındaki tek eksenli serbest basınç dayanımı değerlerinin çizelgesi verilmiştir. Çizelge 4.5'te SLP2 karışımlarına ait 7, 28 ve 84 günlük kürden sonraki tek eksenli serbest basınç dayanımı verileri verilmektedir.

Çizelge 4.4 SLP1 karışımlarına ait tek eksenli basınç dayanımı sonuçları

Numune	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kPa)		
	Kür Süresi		
	7. gün	28. gün	84. gün
S	144,6	148,3	149,1
SL	895,4	1515,3	1742,3
SLP1/5	897,4	1604,6	2366,3
SLP1/10	910,7	1823,9	2610,7
SLP1/15	1028,6	1960,9	2796,0
SLP1/20	1044,0	2690,5	3196,0
SLP1/25	1097,4	2459,2	2889,5
SLP1/30	1127,5	2329,9	2790,8

Çizelge 4.5 SLP2 karışımlarına ait tek eksenli basınç dayanımı sonuçları

Numune	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kPa)		
	Kür Süresi		
	7. gün	28. gün	84. gün
S	144,6	148,3	149,1
SL	895,4	1515,3	1742,3
SLP2/5	923,0	1891,1	2652,8
SLP2/10	1056,1	2915,8	3324,4
SLP2/15	1301,0	2964,3	3408,9
SLP2/20	1184,0	2734,0	3215,0
SLP2/25	1147,9	2503,6	2933,9
SLP2/30	1138,7	2351,0	2812,5

Tek eksenli serbest basınç dayanımı verilerini içeren çizelgeler incelendiğinde doğal zemine %6 kireç oranı ilave edilerek elde edilen SL karışımının zemin numunesine göre tek eksenli serbest basınç dayanımı değerlerinde artış meydana gelmiştir. Düşük plastisiteli kil olan doğal zeminin 84 günlük kür sonundaki tek eksenli serbest basınç dayanımı verileri, doğal zemine %6 kireç katılmasıyla yaklaşık 12 kat artış göstermiştir. Bu sonuca bakılarak ince daneli zeminlerde kireç stabilizasyonun yararlı sonuçlar verebildiği görülmektedir. SL, SLP1 ve SLP2 karışımları ile hazırlanan numunelerdeki tek eksenli basınç dayanımı deneylerindeki kırılma davranışlarına bakıldığında kırılma şekilleri gevrek bir şekilde olmuştur.

Zemine optimum kireç oranı ve doğal perlitin belirlenen oranlarda katılmasıyla hazırlanan SLP1 karışımlarının numunelerdeki 7. gün sonrasındaki tek eksenli serbest basınç dayanımı değerlerinde SL karışımına göre daha iyi sonuçlar meydana geldiği görülmüştür. Bu karışımlarla hazırlanan numunelerde 7. gündeki tek eksenli basınç dayanımı sonuçlarının artan perlit oranlarında dayanımın da arttığı görülmektedir. SLP2 karışımlarıyla hazırlanan deney numunelerinde 7. günlük tek eksenli basınç dayanım sonuçları doğal zemine kireç ilave edilmiş olan SL karışımına göre iyi sonuçlar vermiştir. Arttırılan perlit oranlarında %15 oranına kadar ilave edilen perlitte dayanımda artış olurken perlit oranının daha fazla arttırılması tek eksenli basınç dayanımı değerlerinde düşüş meydana getirmiştir.

Doğal perlitin kullanıldığı SLP1 karışımlarına ait tek eksenli serbest basınç dayanımı deneylerinde 28. gün kür sonrasındaki verilere bakılarak artan kür süresinin dayanım değerleri üzerinde olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. SLP1 karışımlarında 28 günlük kürün ardından yapılan tek eksenli serbest basınç dayanımı değerlerinde SLP1/20 karışımlarının, SL karışımlarına göre %77 oranında artış meydana gelmiştir. 28. gündeki tek eksenli serbest basınç dayanımı deneylerinde SLP1 karışımlarıyla hazırlanan tüm numunelerin %20 oranındaki doğal perlitli numunelerine kadar dayanım değerleri artarken perlit oranının arttırılmasıyla dayanımlarda düşüşler görülmüştür.

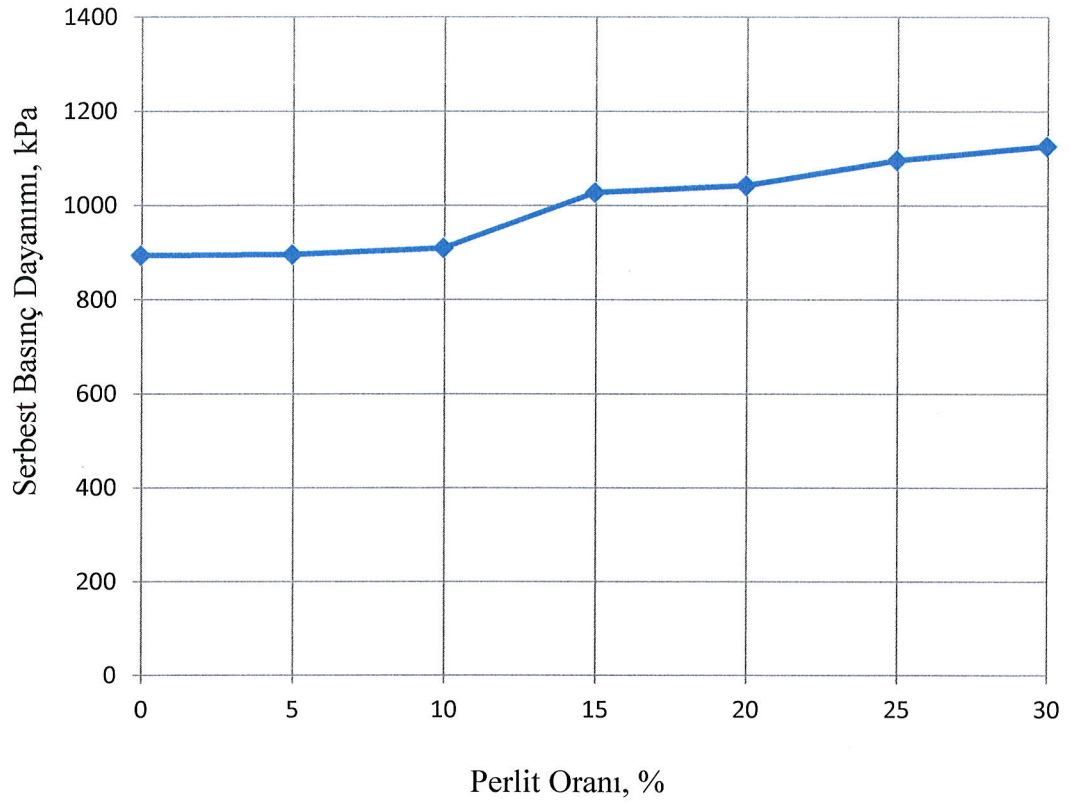
200 nolu elek altı (elek açıklığı 0,075 mm) perlitin kullanılmasıyla hazırlanmış SLP2 karışımlarının tek eksenli serbest basınç dayanımı deneylerinin 28. gün sonrasındaki verilerinde en yüksek dayanım %15 oranındaki perlitte hazırlanan SLP2/15

karışımlarına ait numunelerde meydana gelmiştir. SLP2/15 karışımlarının tek eksenli serbest basınç dayanımlarında sadece kireç bulunan SL karışımlarına göre %95 oranında artış meydana gelmiştir. Artan oranlarda dayanımların artmasına rağmen, %15 oranındaki elek açıklığı 0,075 mm altı olan perlitli SLP2/15 karışımlarından sonra dayanımlarda düşüşler görülmüştür. Ayrıca 28 günlük kür sonrasında SLP2 karışımlarına ait numunelerdeki dayanım değerleri sadece kireçli numunelere göre daha yüksek dayanım değerleri vermiştir.

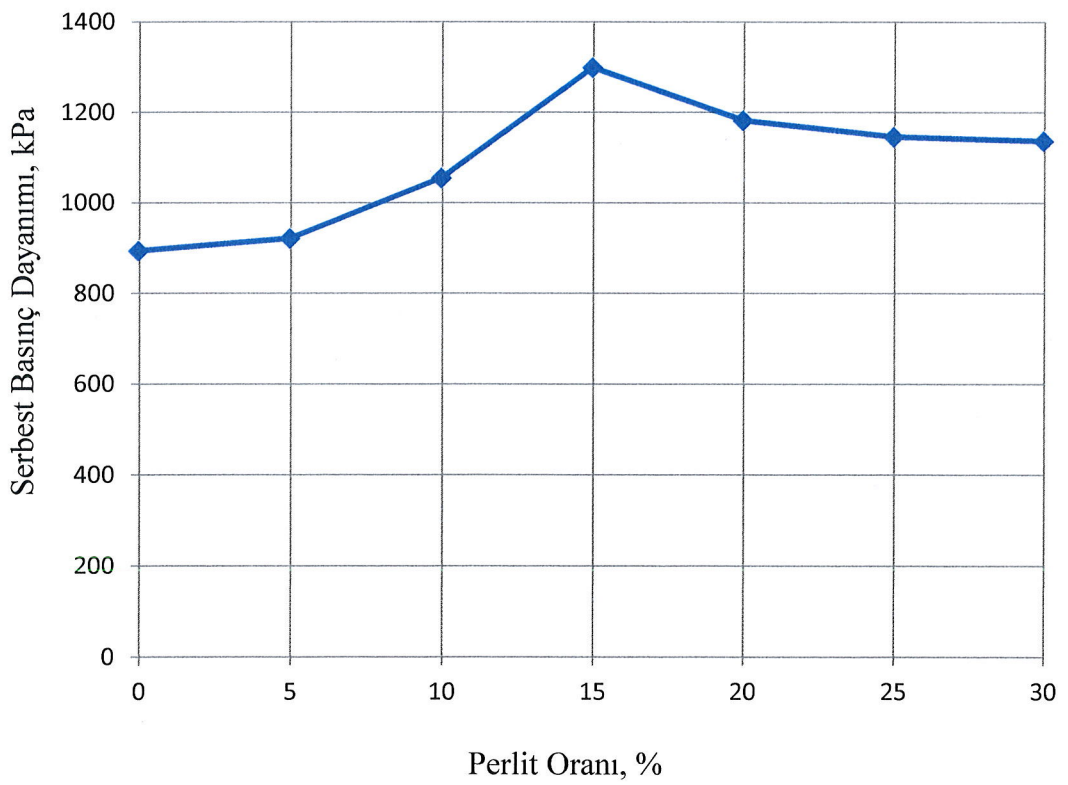
84 günlük kür sonrasındaki tek eksenli serbest basınç dayanımı testi uygulanan ve kırılan numuneler el ile yoğrulabilir kıvamda değildir. Kırılan bu numunelerin sert oldukları görülmüştür. SLP1 karışımlarının 84 günlük kürden sonraki tek eksenli dayanım sonuçlarına bakıldığında en iyi dayanım sonucunun 3196,0 kPa olan SLP1/20 karışımlarından elde edildiği görülmüştür. 200 No'lu elekten geçen perlitte hazırlanan SLP2 karışımlarında 84 günlük kürden sonraki tek eksenli dayanım değerlerinde %10 ve %15 perlit oranında iyi dayanım sonuçları verdiği görülmüştür. Ancak SLP2 karışımlarındaki en iyi ve en yüksek dayanım değeri 3408,9 kPa olan SLP2/15 karışımlarından elde edilmiştir.

Belirtilen kürlerdeki tek eksenli basınç dayanım değerlerinin incelenmesiyle 200 No'lu elekten geçen perlitte hazırlanan SLP2 karışımlarının doğal perlit ile hazırlanan SLP1 karışımlarına göre dayanım değerlerinde çok başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Elek açıklığı 0,075 mm altı olan perlitli numunelerin doğal perlitli numunelerdekilere göre daha az kullanımının daha da iyi sonuçlar ortaya çıkardığı görülmüştür. Bunun nedeninin doğal puzolan olan perlit tanelerindeki inceliğin artırılmasından kaynaklı olduğu tespit edilmiştir.

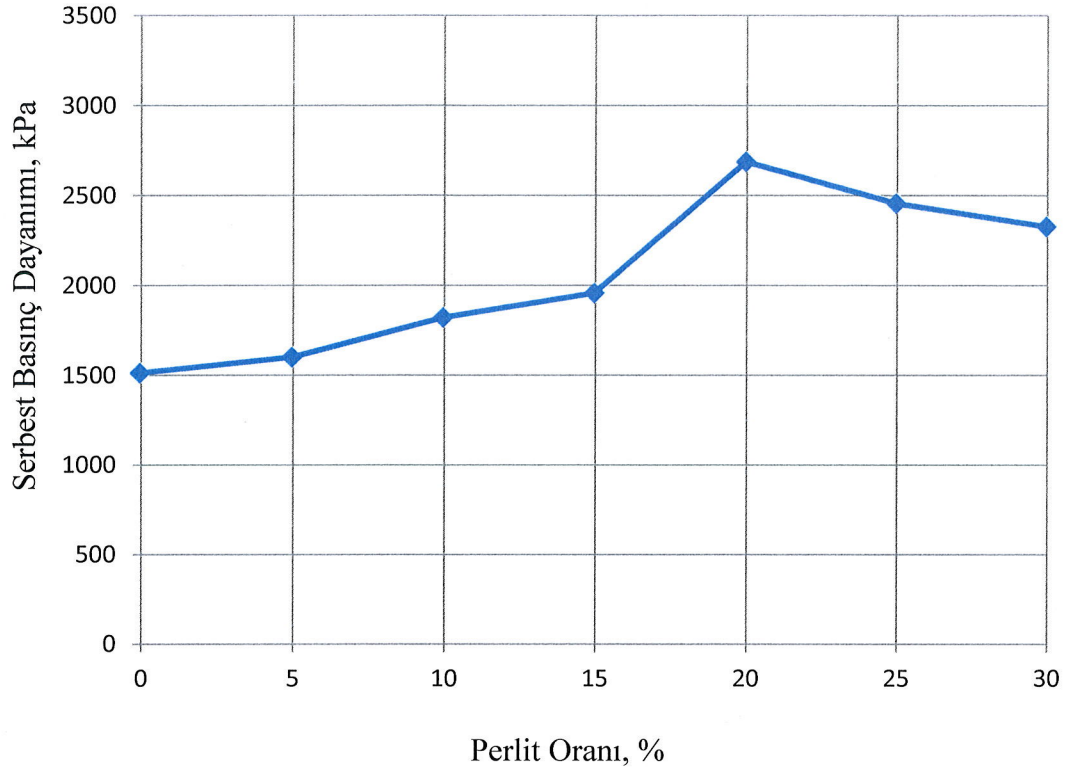
SLP1, SLP2 karışımlarına ait tek eksenli serbest basınç dayanımı 7. gün kür sonrasındaki grafikleri sırasıyla Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilmiştir. 28. günlük kür sonrasındaki SLP1 ve SLP2 karışımlarındaki tek eksenli basınç dayanımı grafikleri sırasıyla Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de verilmiştir. 84 günlük kür sonrasındaki SLP1 ve SLP2 karışımlarındaki tek eksenli basınç dayanımı grafikleri sırasıyla Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de verilmiştir. Bu karışımlara ait 7, 28 ve 84 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımı değerlerinin değişim grafikleri sırasıyla Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te görülmektedir.



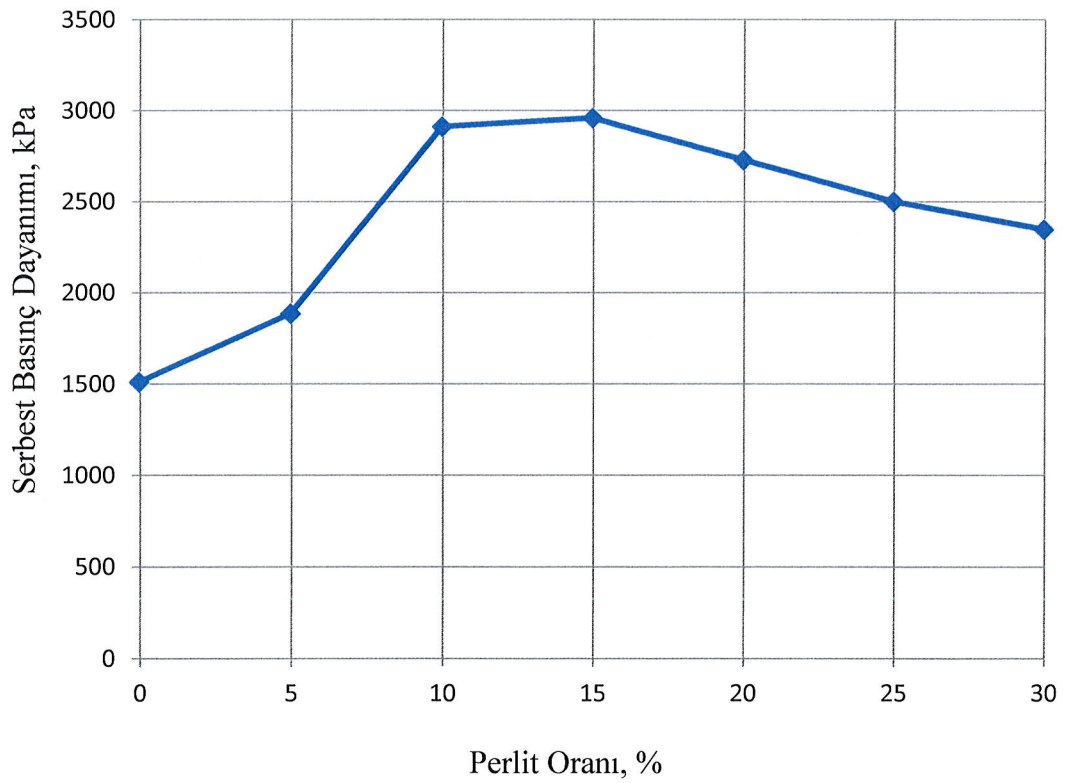
Şekil 4.15 SLP1 karışımlarının 7 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları



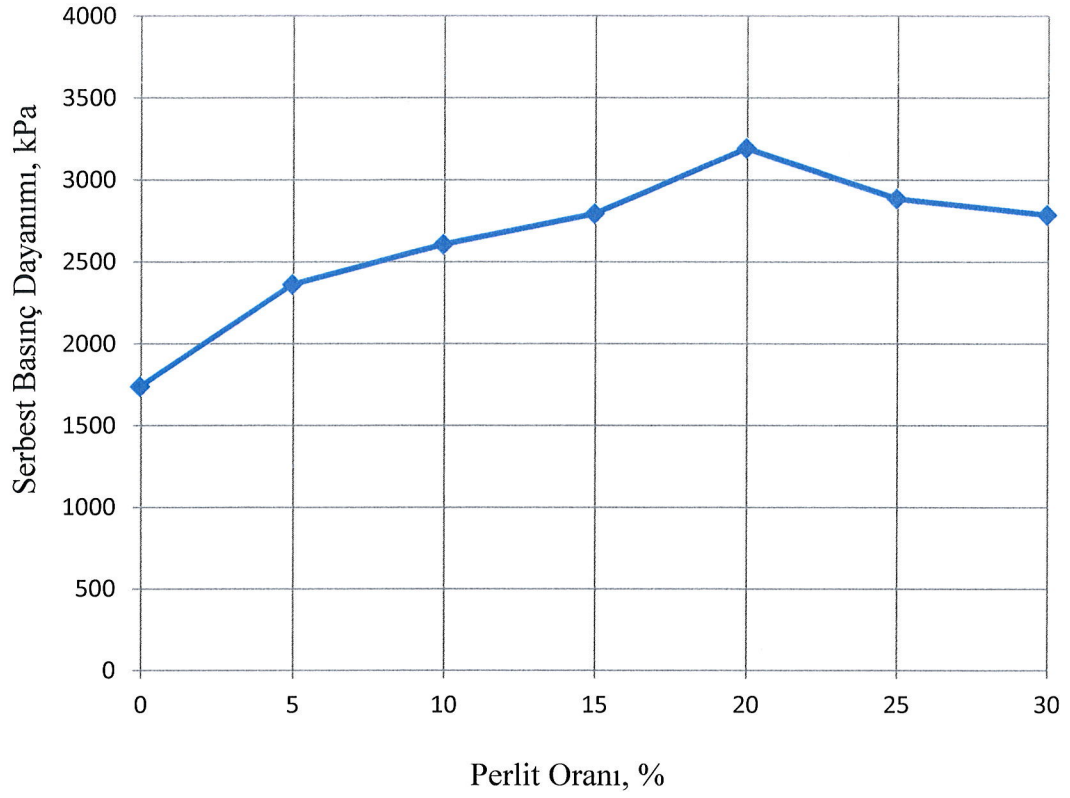
Şekil 4.16 SLP2 karışımlarının 7 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları



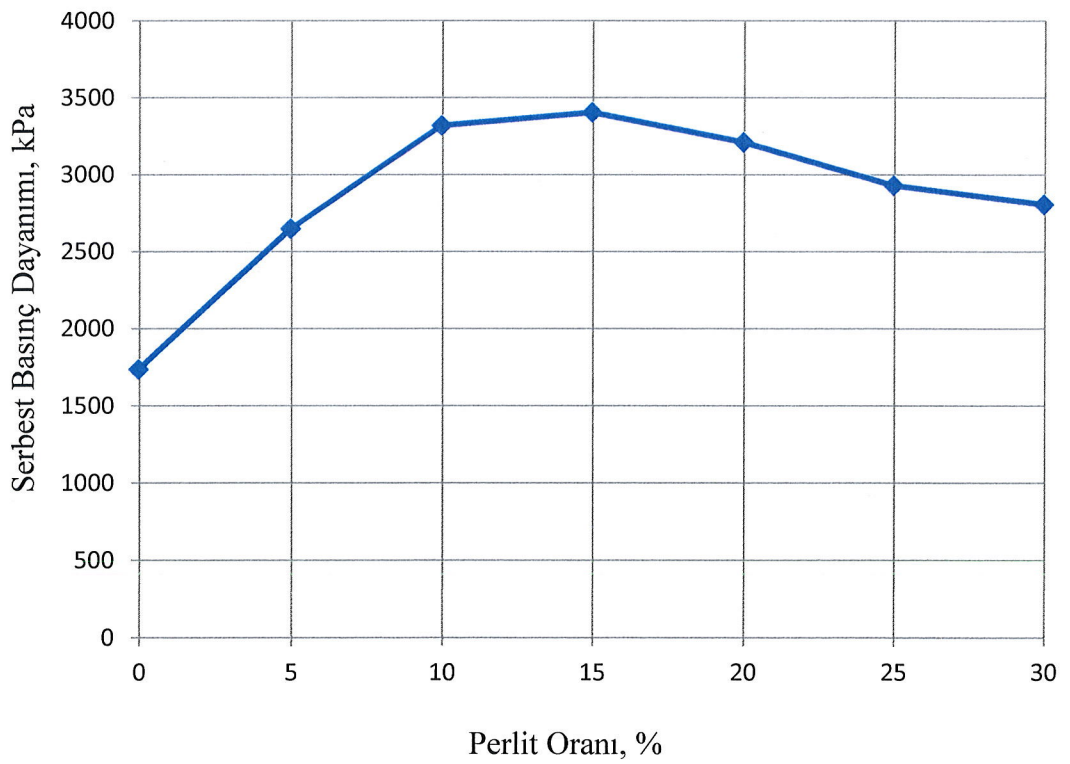
Şekil 4.17 SLP1 karışımlarının 28 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları



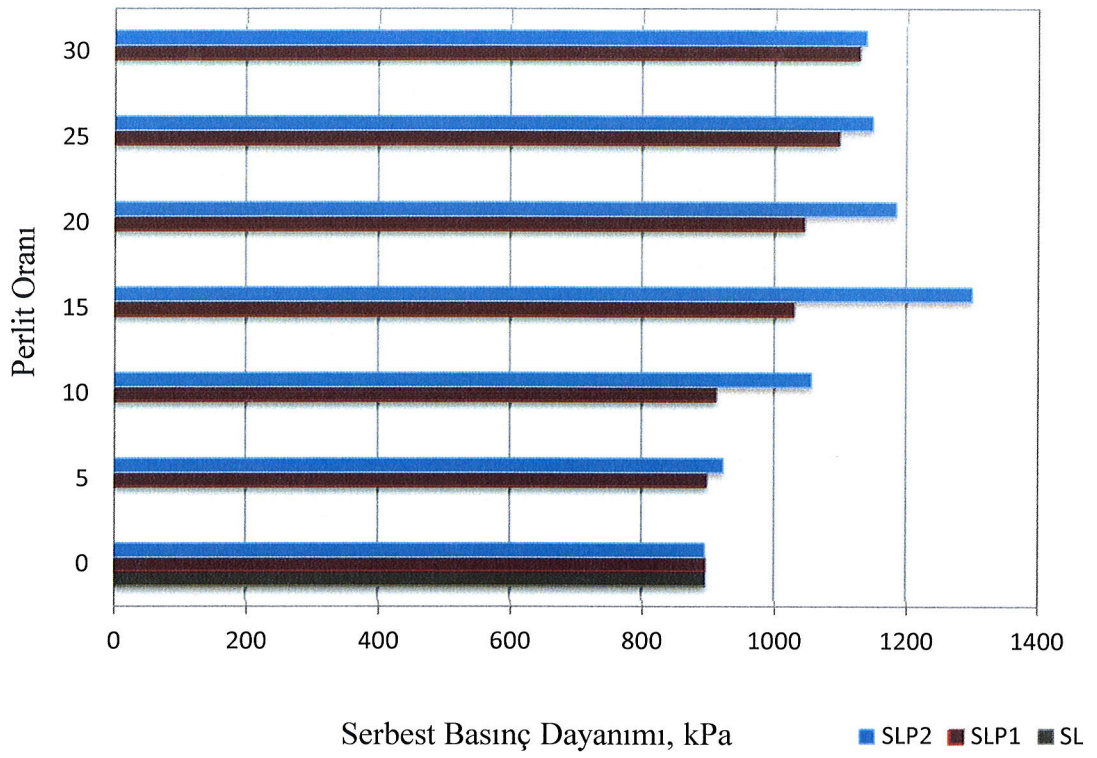
Şekil 4.18 SLP2 karışımlarının 28 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları



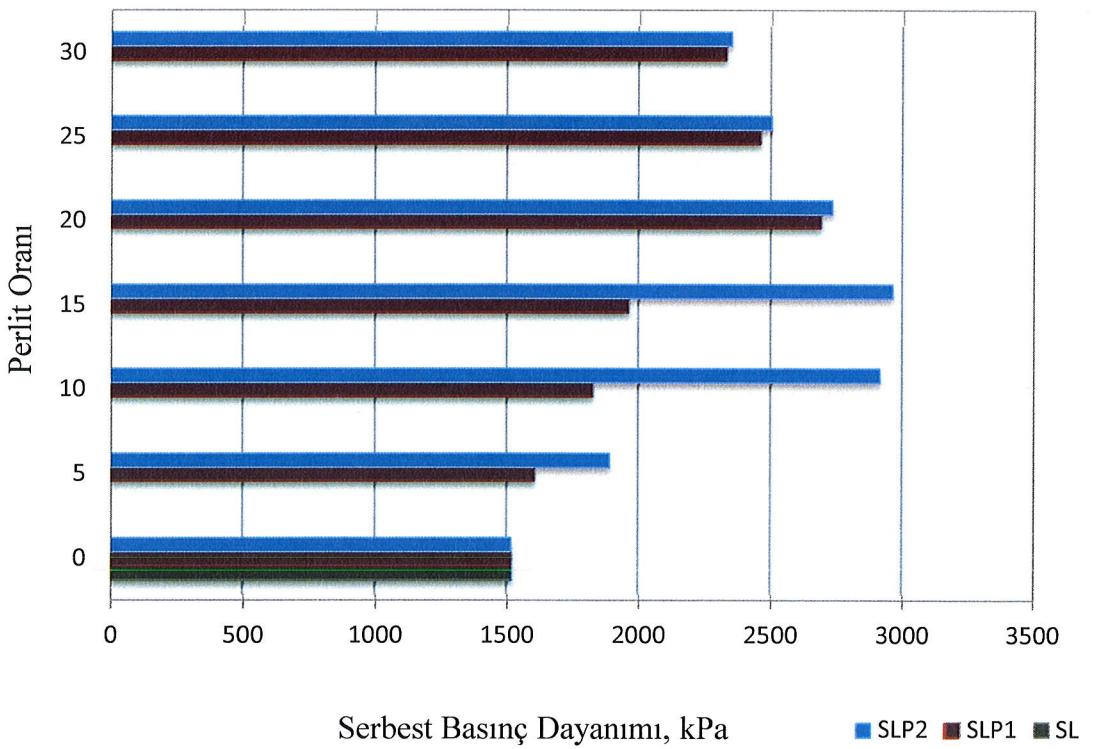
Şekil 4.19 SLP1 karışımlarının 84 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları



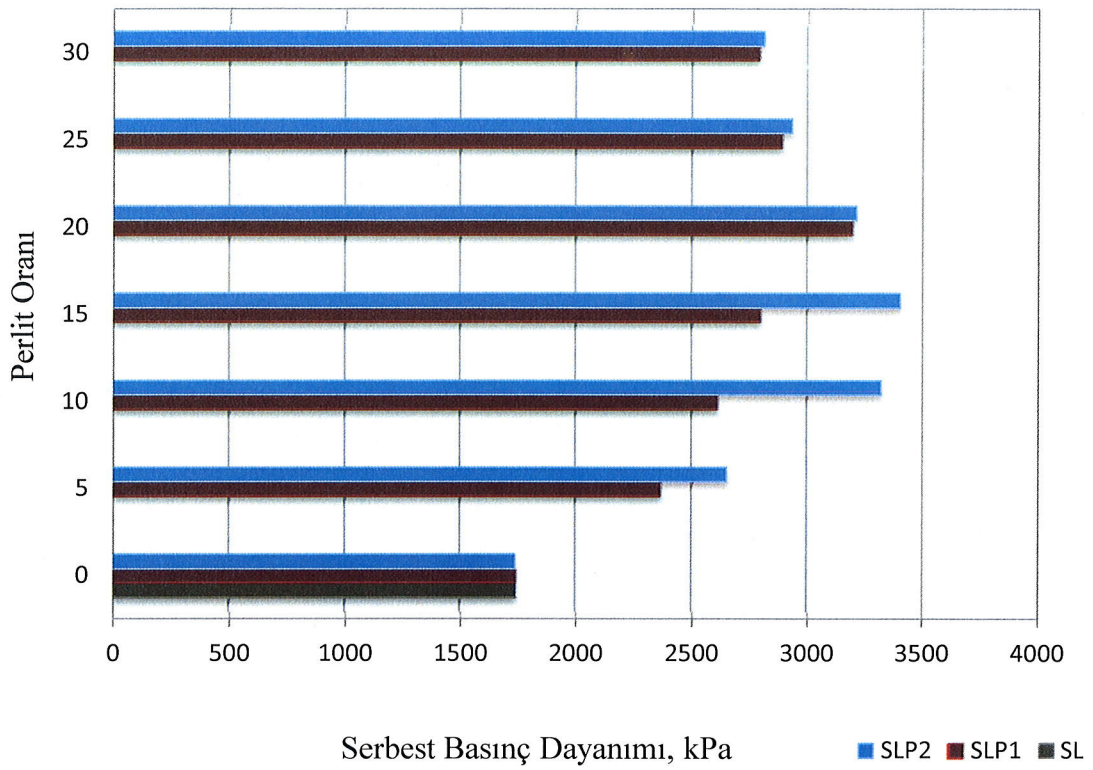
Şekil 4.20 SLP2 karışımlarının 84 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları



Şekil 4.21 Kireçli karışımların serbest basınç dayanımı değerlerinin değişimi(7.gün)



Şekil 4.22 Kireçli karışımların serbest basınç dayanım değerleri değişimi(28.gün)



Şekil 4.23 Kireçli karışımların serbest basınç dayanım değerleri değişimi(84.gün)

4.1.4. Durabilite Tetkikleri

Yüksek lisans tez çalışması için hazırlanan karışımların değişen çevre koşullarında ortaya çıkardığı dayanım davranışlarını belirlemek son derece önemlidir. Bu amaçla, hazırlanan deney numunelerine ASTM D 559'a (2003) göre ıslanma-kuruma periyodu ve ASTM D 560 (1996) standardına göre donma-çözülme çevrimi uygulanmıştır.

4.1.4.1. Islanma-Kuruma Periyodu

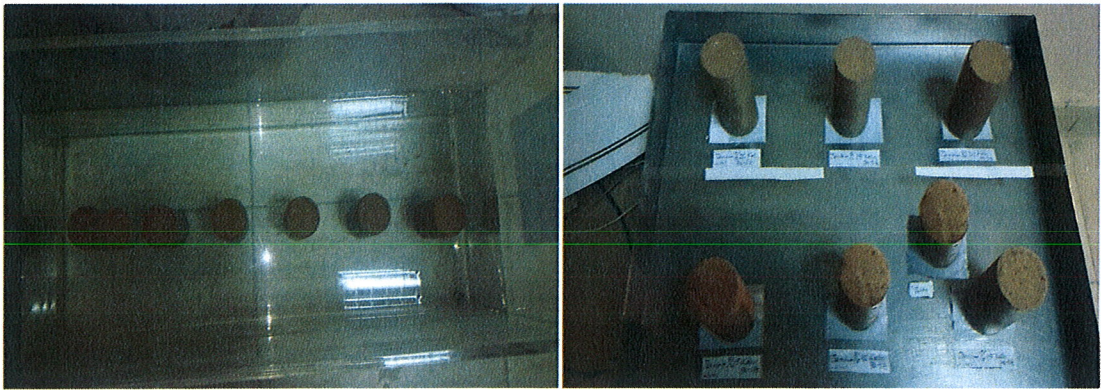
Kireç, çimento, puzolan-kireç ve puzolan-çimento-kireç birleşimleri gibi katkı maddeleri ile yapılan stabilizasyon çalışmalarında sağlanması gereken durabilite kriterleri Çizelge 2.6'da verilmişti. Durabilite kriterine bakılması için Şekil 4.24'te verilen çapı 50 mm, yüksekliği 100 mm olan silindirik deney numuneleri

hazırlanmıştır. Bu deney için 14 tane numune hazırlanmıştır. Hacimsel stabiliteyi esas alan durabilite tetkiki için ıslanma-kuruma periyodu yapılmıştır.

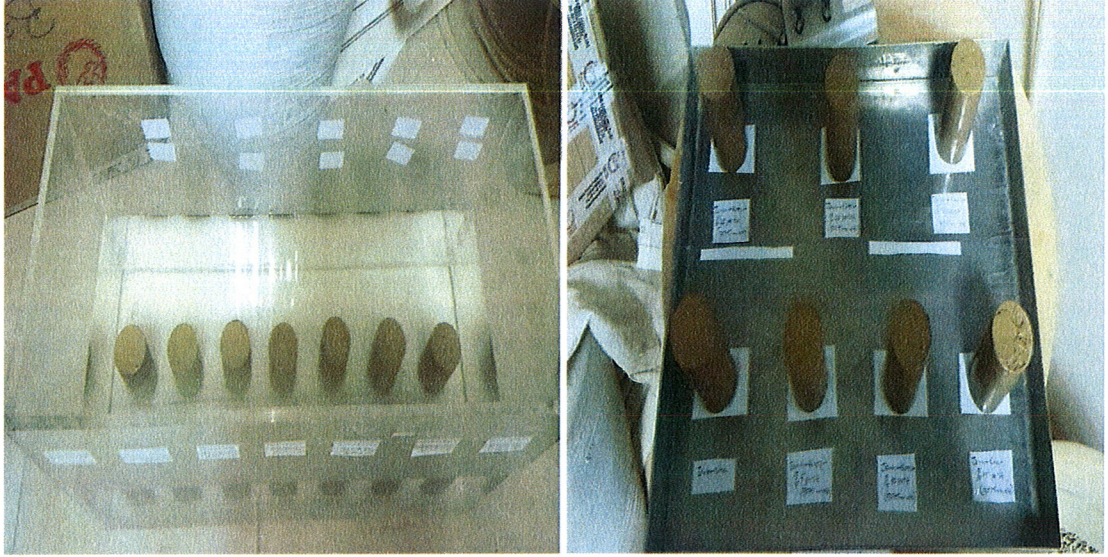


Şekil 4.24 Islanma-kuruma periyodu için hazırlanan deney numuneleri

Islanma-kuruma periyodu için hazırlanan deney numuneleri önce desikatörün içinde 28 gün süre ile kür edilmişlerdir. Kür sürecinden sonra deney numuneleri Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'daki gibi ASTM D 559'a (2003) göre gerçekleştirilen 12 adet ıslanma-kuruma periyoduna tabi tutulmuşlardır.

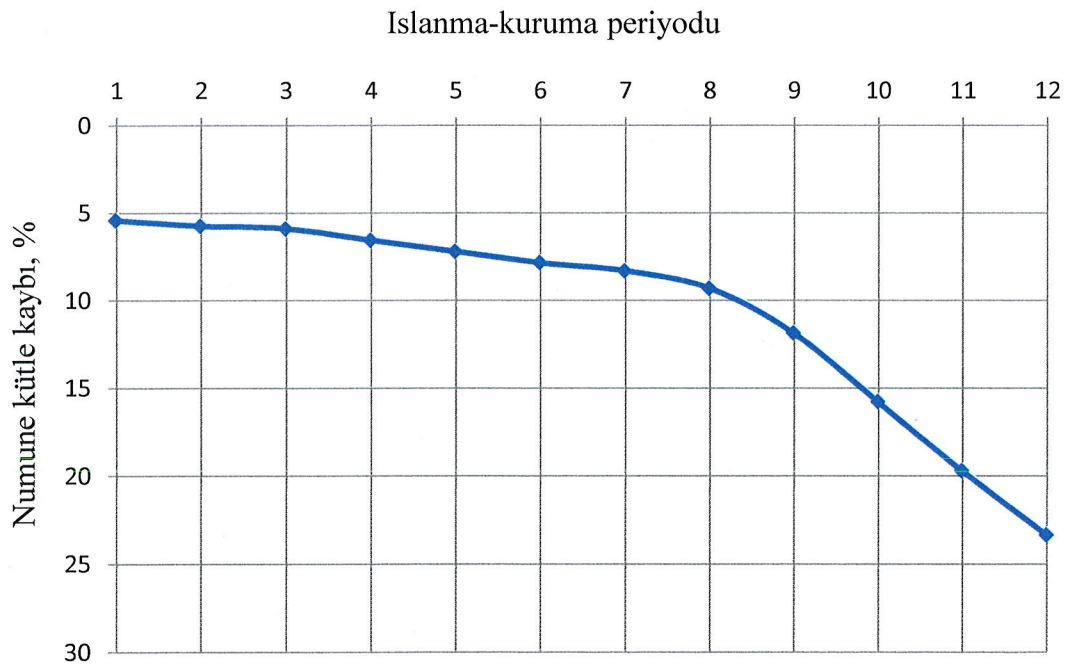


Şekil 4.25 S ve SLP1 numunelerinin 12 adet ıslanma-kuruma periyodundan birine ait görüntü

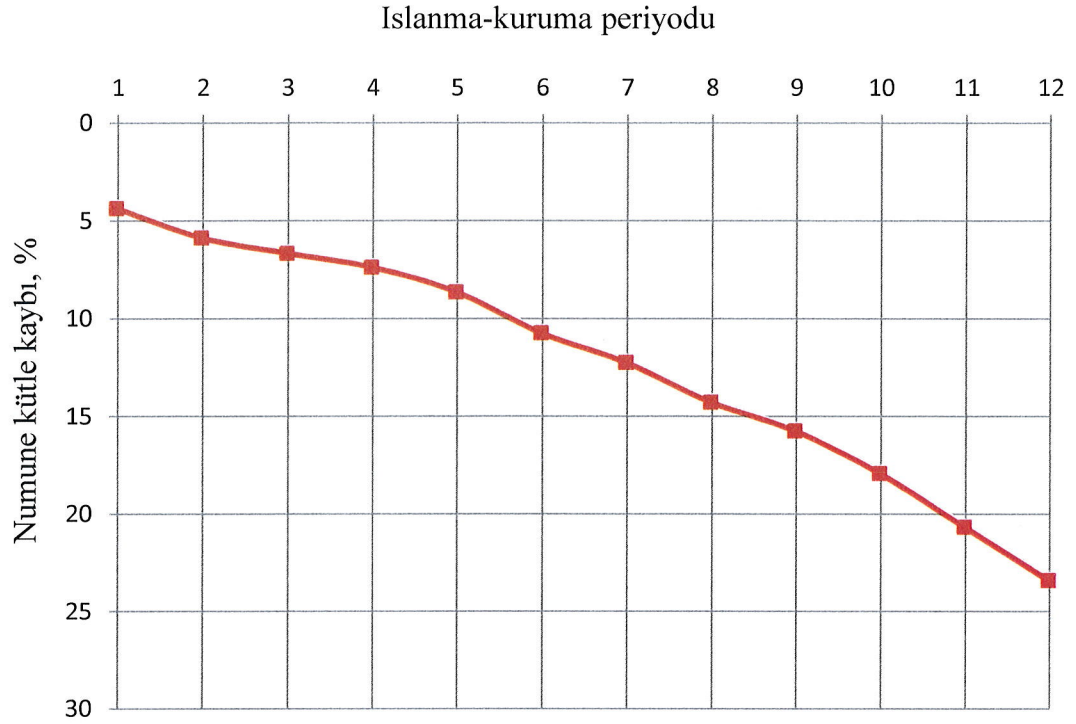


Şekil 4.26 SL ve SLP2 numunelerinin 12 adet ıslanma-kuruma periyodundan birine ait görüntü

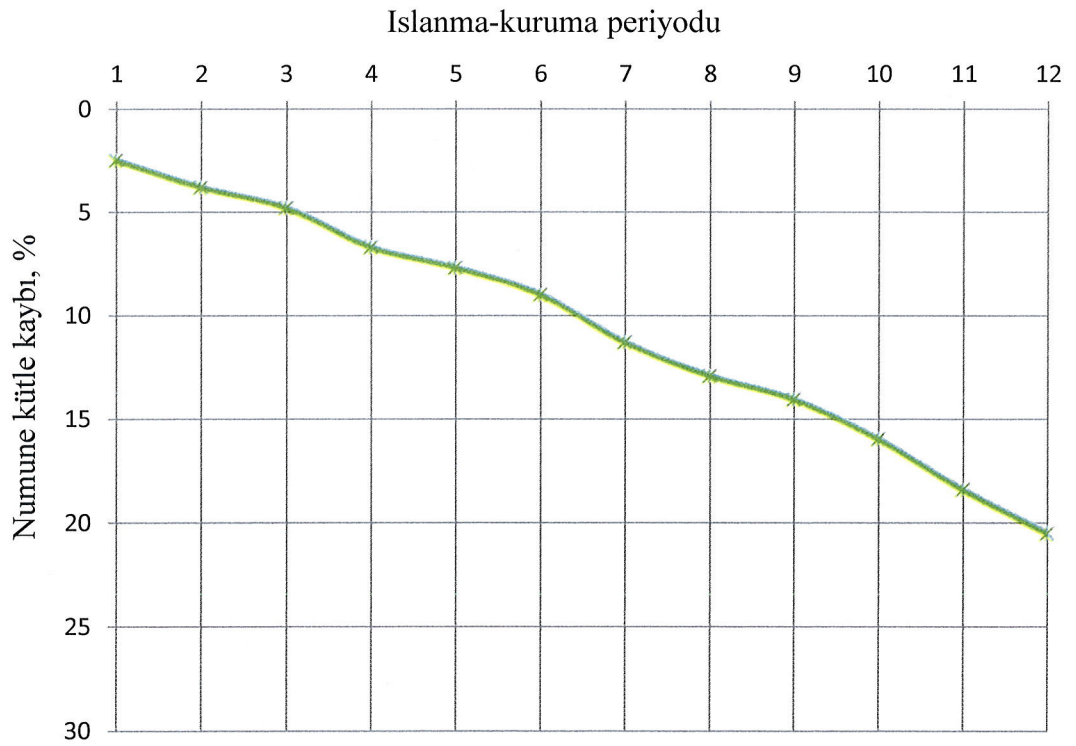
Bu sürecin sonunda S numunesi 2. günde hacimsel bütünlüğünü koruyamayıp dağılmıştır. SL ve SLP1 karışımlarının Şekil 4.27, Şekil 4.28, Şekil 4.29, Şekil 4.30, Şekil 4.31, Şekil 4.32, Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'te verildiği kütle kaybı eğrileri sunulmuştur.



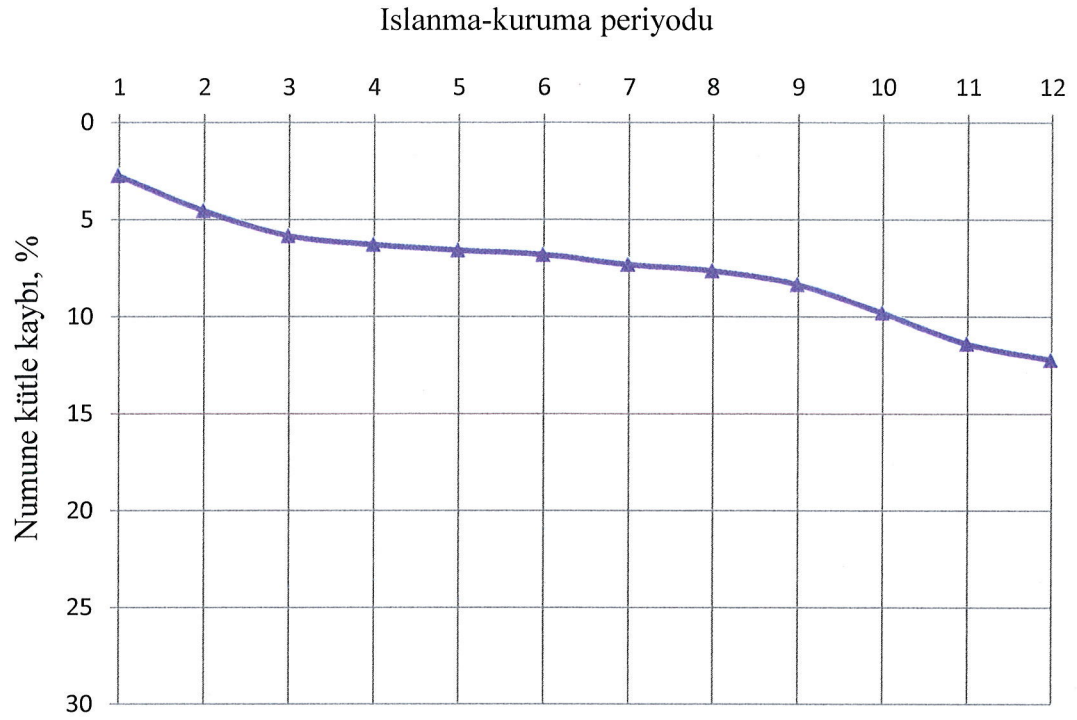
Şekil 4.27 SL karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi



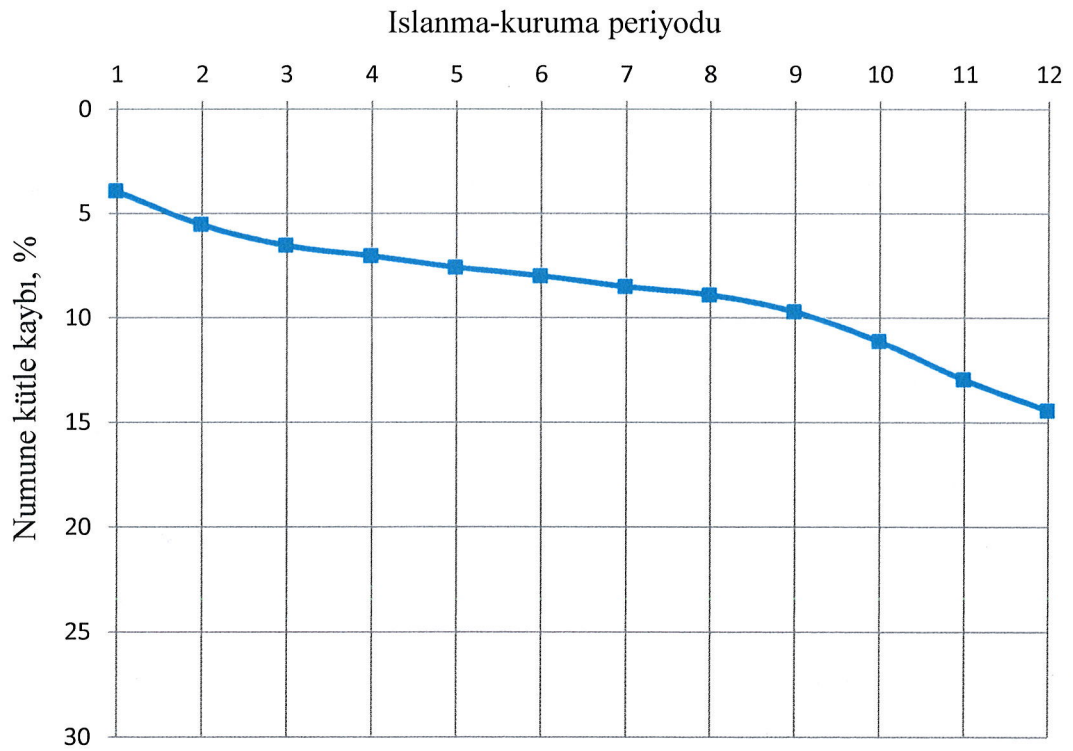
Şekil 4.28 SLP1/5 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi



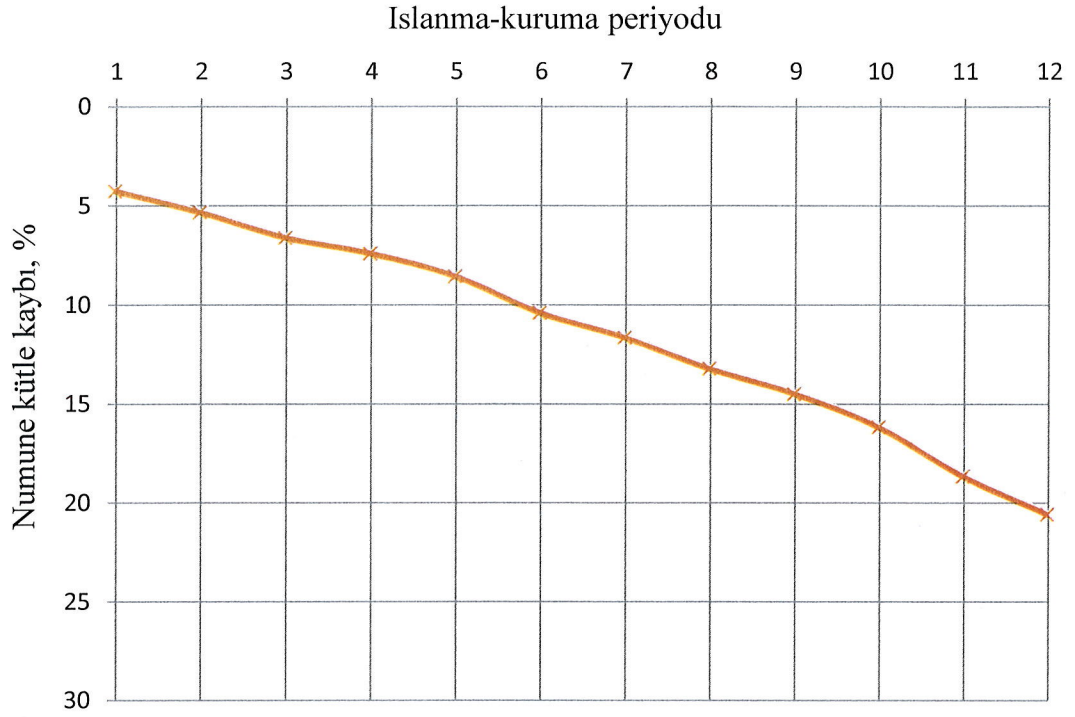
Şekil 4.29 SLP1/10 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi



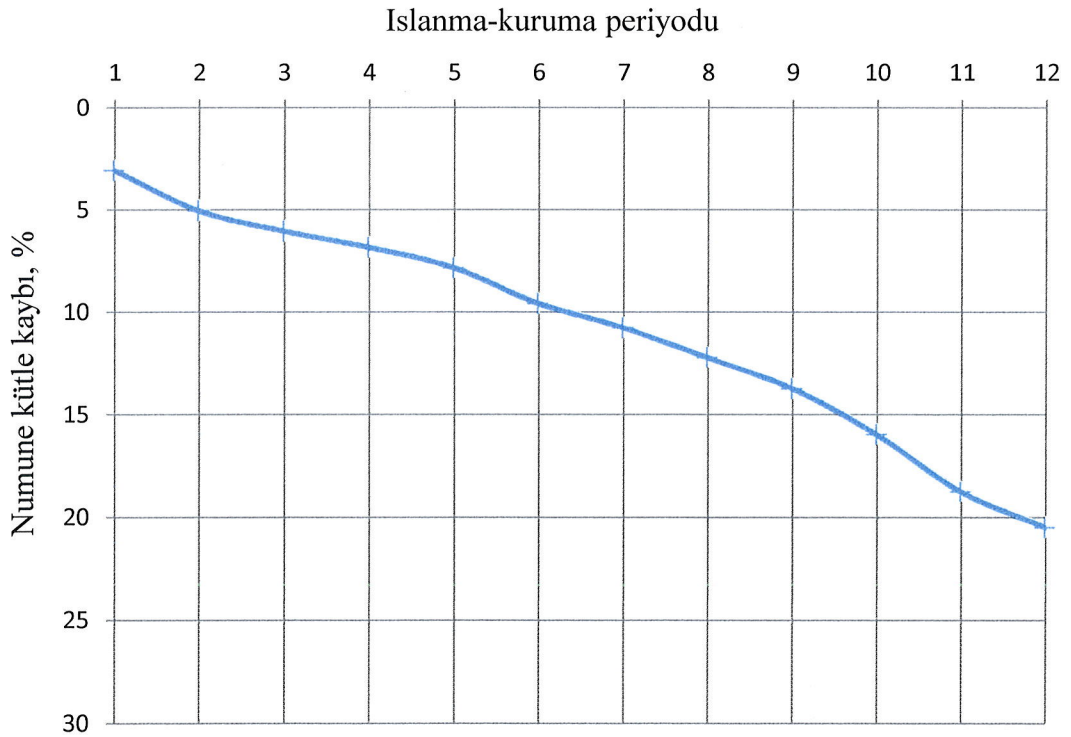
Şekil 4.30 SLP1/15 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi



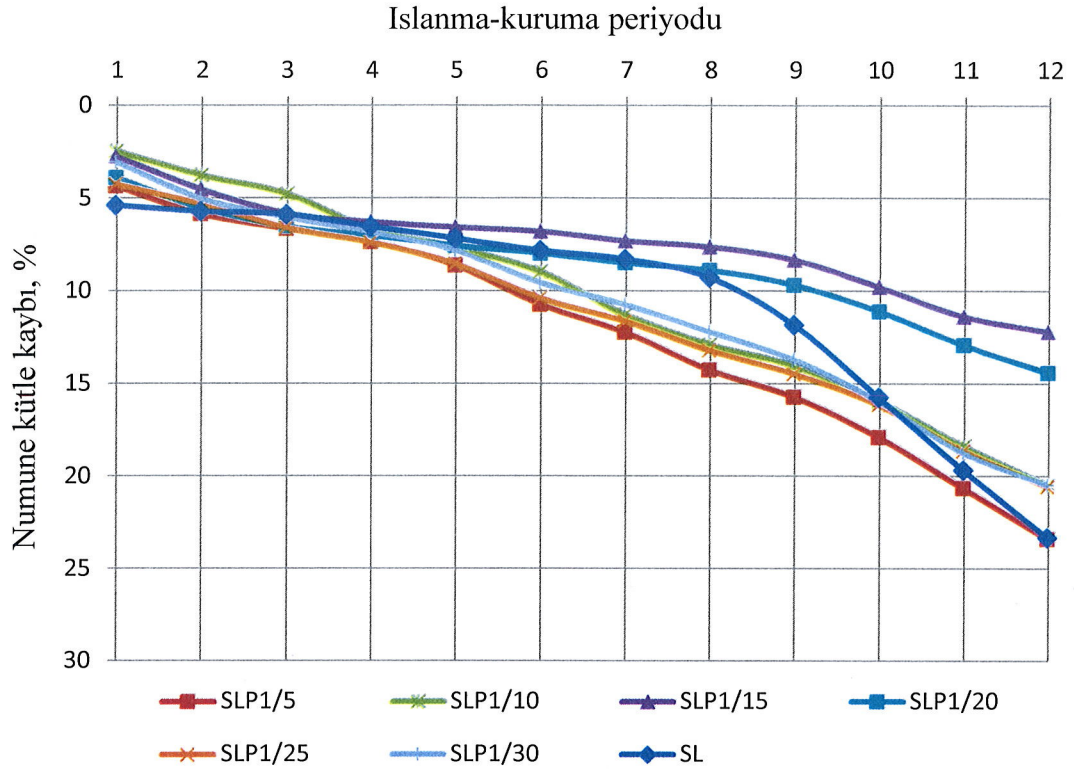
Şekil 4.31 SLP1/20 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi



Şekil 4.32 SLP1/25 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi



Şekil 4.33 SLP1/30 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi



Şekil 4.34 SL ve SLP1 karışımlarının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi

Çizelge 2.6'a göre killi zeminlerin katkılı numunelerindeki durabilite şartlarının 12 kez ıslanma-kuruma periyodu sonunda numune ağırlığında izin verilen maksimum kayıp olarak %6-14'ü sağlaması gerekir. Bu durabilite kriterlerine bakılarak numunelerin ıslanma-kuruma periyodu deneyinde nasıl davranış gösterdiği incelenmiştir.

SL, SLP1/10, SLP1/25, SLP1/30 karışımlarından hazırlanan numuneler 9 kere tekrarlanan ıslanma-kuruma periyodu sonunda iyi sonuçlar verirken, daha sonraki periyotlarda numunelerin hacimsel bütünlüğünün bozulmaya başladığı görülmüştür. SLP1/5 karışımı ile hazırlanan numune 12 adet ıslanma-kuruma periyodunda direnç göstermiş fakat bu karışım 8 kere ıslanma-kuruma periyodundan sonra hacimsel bütünlüğü zayıflamaya başlamıştır.

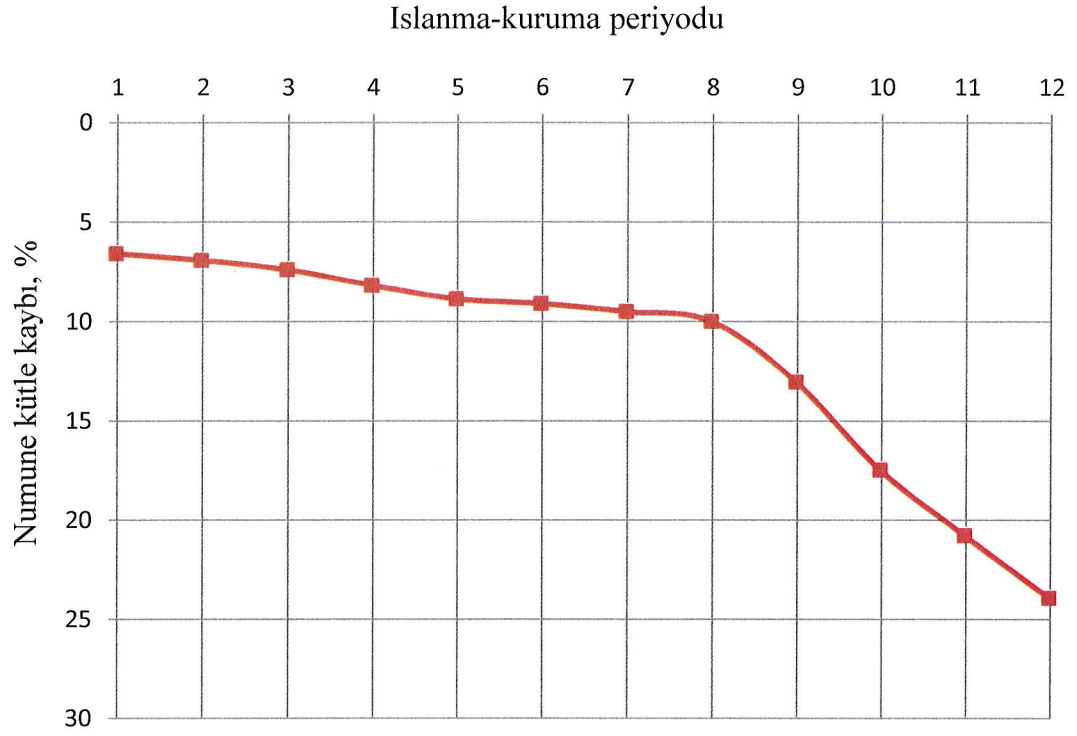
Hazırlanan numunelerden SLP1/15 ve SLP1/20 karışımları Çizelge 2.6'daki gibi 12 kez ıslanma-kuruma periyoduna karşı durabilite şartlarını sağlamıştır. SL ve SLP1

karışımları için 12 kez ıslanma-kuruma periyodu sonundaki halleri Şekil 4.35'te verilmiştir.

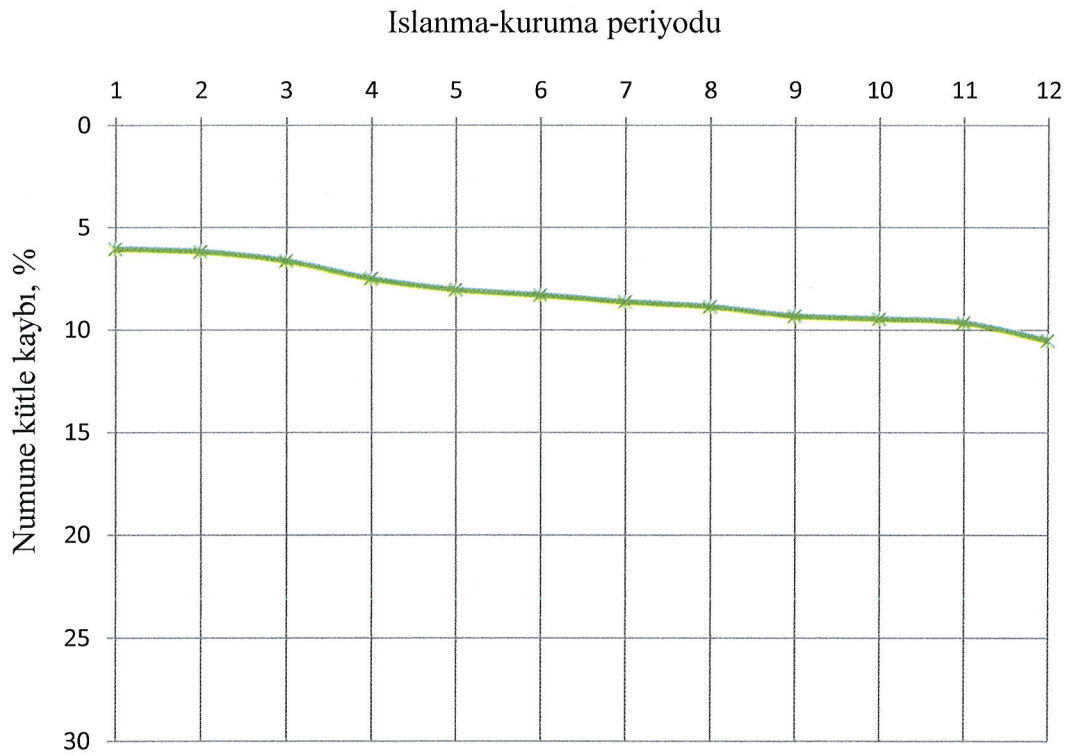


Şekil 4.35 12 kez ıslanma-kurumaya maruz kalmış SL ve SLP1 karışım numunelerinin görüntüleri

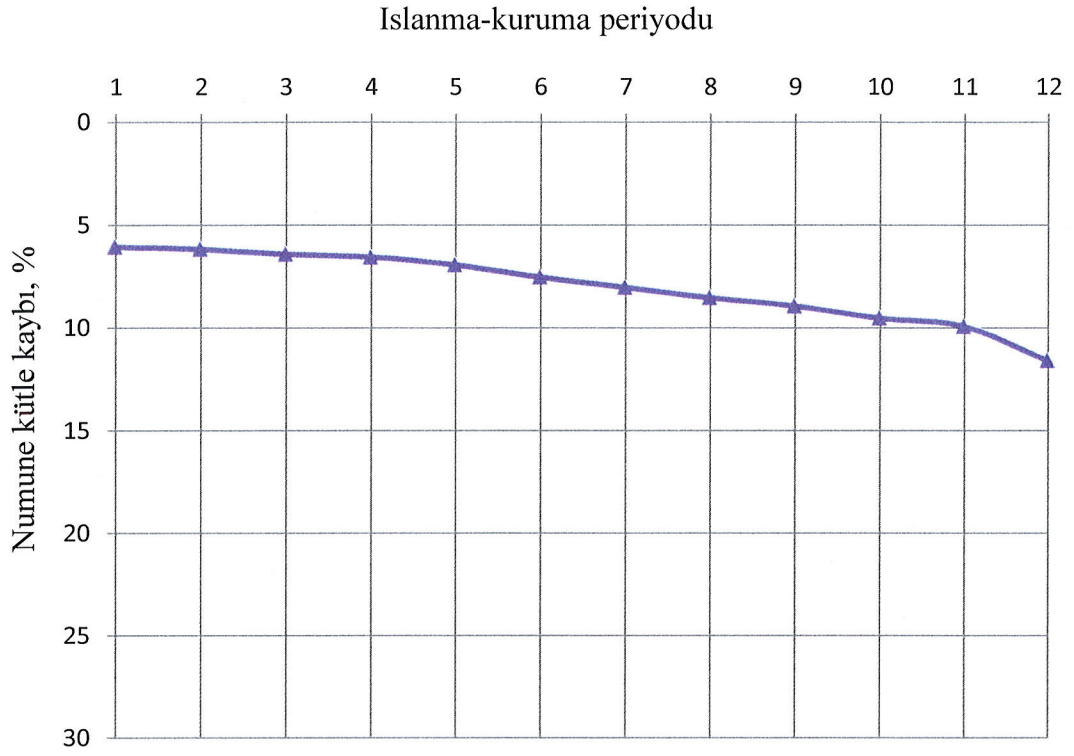
Şekil 4.36, Şekil 4.37, Şekil 4.38, Şekil 4.39, Şekil 4.40, Şekil 4.41 ve Şekil 4.42'de SLP2 karışımlarından hazırlanan numunelere ait kütle kaybı eğrileri verilmiştir.



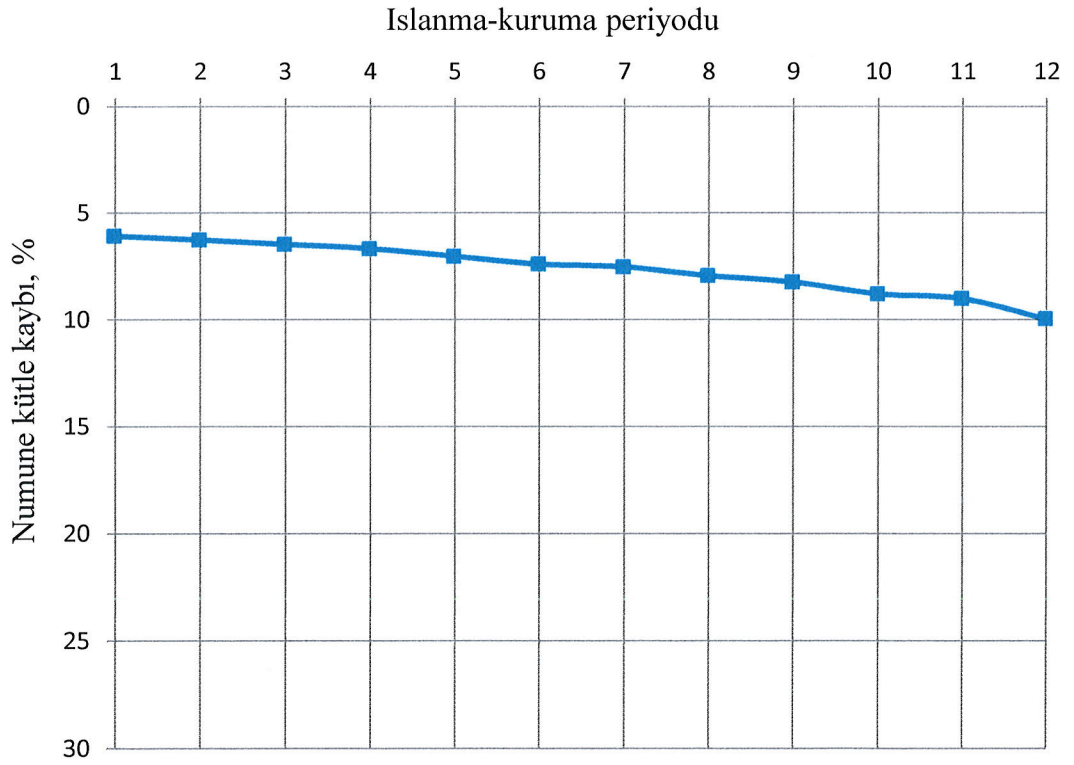
Şekil 4.36 SLP2/5 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi



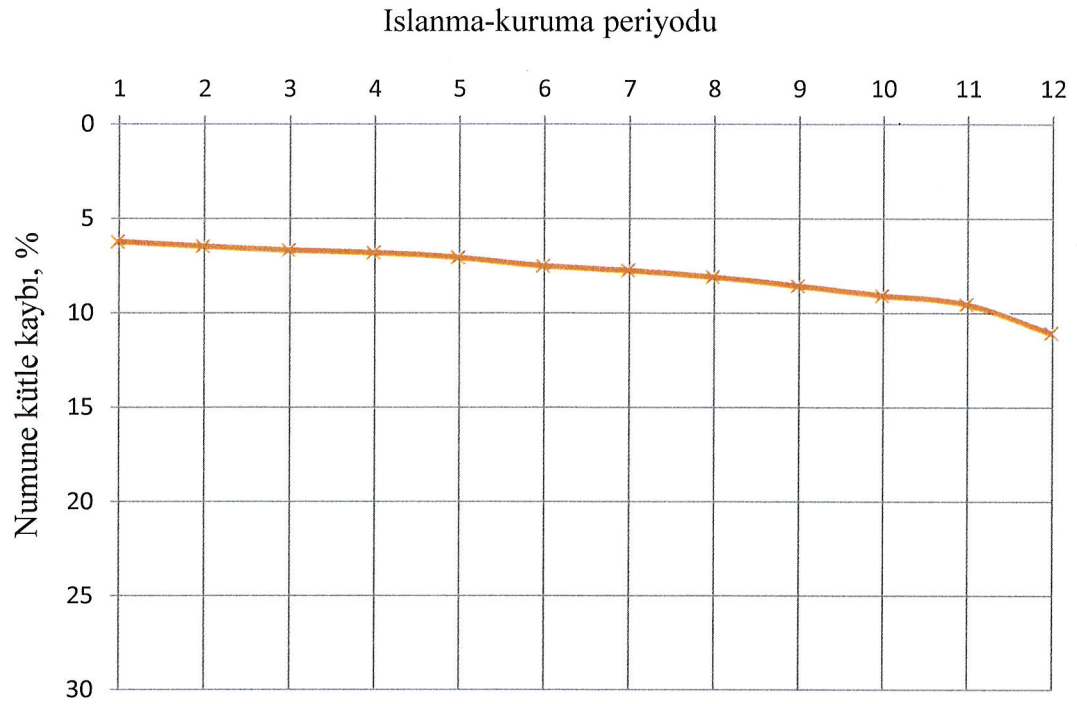
Şekil 4.37 SLP2/10 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi



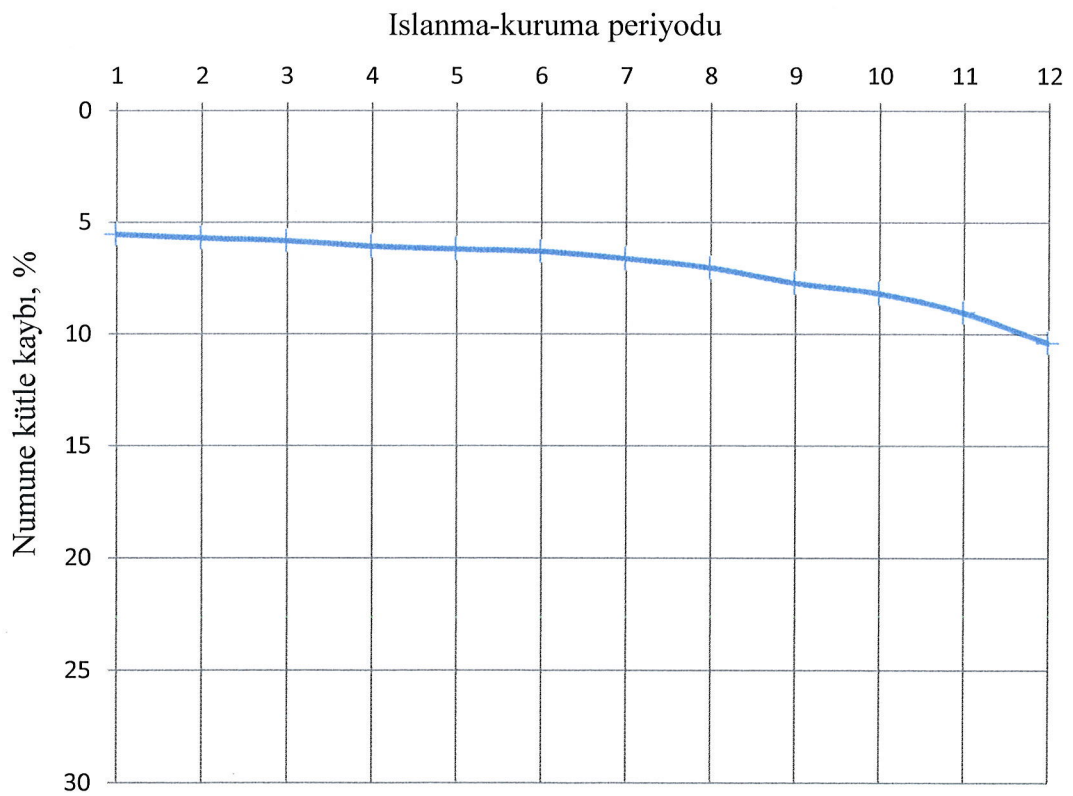
Şekil 4.38 SLP2/15 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi



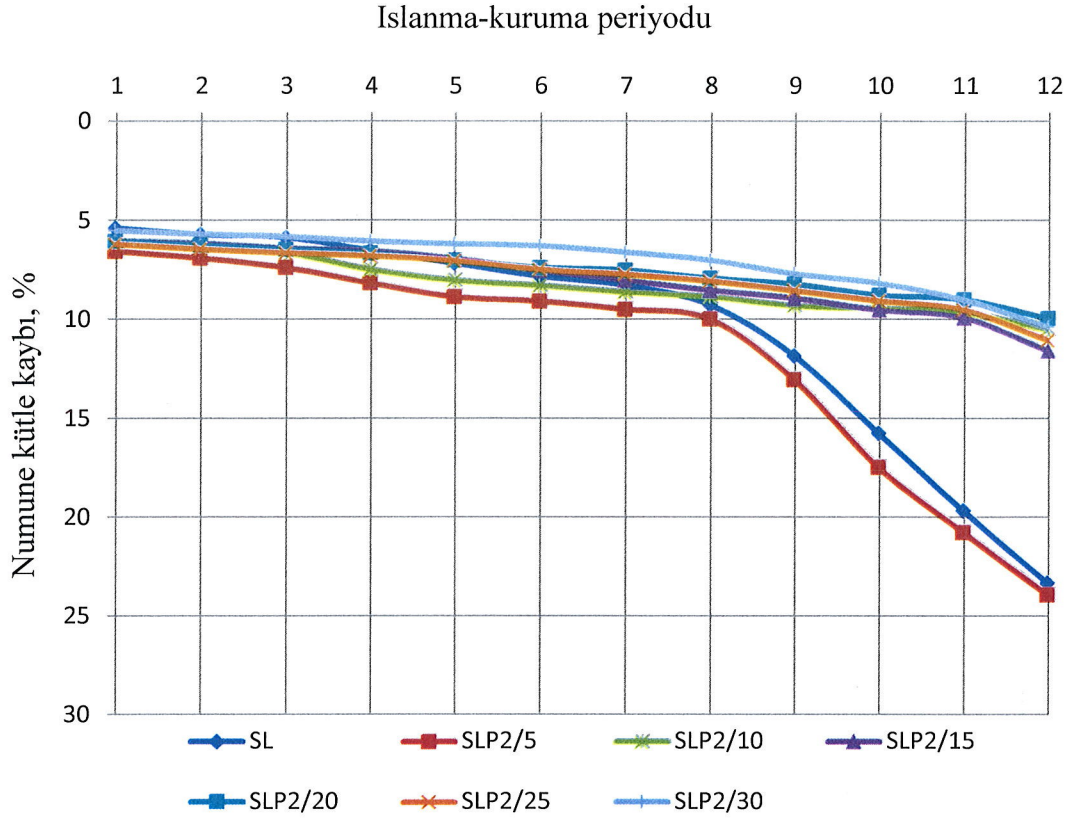
Şekil 4.39 SLP2/20 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi



Şekil 4.40 SLP2/25 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi



Şekil 4.41 SLP2/30 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi



Şekil 4.42 SL ve SLP2 karışımlarının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi

SLP2/5 karışımıyla hazırlanan numune 9 kez ıslanma-kuruma periyodunu bitiminde durabilite kriterlerini sağlasa da 12 kez olan periyodun sonunda hacimsel kütle kaybı gerçekleştiği görülmüştür.

SLP2/10, SLP2/15, SLP2/20, SLP2/25 ve SLP2/30 karışımlarından hazırlanan numuneler 12 kez ıslanma-kuruma periyodu sonrasında hacimsel bütünlüğü koruyarak durabilite kriterlerini sağlamıştır.

SLP2 karışımları için 12 kez ıslanma-kuruma periyodu gerçekleştirilmesi sonrasında numunelerdeki değişiklikler Şekil 4.43'de verilen biçimleri almıştır.



Şekil 4.43 12 kez ıslanma-kuruma sonrasındaki SLP2 karışım numunelerinin görüntüleri

Çapı 50 mm, yüksekliği 100 mm olan S, SL, SLP1 ve SLP2 karışım numunelerinin 12 kez ıslanma-kurumaya maruz kalması sonrasında Çizelge 2.6'daki hacimsel stabiliteyi esas alan kriterler incelendiğinde S ve SL karışım numunelerinin hacimsel bütünlüğü koruyamadığı, SLP1 karışım numunelerinin de pek iyi sonuçlar vermediği, SLP2 karışım numunelerinin ise direnç göstererek başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Serbest basınç dayanımı değerlerinde SLP2/15 en iyi sonucu vermesinin yanı sıra ıslanma-kuruma periyodu sonrasında da bu karışım numunesi durabilite şartlarını sağlayarak perlitin incelik faktörünün etkisinin başarılı sonuçlar ortaya koyduğu görülmüştür.

4.1.4.2. Donma-Çözülme Çevrimi

ASTM D 560 (1996) standardına göre karışımlara 28 gün kür süresinde desikatörde bekletildikten sonra 12 donma-çözülme çevrimi uygulanmıştır. Donma-çözülme çevriminin tamamlanmasının ardından bu karışımların dayanımlarının belirlenmesi için tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Şekil 4.44'te numunelerin donma-çözülme çevrimi ve sonrasındaki tek eksenli basınç dayanımı deneyinden bir görüntü verilmektedir.



Şekil 4.44 Donma-çözülme çevrimi ve tek eksenli basınç dayanımı işlemleri

Tüm deneyler zemine optimum kireç oranında ilave edilen, farklı incelikteki perlitlerin oranları %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranları kullanılarak

numuneler hazırlanmıştır. Bu deney için 39 tane numune hazırlanmıştır. Her biri için üçer numune hazırlanarak işlemler yapılmış olup ortalamaları hesaba katılmıştır

28 gün boyunca desikatörde bekletilen numuneler donma-çözülme kabineye konulmuştur. 12 donma-çözülme çevrimi sonrasında sırasıyla SL, SLP1 ve SLP2 karışımlarına tek eksenli basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Donma-çözülme çevrimi sonrasındaki SLP1 karışımlarına ait serbest basınç dayanımı verileri Çizelge 4.6'da, SLP2 karışımlarına ait serbest basınç dayanımı verileri ise Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.6 SLP1 karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli basınç dayanımı sonuçları

Numune	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kPa)
SL	1230,3
SLP1/5	1359,7
SLP1/10	1699,0
SLP1/15	1770,4
SLP1/20	2617,3
SLP1/25	2275,5
SLP1/30	2160,2

Çizelge 4.7 SLP2 karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli basınç dayanımı sonuçları

Numune	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kPa)
SL	1230,3
SLP2/5	1787,7
SLP2/10	2950,5
SLP2/15	3232,1
SLP2/20	2603,0
SLP2/25	2352,0
SLP2/30	2236,1

Donma-çözülme sonrasındaki dayanım değerleri SL, SLP1 ve SLP2 karışımlarına ait numunelerde incelenmiştir.

SLP1 karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrasında dayanım değerlerinin SL karışımı verilerine göre arttığı görülmektedir. SLP1 karışımlarıyla hazırlanan numunelerde donma-çözülme çevrimi sonrası dayanım değerlerine bakıldığında en iyi değeri SLP1/20 karışımlarının verdiği görülmüştür.

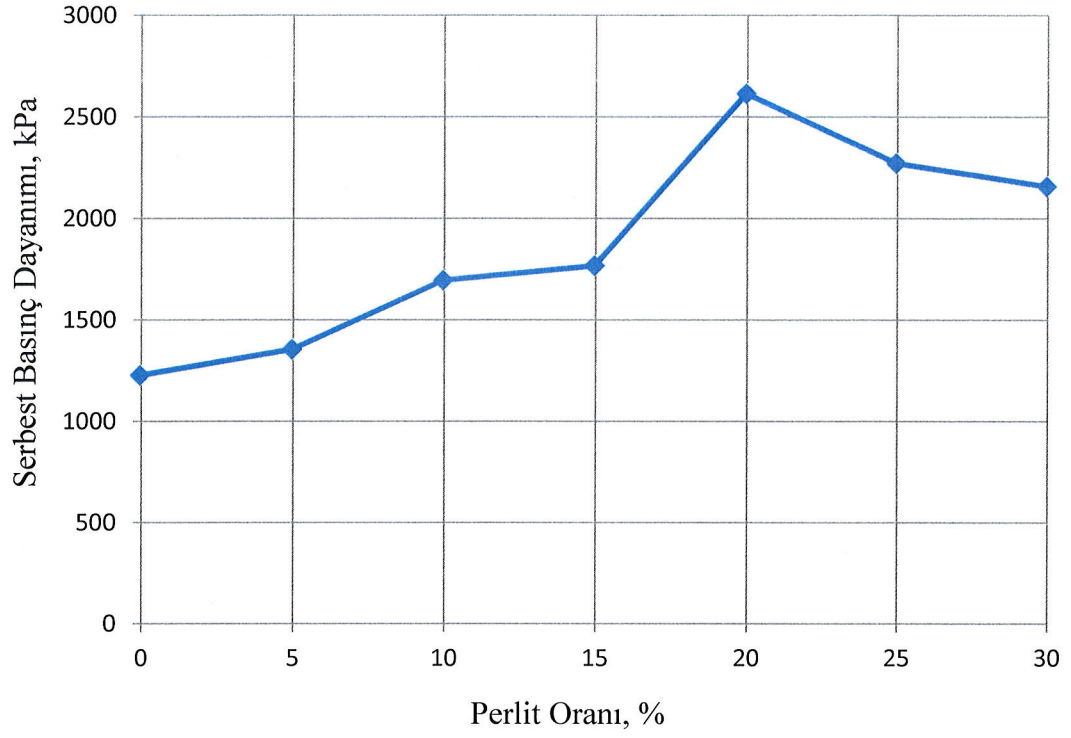
200 No'lu elekten elenmiş perlit ile hazırlanan SLP2 karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrasındaki dayanım değerleri SL karışımı değerlerine göre daha iyi sonuçların elde edildiği görülmüştür. SLP2 karışımlarının hazırlanmış olduğu donma-çözülme çevrimi sonrasındaki dayanım değerlerinde artan perlit oranının %15 perlit içeren SLP2/15 karışımlarına kadar dayanım değerlerinde artış görülmüştür. 200 No'lu elekten geçen perlitte hazırlanan SLP2 karışımlarının en yüksek dayanım değeri 3232,1 kPa olan SLP2/15 karışımında meydana gelmiştir.

SLP2/10 ve SLP2/15 karışımlarının donma-çözülme çevriminden sonraki dayanım değerlerinin 28 günlük ilk serbest basınç dayanım değerlerine göre arttığı görülmüştür.

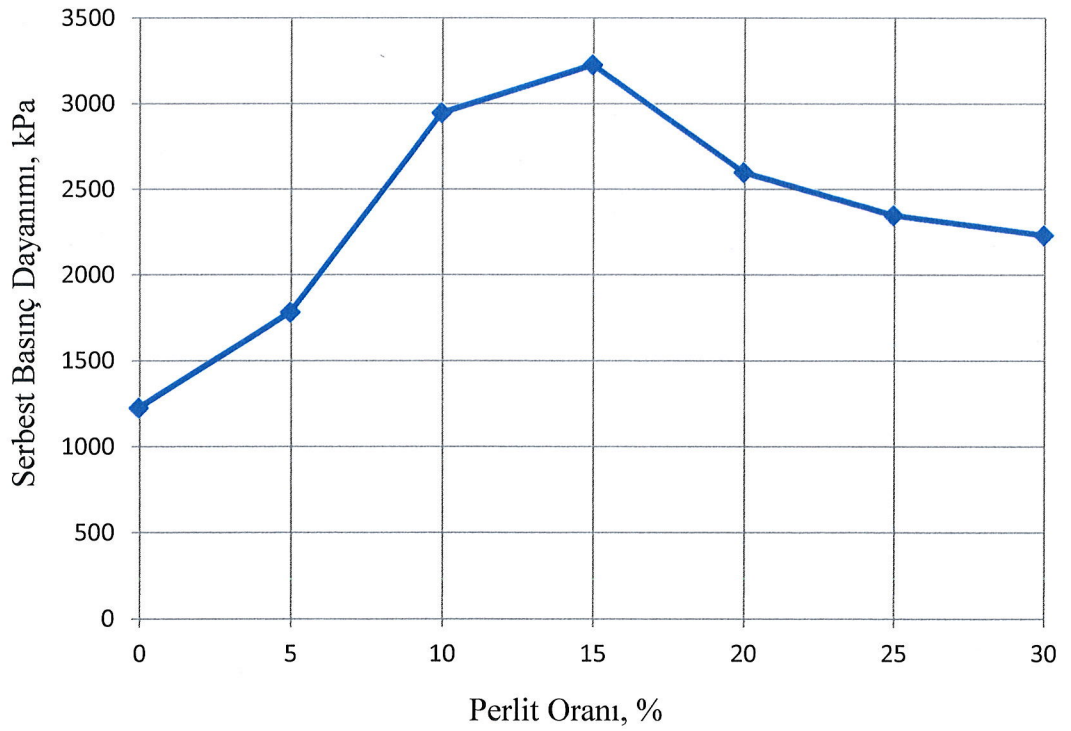
Donma-çözülme çevriminden sonraki dayanım değerlerinde elek açıklığı 0,075 mm altı perlit olan SLP2 karışım numunelerinin, SLP1 karışım numunelerine göre daha iyi dayanım değerlerinin elde edildiği tespit edilmiştir. Bunun nedeni perlitteki incelik faktörü ve kür süresinin uzadığından kaynaklı olduğu söylenebilir. Demirboğa (1999) tarafından yapılan çalışmada katkılı numunelerin donma-çözülme sonrası dayanımlarının 28 günlük basınç dayanımlarından yüksek olmasının kür süresinin uzamasından kaynaklı olduğunu belirtmiştir.

Şekil 4.45 ve Şekil 4.46'da sırasıyla verilen SLP1 ve SLP2 karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrasındaki tek eksenli serbest basınç dayanımı değerleri verilmiştir.

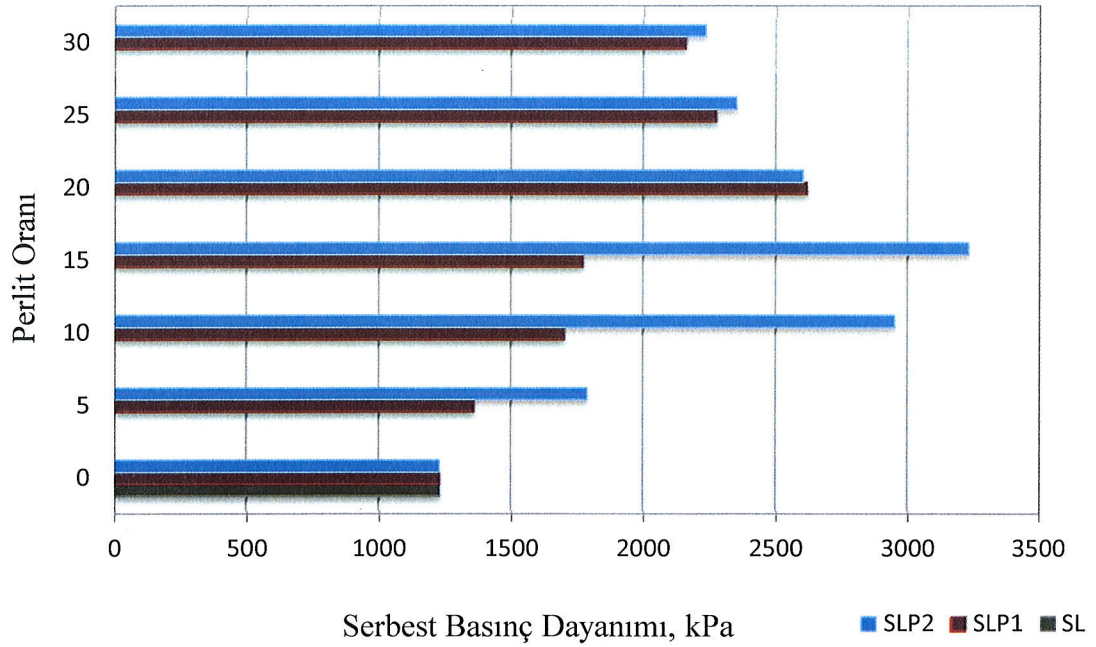
Şekil 4.47'de SLP karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımı değişimi verilmiştir.



Şekil 4.45 SLP1 karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımları



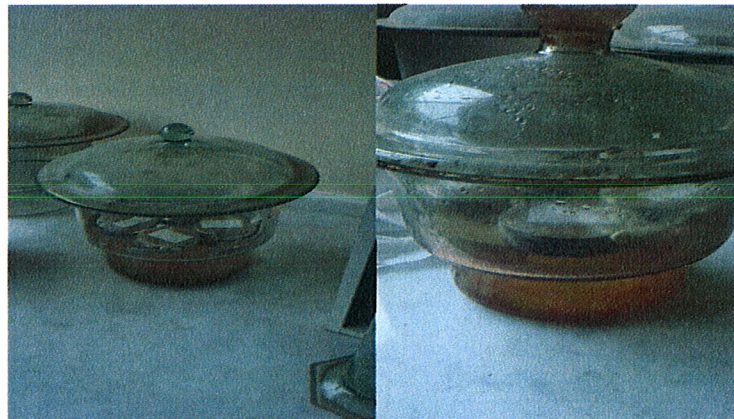
Şekil 4.46 SLP2 karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımları



Şekil 4.47 SLP karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımı değişimi

4.1.5. Şişme Yüzdesi Deneyi

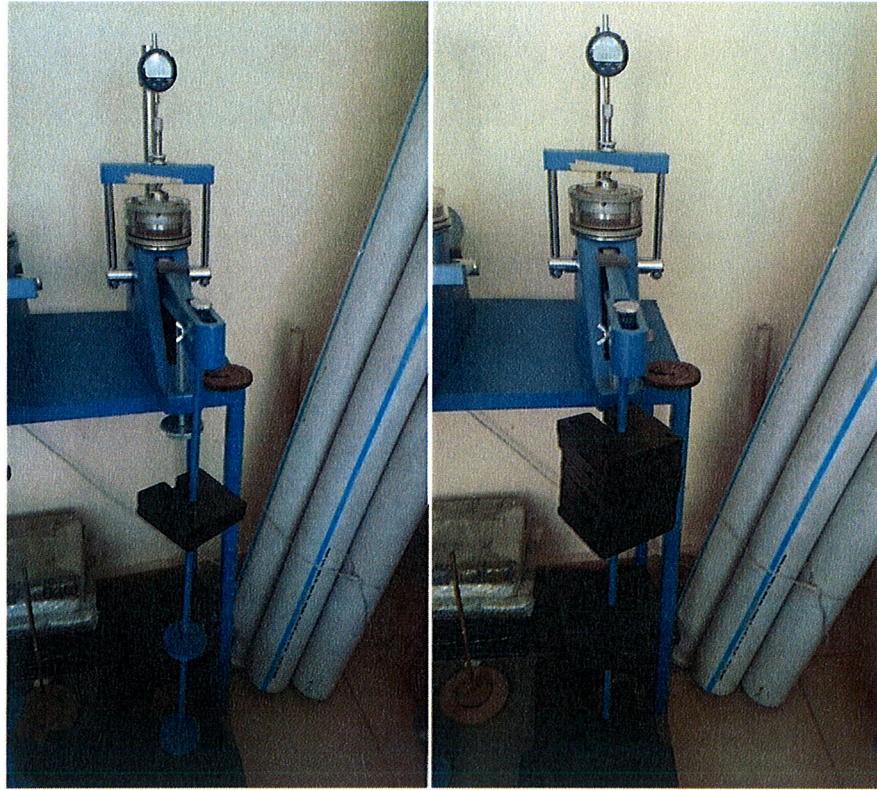
Zeminin serbest şişme yüzdesi %12,5 olarak bulunmuştur. Optimum kireç oranında hazırlanan SL karışımlarında şişme davranışının tamamen ortadan kalktığı belirlenmiştir. SLP karışımlarında da herhangi bir şişme meydana gelmediği tespit edilmiştir. SL ve SLP numunelerinin oldukça rijit bir yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.48’de şişme yüzdesi deney numuneleri verilmiştir.



Şekil 4.48 Şişme yüzdesi deney numuneleri

4.1.6. Şişme Basıncı Deneyi

Zemin numunesinin şişme basıncı deneyinde şişme davranışının serbest şişme yüzdesi deneylerine benzer olduğu tespit edilmiştir. Yapılan şişme basıncı deneyi sonucunda doğal zeminin şişme basıncı 258 kPa olarak belirlenmiştir. Optimum kireç ilavesiyle hazırlanan SL, SLP1 ve SLP2 karışımlarında şişme davranışı görülmemiştir. Şekil 4.49'da şişme basıncı deneyine ait bir görüntü verilmiştir.



Şekil 4.49 Şişme basıncı deneyinden bir görüntü

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Mühendislik özellikleri yetersiz olan zeminlerin iyileştirilmesinde mekanik ve kimyasal iyileştirmeyi amaç edinen yöntemlerin birlikte kullanılması hem ekonomik hem de etkili bir çözümdür. Yüksek lisans tez çalışması kapsamında kullanılan perlit kalsiyum esaslı bir bağlayıcının ortama ilave edilmesiyle, yapısındaki SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 gibi oksitlerin puzolanik reaksiyonlar oluşturmasına ortam hazırlayarak kimyasal iyileştirmeler sağlamaktadır.

Düşük plastisiteli kil olan doğal malzemenin stabilizasyonunda, optimum miktarda kireç (%6) ve %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında perlitin farklı incelikteki SLP1 ve SLP2 karışımları kullanılarak hazırlanan numunelerle doğal malzemenin geoteknik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca perlit oranı ve kür etkisiyle karışımların dayanım ve durabilite özelliklerinde nasıl değişme meydana geldiği araştırılmıştır.

Bu yüksek lisans tez çalışmasıyla aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- ✓ Kireç oranı tayini için yapılan pH deneyleri neticesinde zeminin optimum kireç oranı %6 olarak belirlenmiş ve numunelerde bu oran dikkate alınarak karışımlar hazırlanmıştır.
- ✓ Stabilizasyon çalışması kapsamında optimum oranda zemine ilave edilen kireç, LL ve PI değerlerinde az miktarda düşüşler ortaya çıkarırken, PL değerinde artış meydana getirmiştir. SLP1 karışımlarına göre en düşük LL ve PL değerleri SLP1/30 karışımlarından elde edilmiştir. SLP2 karışımlarında LL değerinde düşüş meydana gelirken PL ve PI değerlerinde düzenli bir davranış sergilenmemiştir.
- ✓ Doğal zemine %6 kireç ilavesi sonrasında hazırlanan numunelerin kompaksiyon parametreleri incelendiğinde; maksimum kuru yoğunluk değerinde düşüş, optimum su içeriğinde ise artış görülmüştür.
- ✓ SLP1 karışımlarına ait kompaksiyon parametrelerindeki değişime bakıldığında optimum su içeriği değerlerinde SL karışımına göre artış meydana

gelmiştir. Artan doğal perlit oranlarındaki SLP1 karışım numunelerinde optimum su içeriği değerinde SL numunesine göre azalmanın olduğu tespit edilmiştir. Optimum su içeriği değeri en düşük olan karışımlar SLP1/30 karışımlarında ortaya çıkmıştır.

✓ Kompaksiyon parametreleri incelenen SLP2 karışımlarında optimum su içeriği değerlerinde SL karışımlarına göre artışların olduğu tespit edilmiştir.

✓ Doğal puzolan olan perlit tanelerindeki inceliğin serbest basınç dayanımı sonuçlarını nasıl etkilediğini amaçlayan bu çalışmada perlitin SLP1 ve SLP2 karışımlarında kullanılmak üzere iki farklı incelikteki perlit ile numuneler hazırlanmıştır. SL karışımlarına 84 günlük kür sonrasında yapılan tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçlarına göre, dayanım değerlerinde yaklaşık 12 kat artış görülmektedir.

✓ SLP1 karışımlarındaki 7 günlük tek eksenli serbest basınç dayanımın değerleri, SL karışımındaki numunelerin dayanımı değerlerine göre daha iyi sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Artan doğal perlit oranlarıyla 7 günlük kür sonrasındaki dayanımda artışlar görülmektedir.

✓ 75 mikron altı perlit içeren SLP2 karışımlarında 7 günlük tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçlarının SL karışımındaki numunelerin dayanım değerlerinden daha iyi olduğu görülmüştür. SLP2 karışım numunelerindeki artan perlitte dayanımdaki değerlerinde %15 oranında ilave edilen perlite kadar artış meydana getirirken perlitin oranının daha fazla arttırılması dayanımın düşmesine neden olmuştur.

✓ SLP1 karışımlarında 28 günlük kür sonrasında yapılan tek eksenli serbest basınç dayanımı değerlerinde SLP1/20 karışımlarının, SL karışımlarına göre %77 oranında artış meydana getirdiği tespit edilmiştir. 28 günlük kür sonrasındaki dayanım değerlerinde SLP1 karışımlarında en iyi sonuç %20 doğal perlit kullanılarak hazırlanan SLP1/20 karışımlarındaki numunelerde meydana geldiği görülmüştür.

✓ SLP2 karışımlarıyla hazırlanan numunelerdeki 28 günlük tek eksenli serbest basınç dayanımı verilerinin en başarılı sonucu elek açıklığı 0,075 mm altı perlitli %15 ince perlit ile hazırlanmış olan SLP2/15 karışımlarına ait numunelerde olduğu görülmüştür.

✓ 84 günlük serbest basınç dayanımı verileri incelendiğinde SLP1 ve SLP2 karışımlarına bakılarak daha yüksek değerlerin SLP2 karışımlarındaki numunelerde meydana geldiği görülmüştür. 84 günlük kür sonrasındaki en yüksek dayanım

değerlerinin 200 No'lu elekten geçen perlitin, %15 oranındaki SLP2/15 karışımlarından elde edilmiştir. SLP2/15 karışımına ait tek eksenli basınç dayanımı değeri 3408,9 kPa olarak tespit edilmiştir.

✓ 200 No'lu elekten geçen perlitli numunelerin doğal perlitli numunelerdekilere göre daha az kullanımının daha da iyi sonuçlar ortaya çıkardığı görülmüştür. Bunun nedeninin doğal puzolan olan perlit tanelerindeki inceliğin artırılmasından kaynaklı olduğu tespit edilmiştir.

✓ Doğal perlit içeren karışımlarda maksimum değerler %20 perlit oranında görülürken, 75 mikron altı perlit içeren karışımlarda maksimum dayanım değerleri %15 perlit oranında görülmüştür.

✓ Durabilite tetkiklerinden ıslanma-kuruma periyoduna tabi tutulan SLP1 ve SLP2 karışımları incelendiğinde; SLP1/15 ve SLP1/20 karışımları yeterli dayanıklılık gösterirken perlitin inceliğinin fazla olduğu SLP2 karışımlarında ise daha iyi sonuçlar ortaya çıkmıştır. SLP2/10, SLP2/15, SLP2/20, SLP2/25 ve SLP2/30 karışımlarından hazırlanan numuneler 12 kez ıslanma-kuruma periyodu sonrasında hacimsel bütünlüğü korumuştur. SLP2 karışım numunelerinin SLP1 karışım numunelerine göre durabilite şartlarını daha iyi bir şekilde sağladığı görülmüştür. Bunun sebebi perlitteki inceliğin durabilite değerleri üzerinde olumlu sonuçlar vermesidir.

✓ Donma-çözülme çevriminin ardından dayanım değerleri %15 perlit içeren SLP2/15 karışımlarında daha iyi sonuçların ortaya çıktığı görülmüştür. Bu değerlerin 28 günlük ilk serbest basınç değerine göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

✓ Serbest şişme yüzdesi deneyi sonrasında optimum kireç (%6) oranında hazırlanan SL karışımında şişme davranışının tamamen ortadan kalktığı görülmüştür. SLP karışımlarında da herhangi bir şişme meydana gelmediği belirlenmiştir.

✓ Şişme basıncı deneyi sonuçlarına göre doğal zeminin şişme basıncı 258 kPa olarak tespit edilmiştir.

Bu konuda yapılabilecek yüksek lisans ve doktora çalışmalarına ışık tutması amacıyla verilebilecek öneriler aşağıdaki sunulmaktadır:

✓ Zemin stabilizasyonu çalışmalarında perlit ve çimento kullanılarak nasıl bir iyileştirme yapılabildiği incelenebilir.

- ✓ Puzolanik aktivitesi bulunan farklı malzemelerle kirecin kullanılmasının zemin stabilizasyonuna katkısı araştırılabilir.
- ✓ Çimento, uçucu kül gibi birincil bağlayıcılar ile puzolanik özelliğe sahip katı atıklarla birlikte stabilizasyon çalışmaları yapılabilir. Ayrıca endüstriyel atıkların inceliğinin mühendislik özellikleri düşük olan zeminlerin iyileştirilmesine etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

- AASHTO, (1993). Guide for Design of Pavement Structures, AASHTO M 147, USA, 63-65.
- Abduljawad, S. N. (1995). "Improvement of Plasticity and Swelling Potential of Calcareous Expansive Clays", **Geotechnical Engineering Journal**, 3-16.
- Adailer, K. (1996). Mitigation of Earthquake-Induced Liquefaction Hazards, PhD Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, New York.
- Akman, S. ve Esenli, F. (1992). A Comparative Study of Natural Pozzolans Used Blended Cement Production, IV. Canment / ACI International Conference of Fly Ash, May, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 471-477.
- Alataş, T. (1996). *Afşin Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Yol Stabilizasyonunda Çeşitli Maddelerle Kullanımı Üzerine Bir Araştırma*, **Doktora Tezi**, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Al-Rawas, A. A., Taha, R., Nelson, J. D., Al-Shab, T., B. ve Al-Siyabi, H. (2002). A Comparative Evaluation of Various Additives Used in the Stabilization of Expansive Soils, **Geotechnical Testing Journal**, 25,2, 199-209.
- An, D., Guo, Y., Zou, B., Zhu Y., Wang, Z. (2010). A Green Route to Preparation of Silica Powders with Rice Husk Ash and Waste Gas, **Chemical Engineering Journal**, Elsevier, Cilt 162, 509-514.
- An, D., Guo, Y., Zou, B., Zhu Y., Wang, Z. (2011). A Study on the Consecutive Preparation of Silica Powders and Active Carbon from Rice Husk Ash, **Biomass and Bioenergy**, Elsevier, Cilt 35, 1227-1234.
- Arman, A. ve Moonfish, G., A. (1972). Lime Stabilization of Organic Soils, Research Record No. 381, Highway Research Record, Washington, 37-45.
- ASTM C 989, (1994). Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 422, (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis o Soils, ASTM, Pennsylvania.

- ASTM D 559, (2003). Standard Test Method for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 560, (1996). Standard Test Method for Freezing and Thawing Compacted Soil- Cement Mixtures, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania.
- ASTM D 698, (2007). Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 854, (2010). Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 934, (2003). Standard Practices for Identification of Crystalline Compounds in Water- Formed Deposits, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 2166, (2006). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 2487, (2011). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 2974, (2007). Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 4318, (2010). Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soils, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 4546, (2008). Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Cohesive Soils, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 6276, (2006). Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization, ASTM, Pennsylvania.
- Atterberg, A. (1911). The Behaviour of Clays with Water, Their Limits of Plasticity and Their Degrees of Plasticity, *Kungliga Lantbruksakademiens Handlingar Och Tidskrift*.
- Aytekin, M. (2004). **Deneysel Zemin Mekaniği**, Ankara: Teknik Yayınevi.
- Balta, İ. (1984). *Doğu Karadeniz Bölgesi Topraklarının Çimento ve Kireçle Stabilizasyonu*, **Doktora Tezi**, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

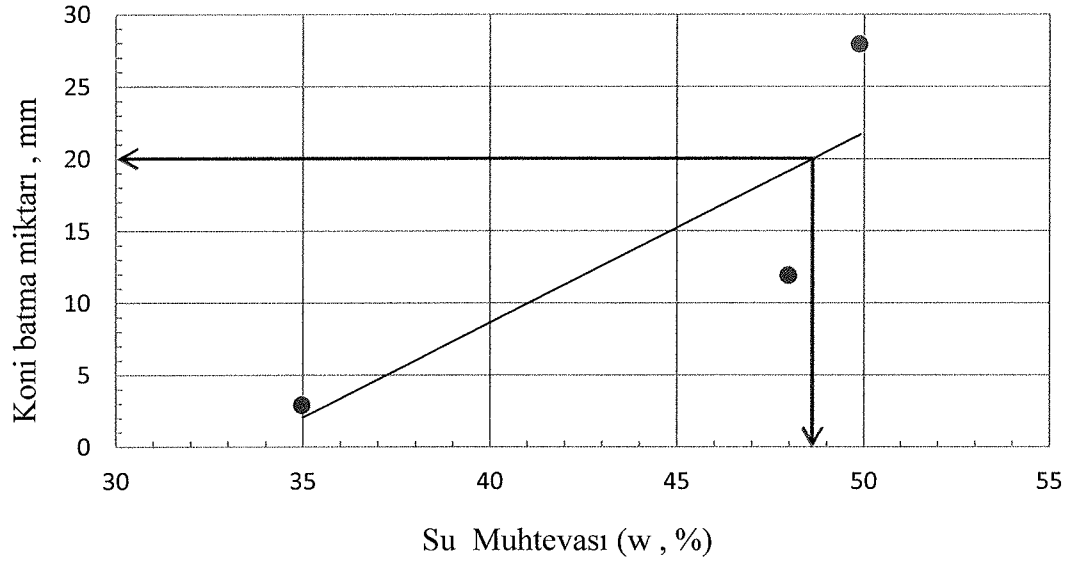
- Baradan, B. (2000). **Yapı Malzemeleri II**, Mühendislik Fakültesi Yayınları No. 207, Dokuz Eylül Üniversitesi Matbaası, İzmir, 1-7.
- Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils, *Engineering Geology*, 42, 223-237.
- Croft, J.B., (1967). "The Process Involved In the Lime Stabilization of Clay Soils", **Australian Research Board**, 2, 1169-1203.
- Çakıroğlu, İ. (2007). *Yüksek Plastisiteli Killerin Stabilizasyonu*, **Yüksek Lisans Tezi**, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çalık, Ü. (2012). *Perlitin Puzolanik Katkı Olarak Kireç ile Birlikte Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı*, **Doktora Tezi**, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Dayı, M. (2006). *Doğal ve Yapay Puzolanların Kompoze Çimento Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması*, **Yüksek Lisans Tezi**, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Demirboğa, R. (1999). *Silis Dumanı ve Uçucu Külün Perlit ve Pomza ile Üretilen Hafif Beton Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi*, **Doktora Tezi**, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Demiröz, A. ve Karaduman, M. (2009). **Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Yüksek Okulu Teknik-Online Dergisi**, 8/3, 33-49.
- Erdoğan, T. Y. (1997). *Admixtures for Concrete*, The Middle East Technical University Press, Ankara, Turkey, 77,78.
- Erdoğan, T. Y. (2003). *Beton*, Middle East Technical University Press, Ankara, 169-207.
- FHWA, (1998). *Ground Improvement Technical Summaries Final Draft*, FHWA Demonstration Project No.116 Contact No. DTFH61-93-R-00145 by Elias V., Welsh J., Warren J., Lukas R., USA.
- Gündeşli, U. (2008). *Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması*, **Yüksek Lisans Tezi**, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hayward, B. (1996). *Ground Modification Seminar Notes*, Odenton.

- Holtz, R. D., Kovacs, W. D. ve Sheahan, T. C. (2015). **An Introduction To Geotechnical Engineering** (Çev. A. Erken).
- Ingles, O. G., Metcalf, J. B. (1972). "Soil stabilization", **Butterworths**, Sydney.
- Kayabali, K. (2010). **Geoteknik Mühendisliğine Giriş**, Ankara: Gazi Kitabevi, 636.
- Kılıç, G. (2008). *Çimento ile Zemin Stabilizasyonu*, **Yüksek Lisans Tezi**, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kukko, H. (2000). Stabilization of Clay with Inorganic Products, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 12,4, 307-309.
- Ladd, C. C., Moh, Z. C., Lambe, T. W. (1960). Recent Soil-Lime Research at the Massachusetts I.T., Highway Research Board, Bul. 262, pp. 64-85.
- Lambe, P. C., Khosla, N. P. ve Jayaratne, N., N. (1990). Soil Stabilization in Pavement Structures, Report No. 232411-88-1, Transportation Studies Research, North Carolina.
- Ledbetter, R. H. (1985). Improvement of Liquefiable Foundation Conditions Beneath Existing Structures, Technical Report No. REMR-GT-2, Dept. of the Army, USA.
- Massazza, F. (1989). *Puzolanlı Çimentolar ve Kullanım Alanları*, Seminer, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.
- Mathew, P. K. ve Rao, S. N. (1997). Effect of Lime Cation Exchange Capacity of Marine Clay, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 123,2, 183-185.
- Mitchell, J. K. (1993). **Fundamentals of Soil Behavior Behaviour 2 nd Edition**, John Wiley&Sons Inc., New York, 437.
- Mitchell, J. K. ve Gallagher, P., M. (1998). **Guidelines for Ground Improvement of Civil Works and Military Structures and Facilities**, Publication No. ETL 1110-1-185, US. Army of Corps. of Engineers, Washington, 109.
- Nelson, J. D. ve Debra, J., M. (1992). Expansive Soils-Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John Willey&Sons Inc., London, 259-261.

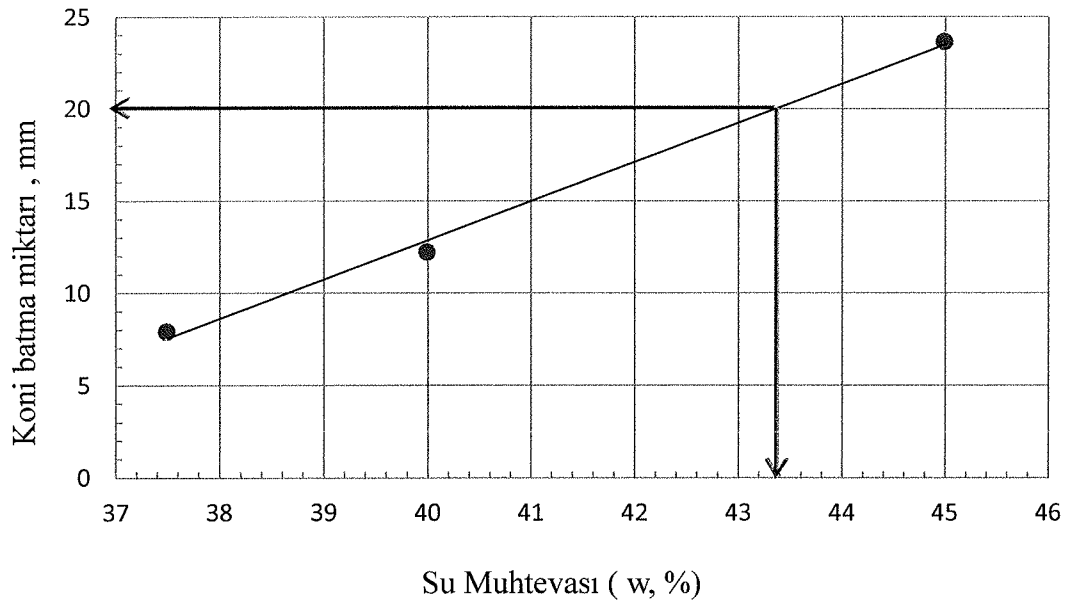
- Ola, S. A. (1978). The Geology and Geotechnical Properties of the Black Cotton Soils of North-Eastern Nigeria, A. A. Balkema, Rotterdam, 131-144.
- Özer, M. ve Orhan, M. (2007). *Zeminlerin Tane Büyüklüğü Dağılımının Lazer Kırınım Yöntemiyle Belirlenmesi*, Politeknik Dergisi, 10, (3), 331-337.
- Rodriquez, A. R., Castillo, H. ve Sowers, G. F. (1973). **Soil Mechanics in Highway Engineering**, Trans Tech Publications, Germany.
- Tokyay, M. ve Erdoğan, K. (1998). Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu, TÇMB, Ankara.
- Tokyay, M. (2002). *Cüruflar ve Cürüflü Çimentolar*, TÇMB Ar-Ge Enstitüsü, Ankara.
- Tunç, A. (2002). **Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları**, İstanbul: Atlas Yayın Dağıtım, 912.
- Tüdeş, E. (1996). *Zeminlerin Kireç ve Çimento Katkısı ile Stabilizasyonu*, **Yüksek Lisans Tezi**, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- U.S. Army Corps. Of Eng. (2003). **Guidelines on Ground Improvement for Structures and Facilities**, Research No. 20314-1000, Department of the Army, Washington.
- Uzuner, B. A. (2007). **Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği**, Trabzon.
- Uzuner, B. A. (2013). **Temel Mühendisliğine Giriş** (5.bs.). Trabzon: Derya Kitabevi, 342, 359.
- Ün, H. (2007). İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri Ders Notları, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Winterkorn, H. F. ve Fang, H., Y. (1975). *Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhold Publication, London, 176.
- Yılmaz, F. (2015). *Tüfit Taşların Zemin Stabilizasyonunda Kireçle Birlikte Kullanılabilirliğinin Standart Deneyler ve Bilgisayarlı Tomografi Tekniği ile Araştırılması*, **Doktora Tezi**, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

EKLER

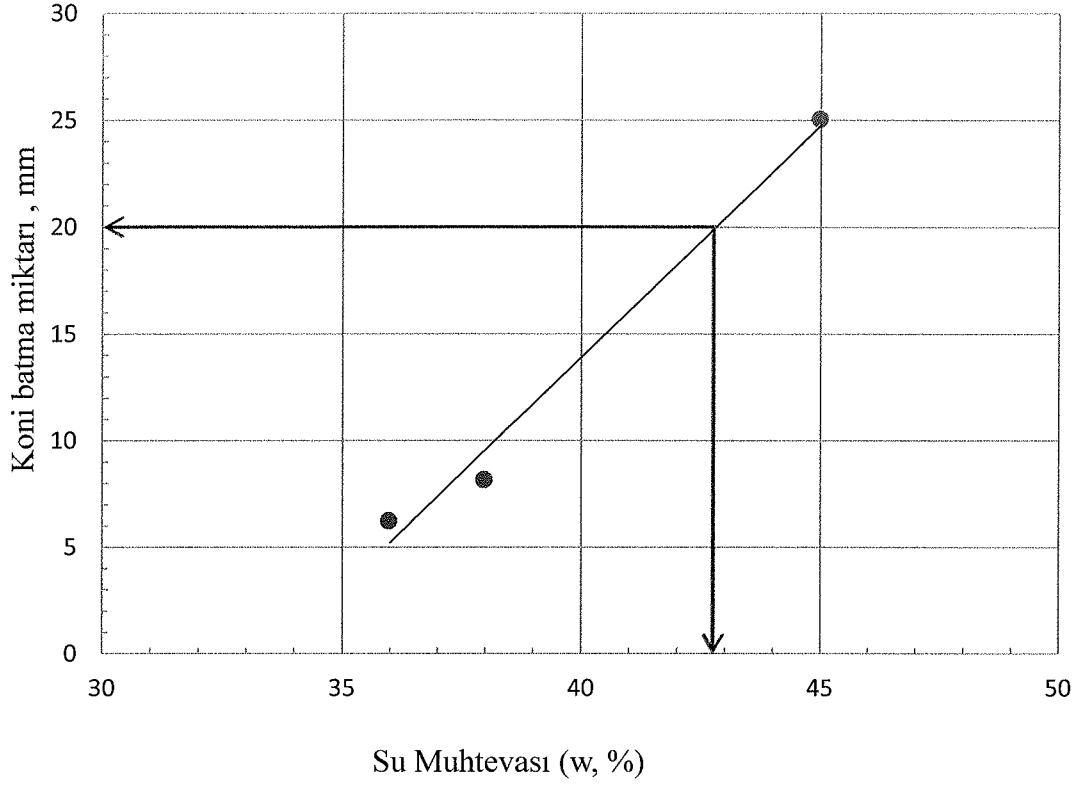
Ek-1 Düşen koni penetrasyon deneyi sonuçları



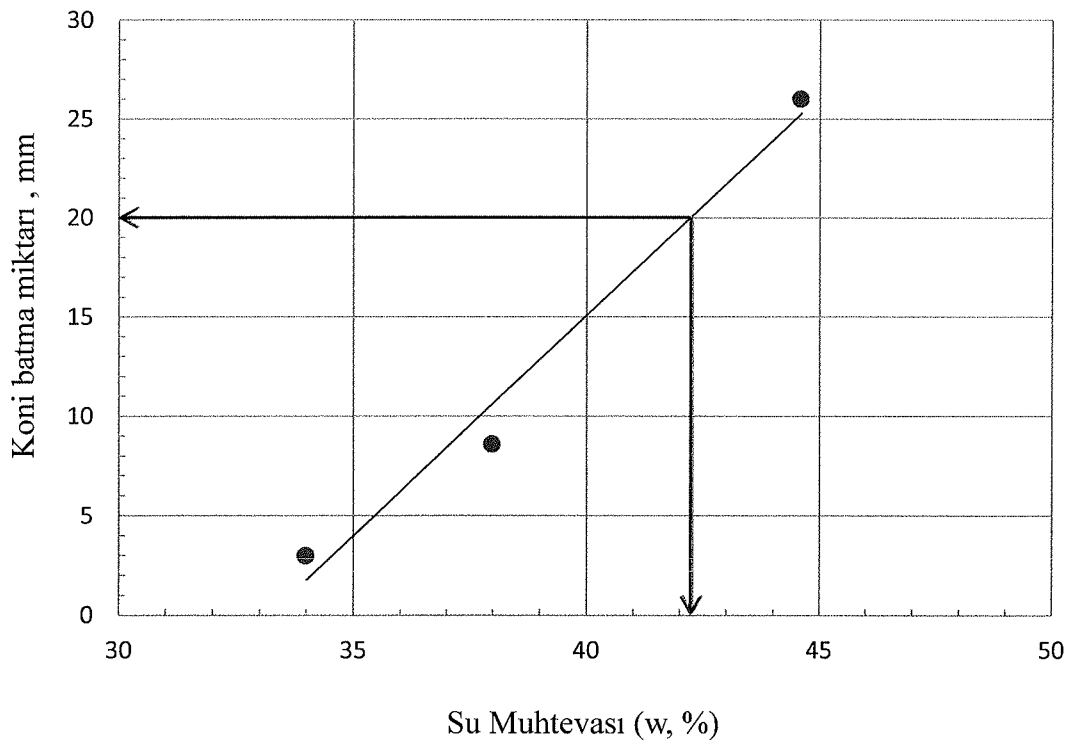
Ek-1 Şekil 1.1 Doğal zemin numunesine ait düşen koni penetrasyon grafiği



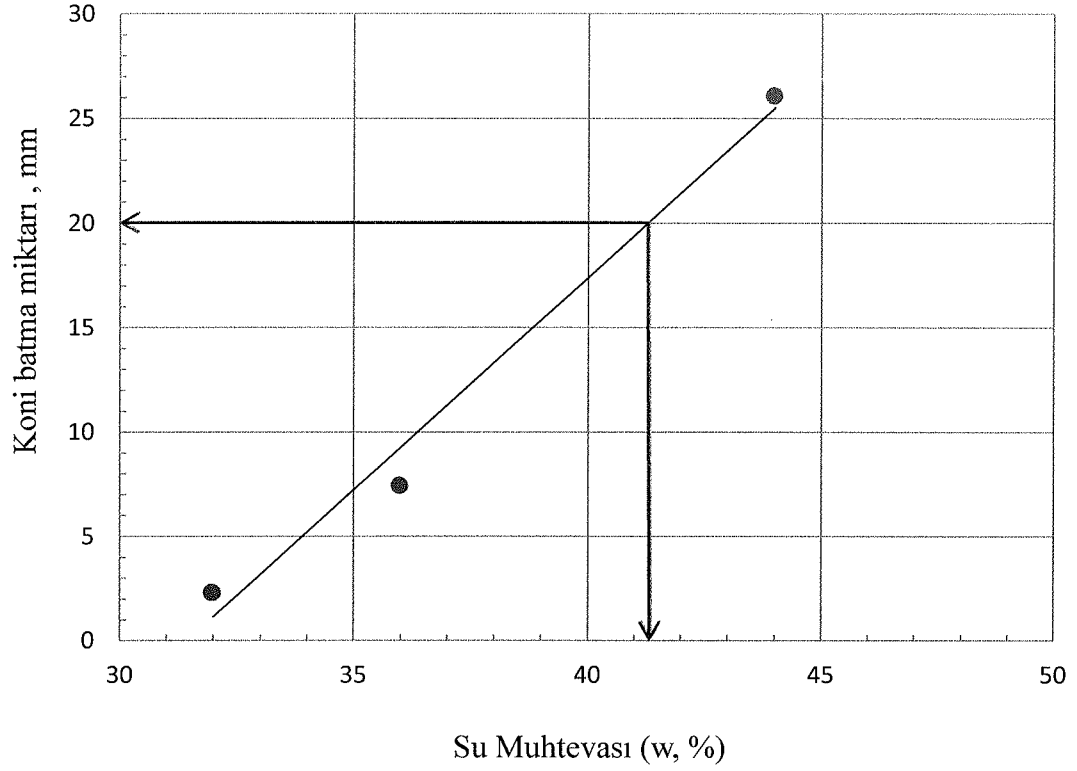
Ek-1 Şekil 1.2 SL numunesine ait düşen koni penetrasyon grafiği



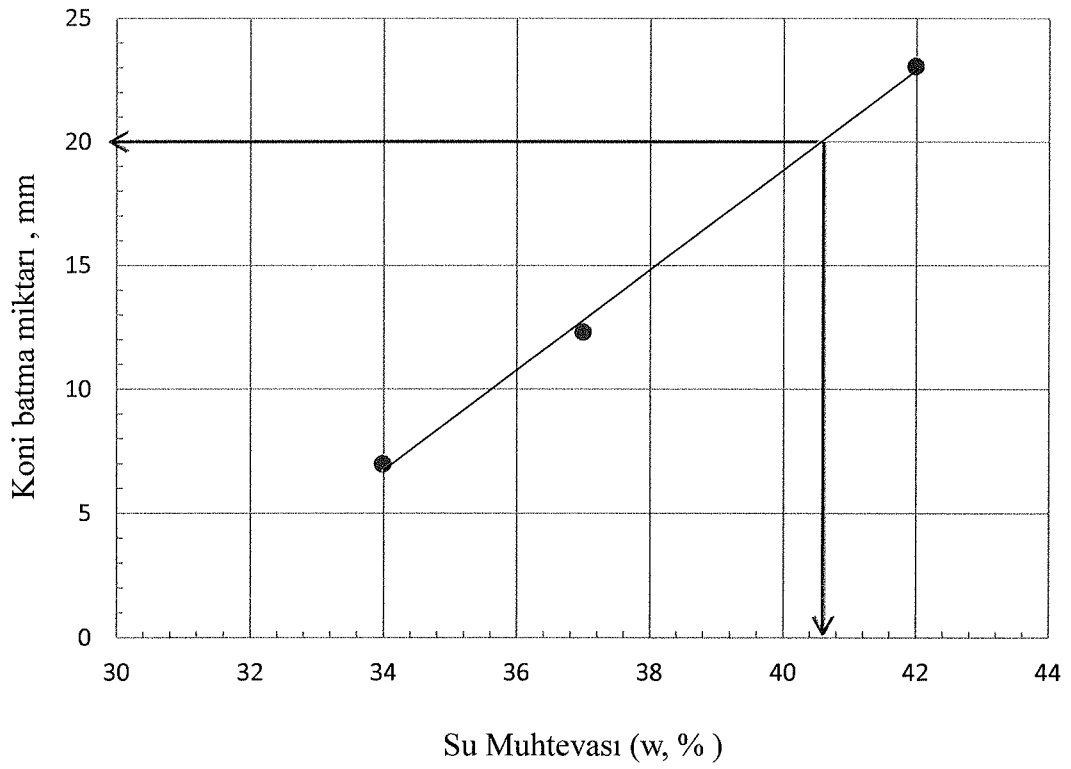
Ek-1 Şekil 1.3 SLP1/5 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği



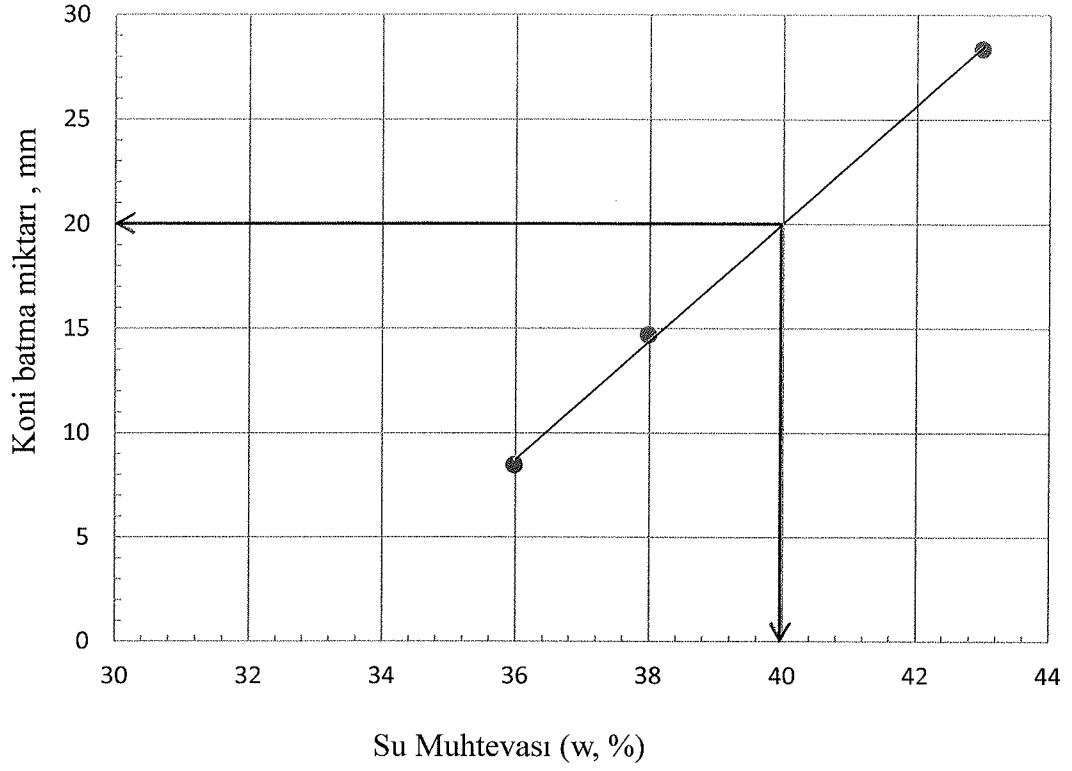
Ek-1 Şekil 1.4 SLP1/10 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği



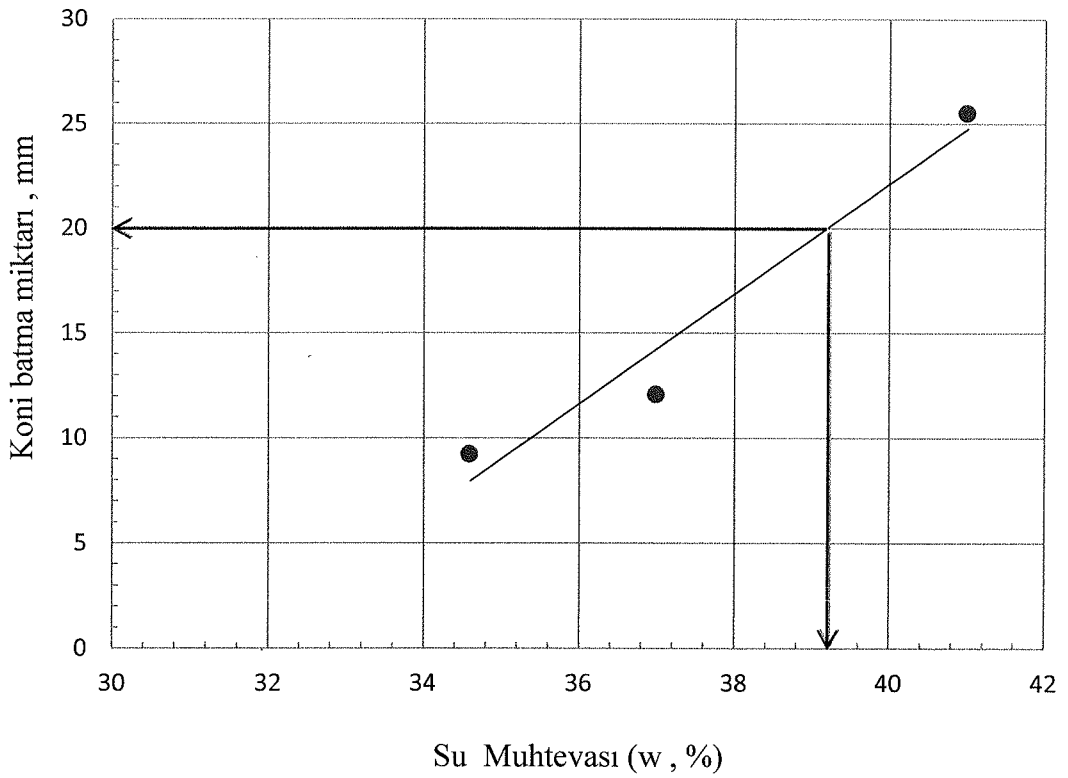
Ek-1 Şekil 1.5 SLP1/15 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği



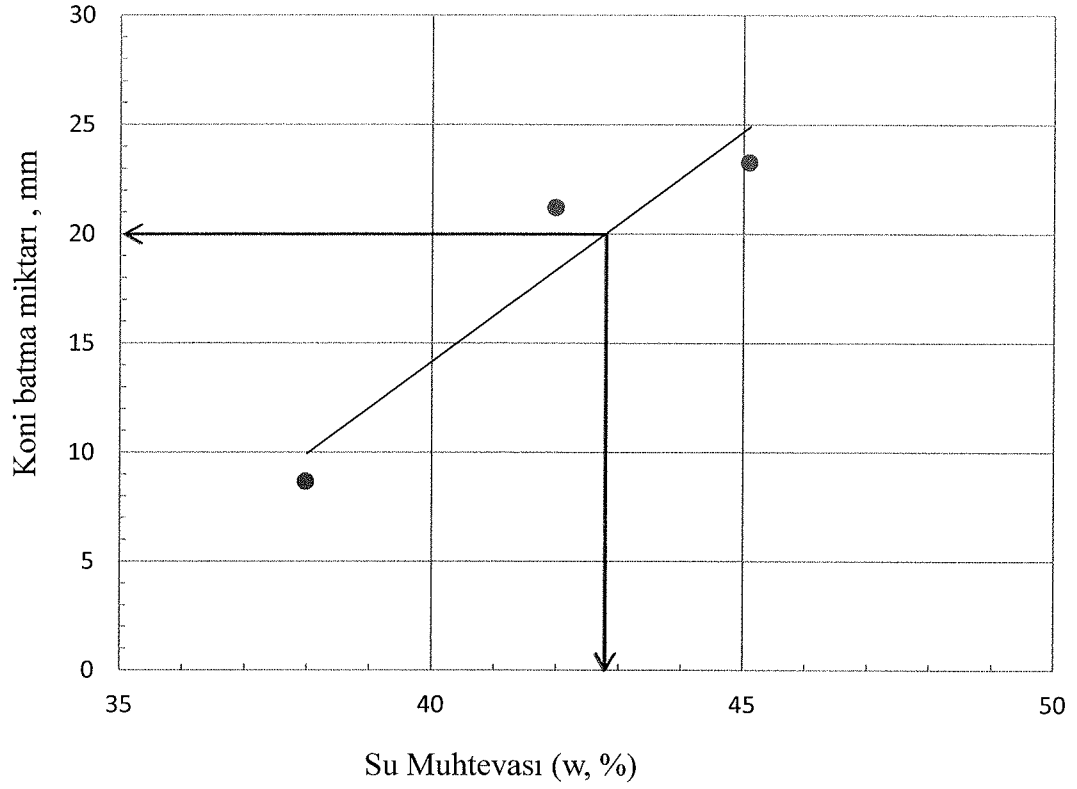
Ek-1 Şekil 1.6 SLP1/20 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği



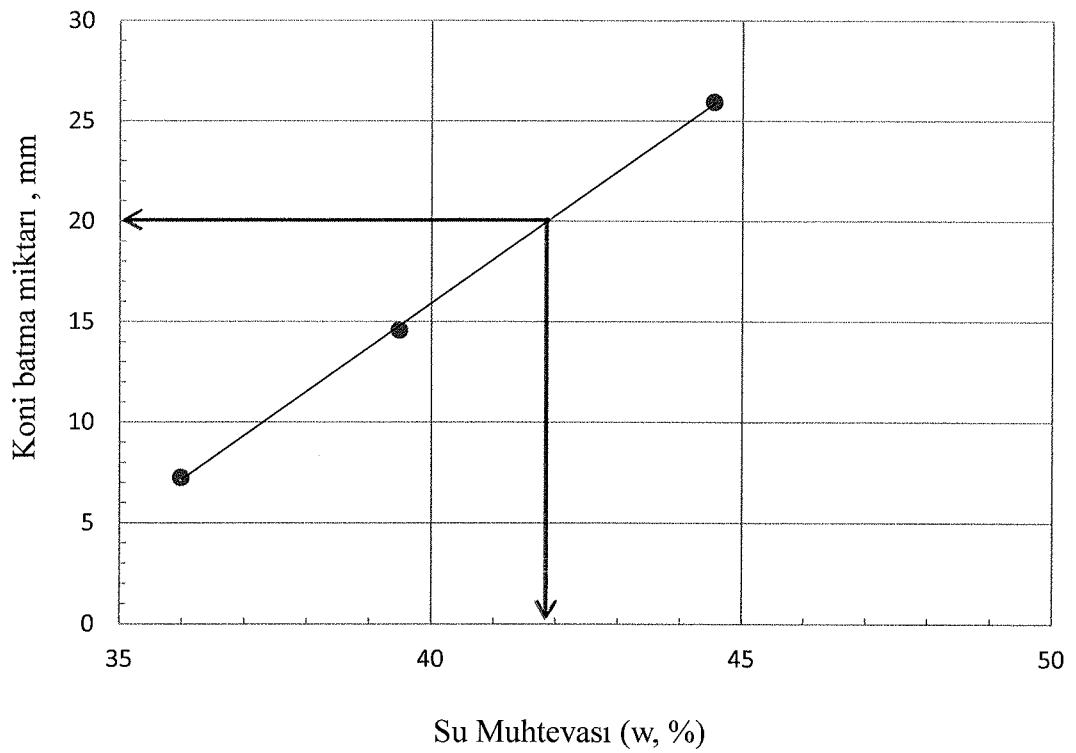
Ek-1 Şekil 1.7 SLP1/25 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği



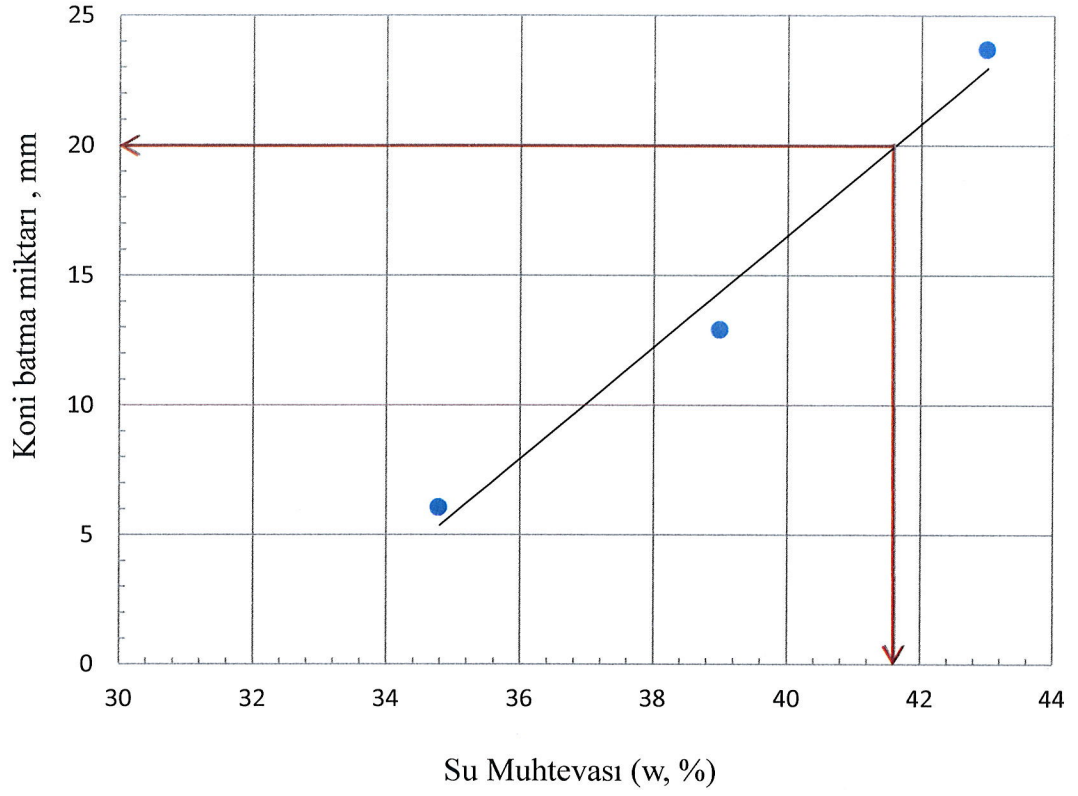
Ek-1 Şekil 1.8 SLP1/30 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği



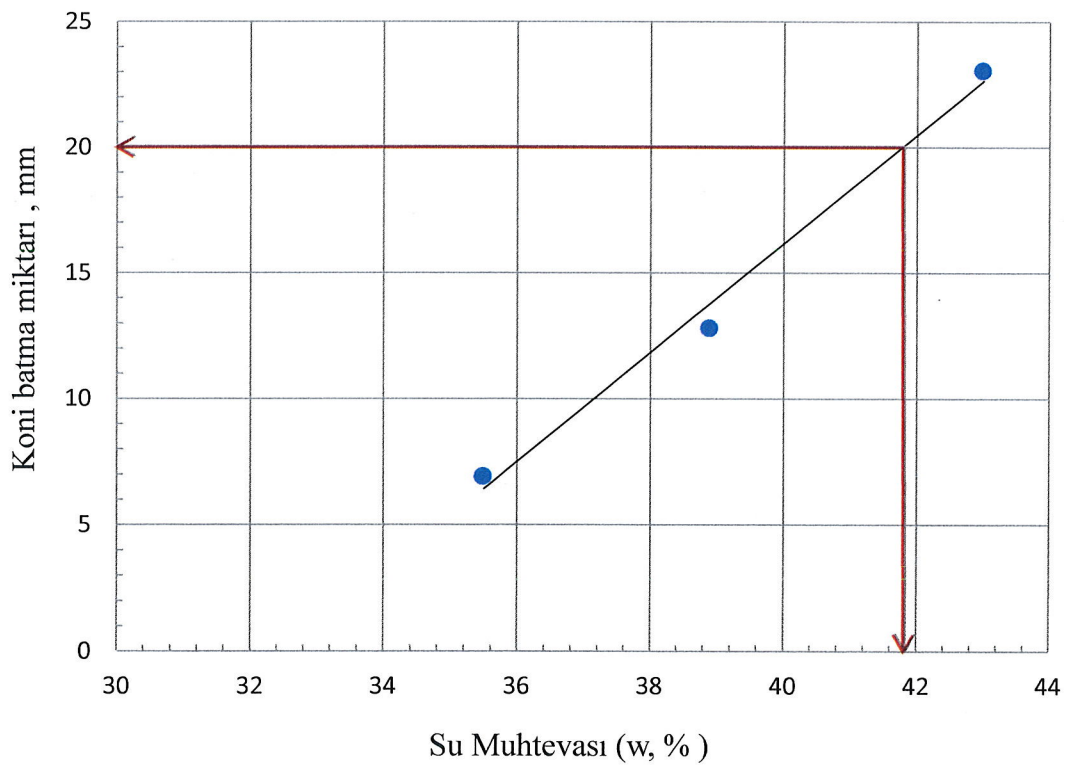
Ek-1 Şekil 1.9 SLP2/5 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği



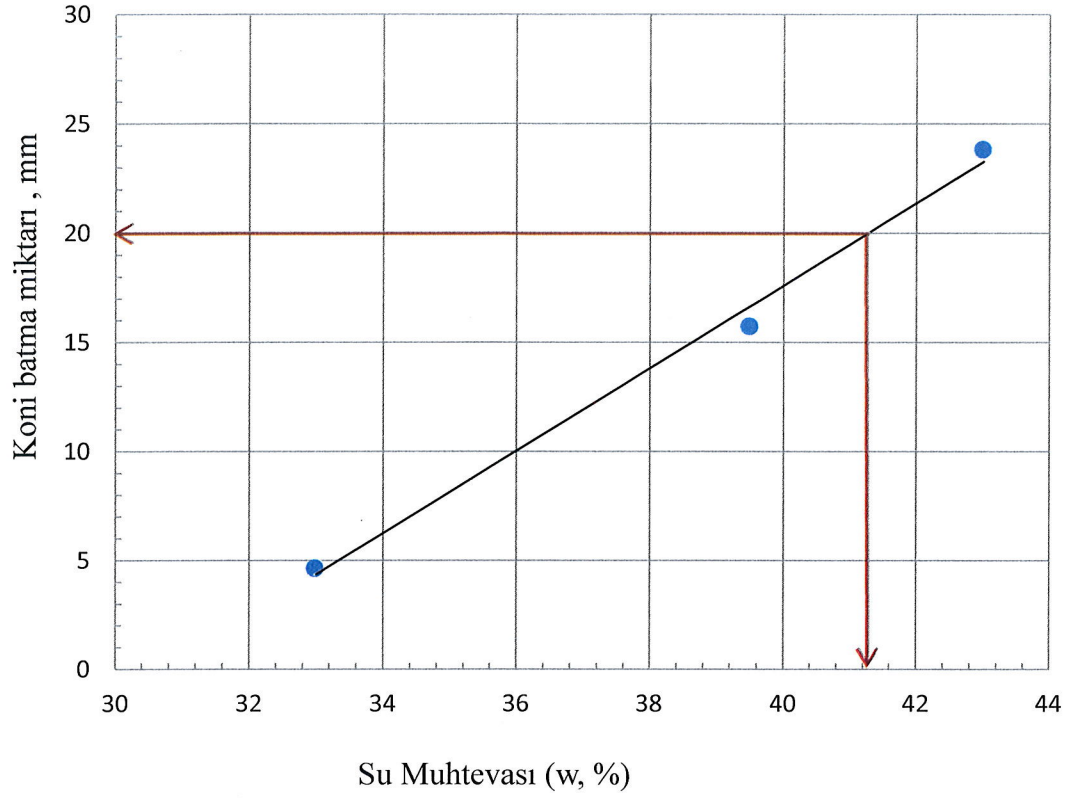
Ek-1 Şekil 1.10 SLP2/10 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği



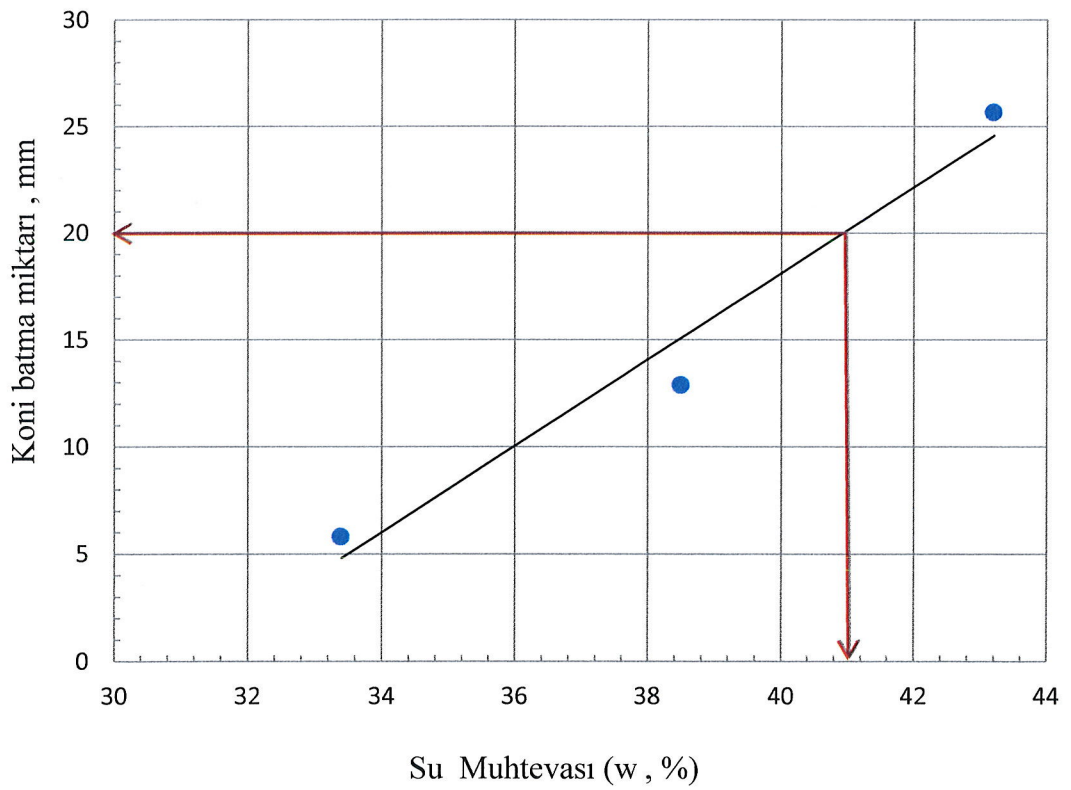
Ek-1 Şekil 1.11 SLP2/15 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği



Ek-1 Şekil 1.12 SLP2/20 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği

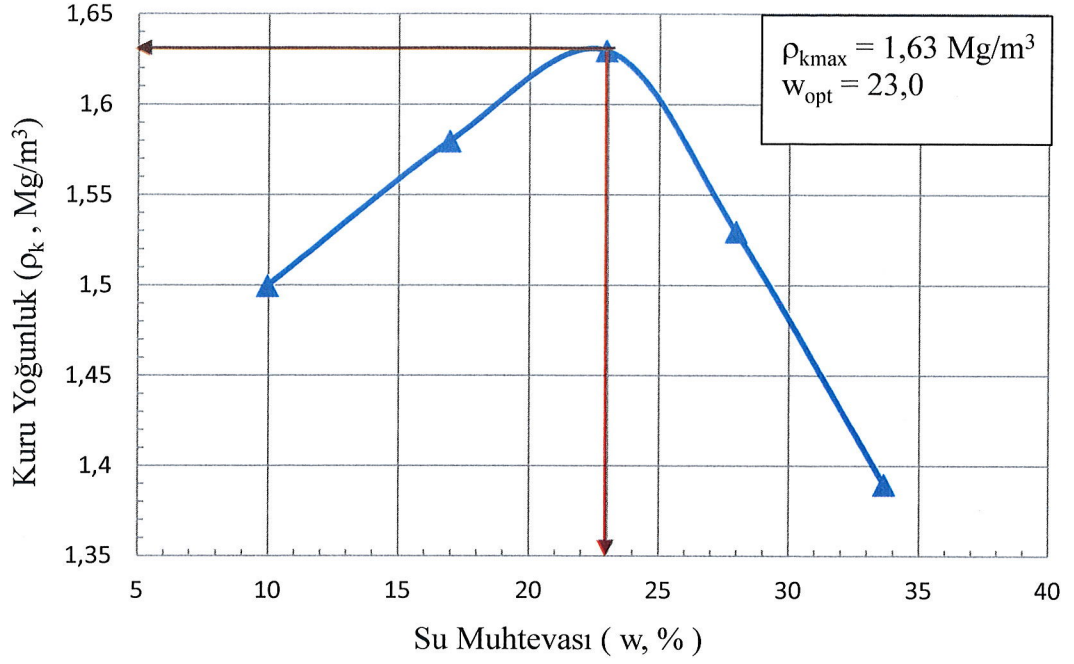


Ek-1 Şekil 1.13 SLP2/25 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği

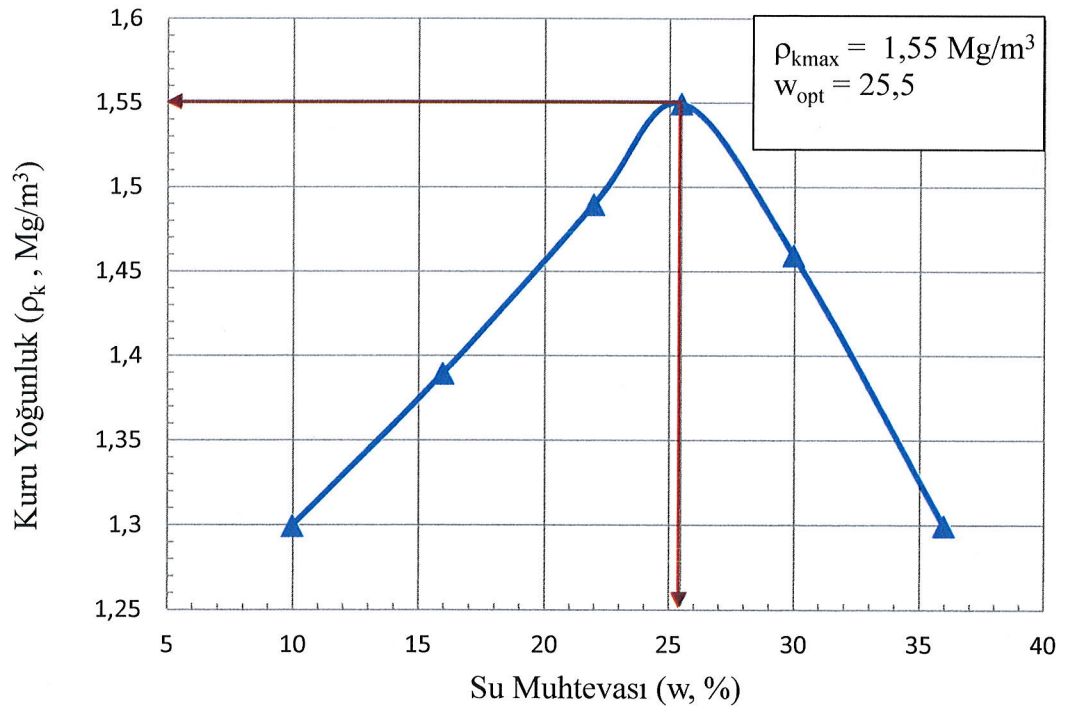


Ek-1 Şekil 1.14 SLP2/30 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği

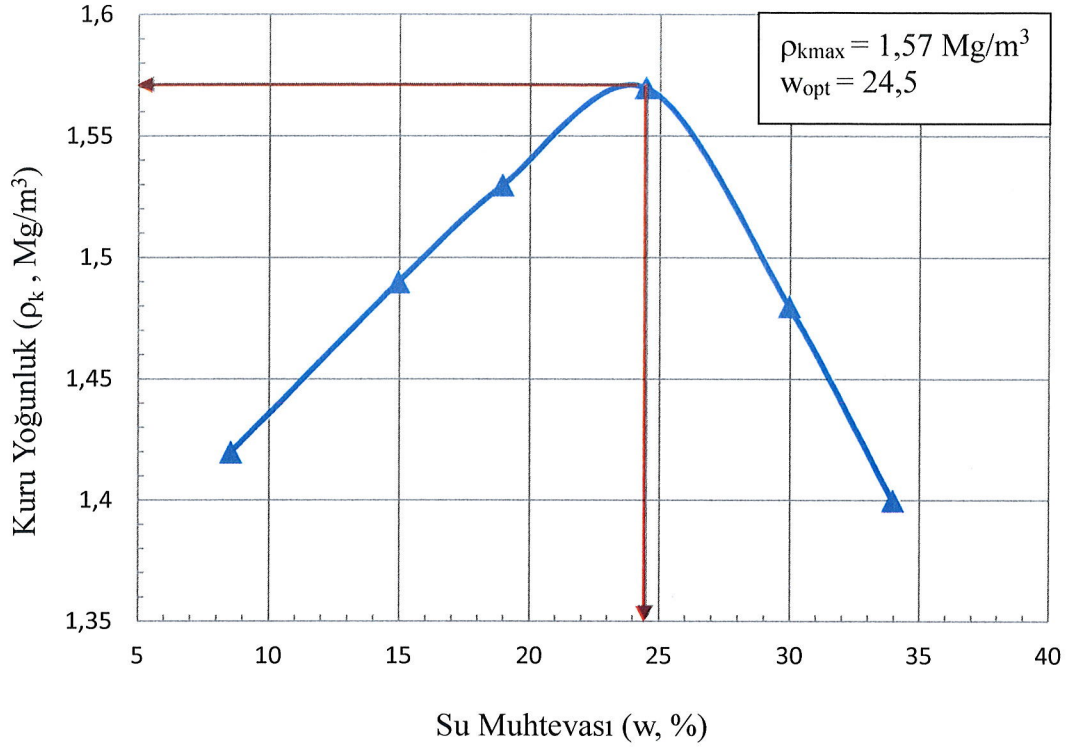
Ek-2 Kompaksiyon deneyi sonuçları



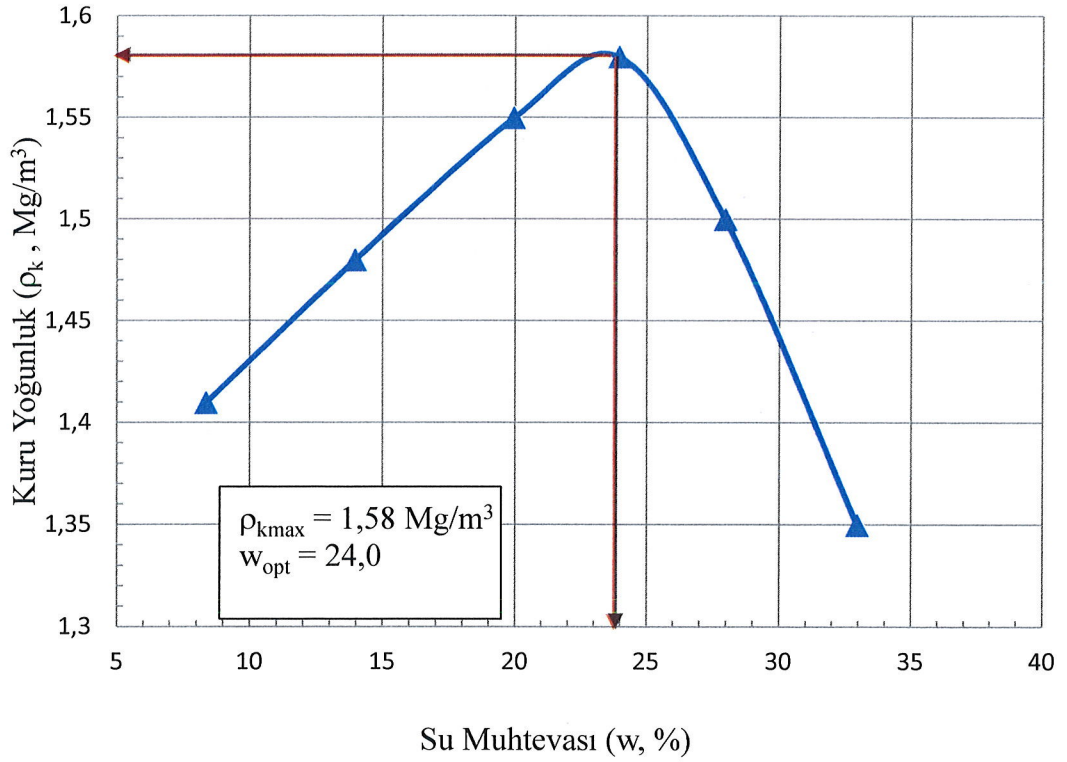
Ek-2 Şekil 2.1 Doğal zemin numunesinin kompaksiyon eğrisi



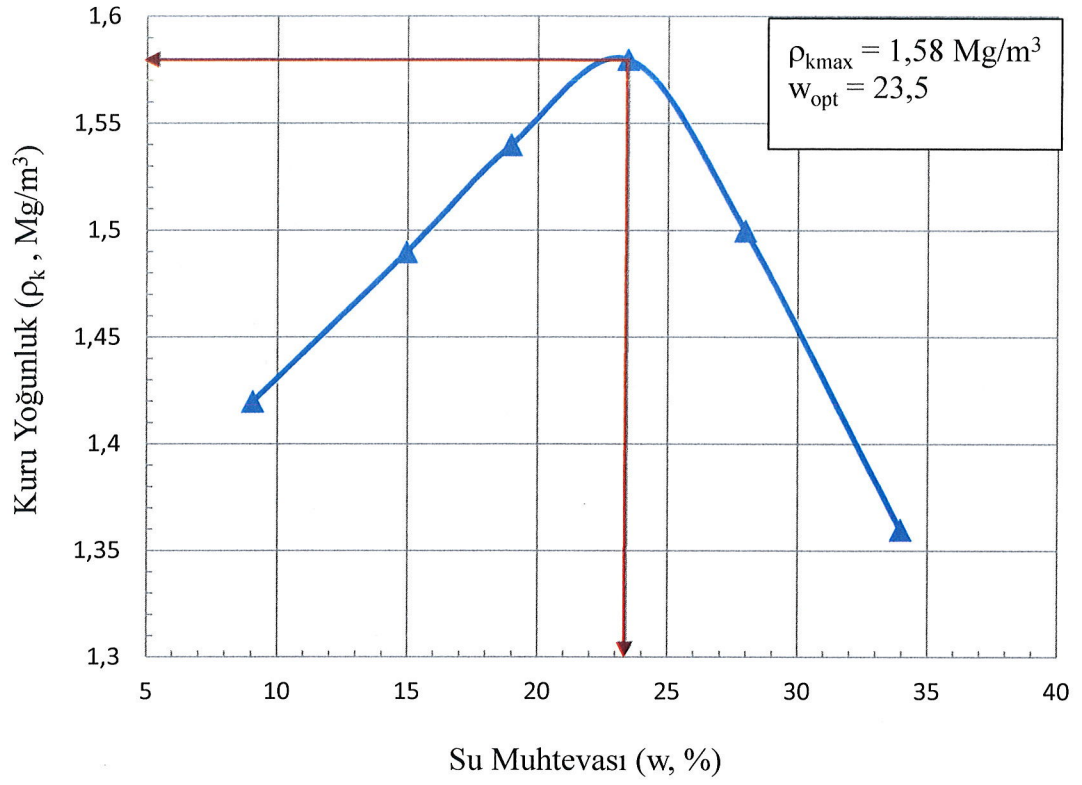
Ek-2 Şekil 2.2 SL numunesinin kompaksiyon eğrisi



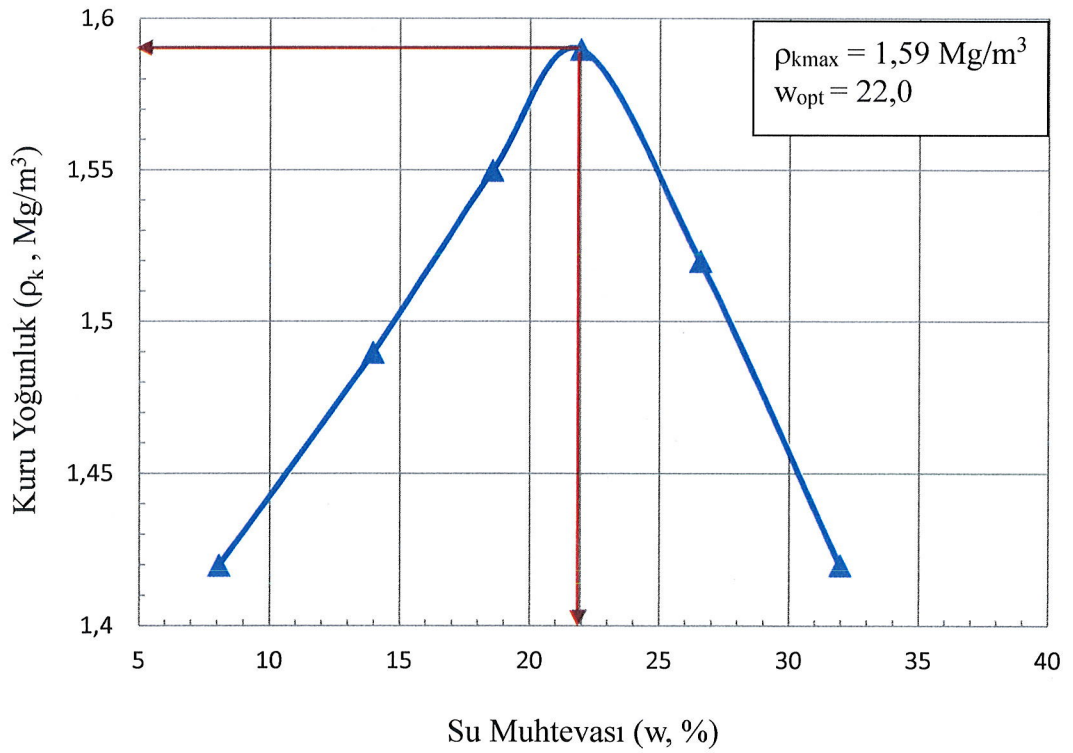
Ek-2 Şekil 2.3 SLP1/5 karışımının kompaksiyon eğrisi



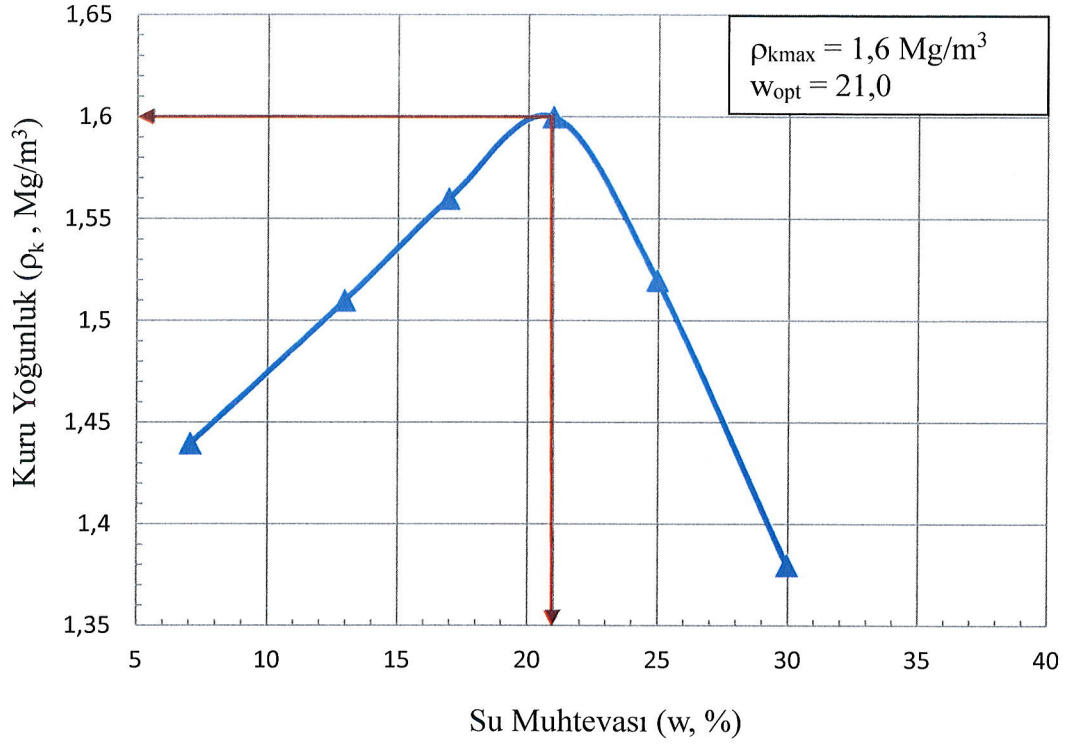
Ek-2 Şekil 2.4 SLP1/10 karışımının kompaksiyon eğrisi



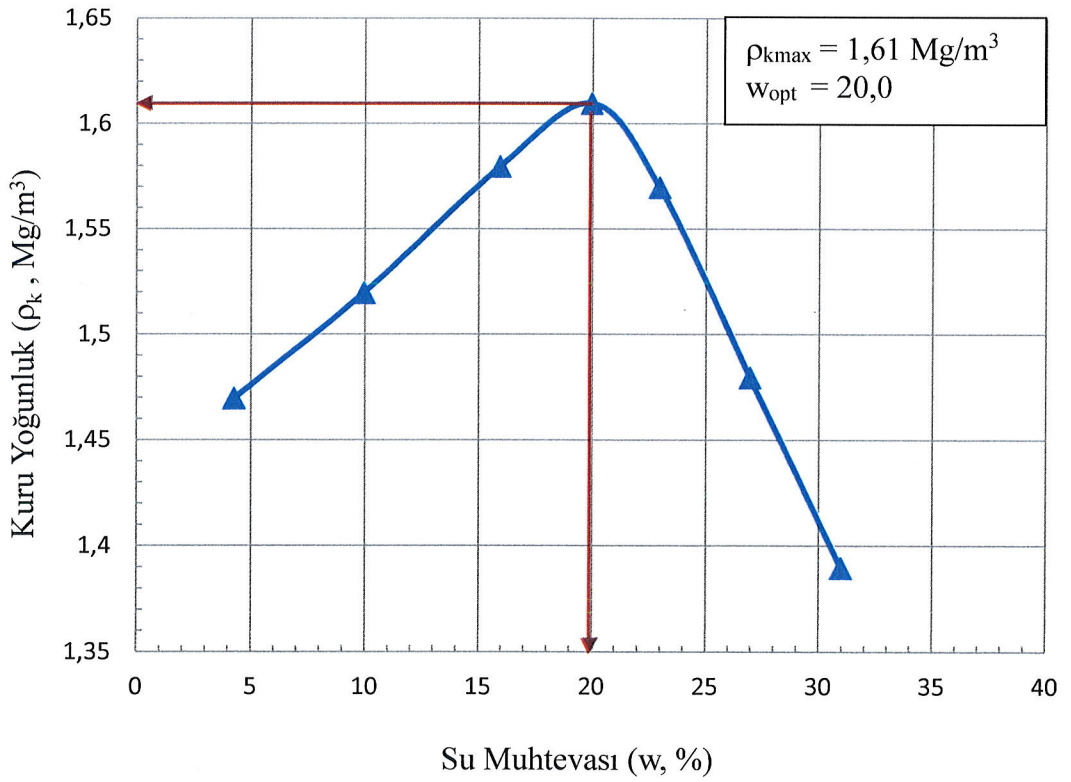
Ek-2 Şekil 2.5 SLP1/15 karışımının kompaksiyon eğrisi



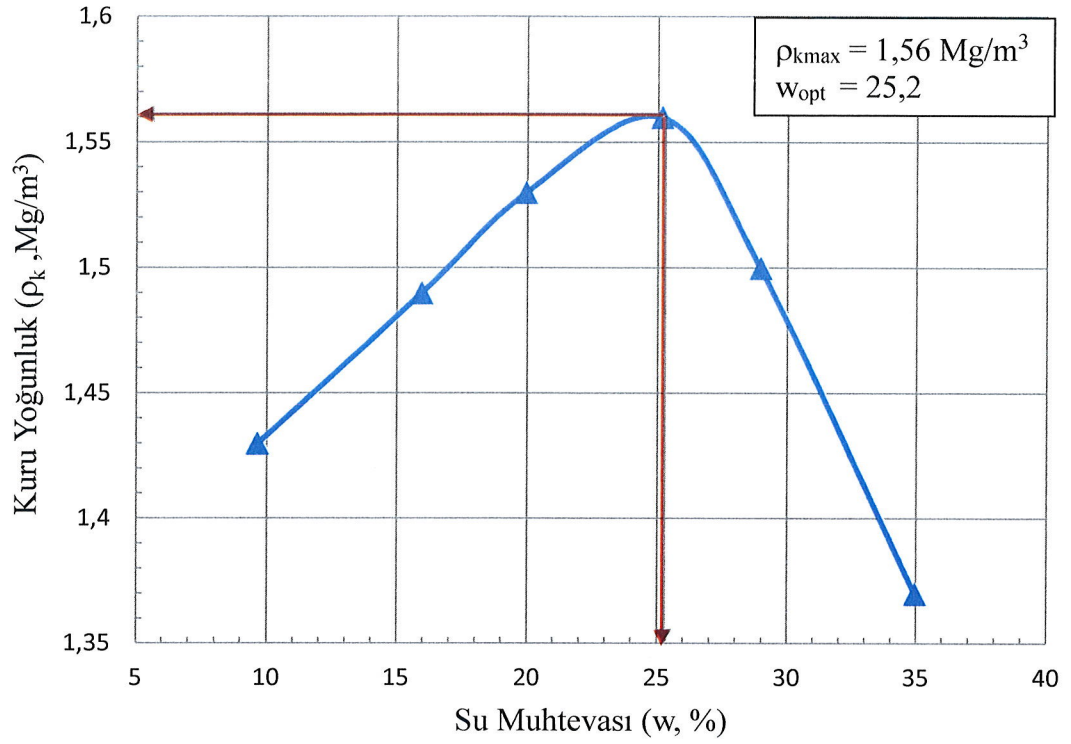
Ek-2 Şekil 2.6 SLP1/20 karışımının kompaksiyon eğrisi



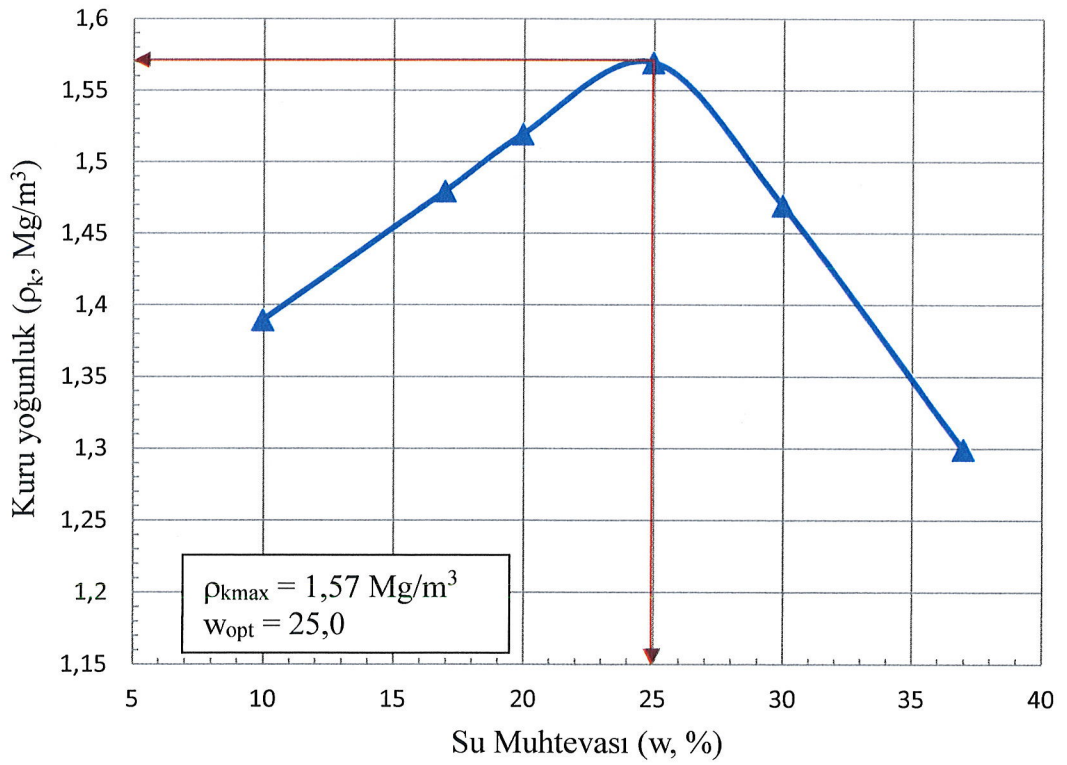
Ek-2 Şekil 2.7 SLP1/25 karışımının kompaksiyon eğrisi



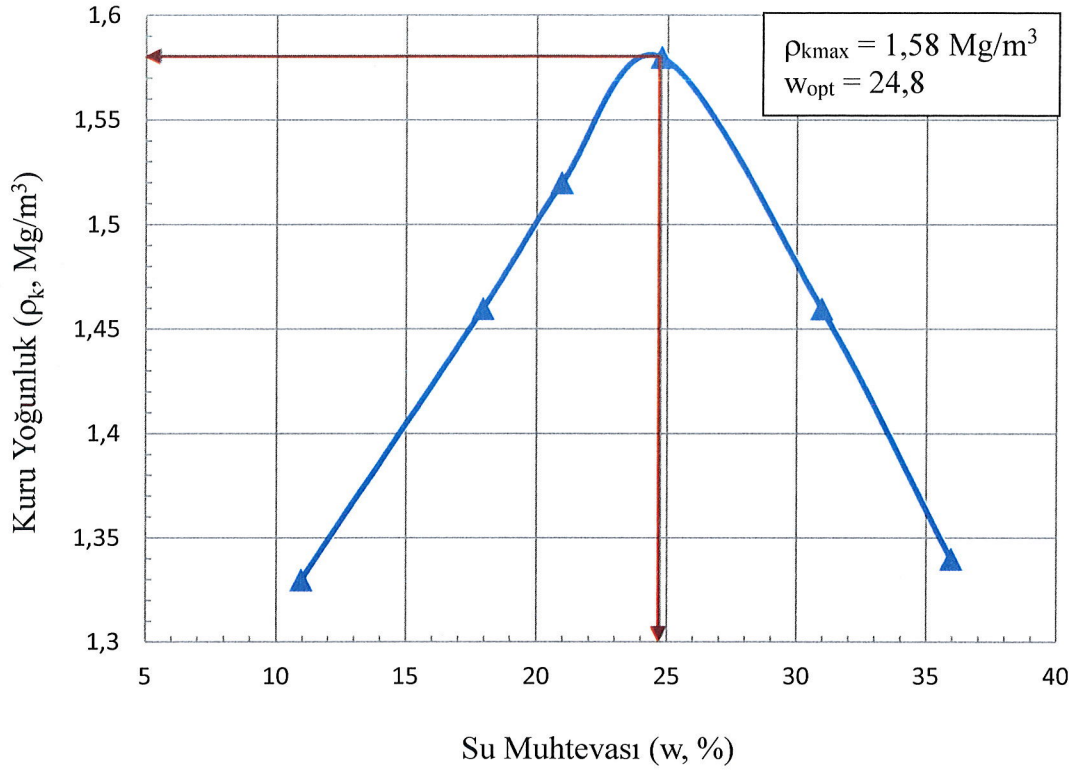
Ek-2 Şekil 2.8 SLP1/30 karışımının kompaksiyon eğrisi



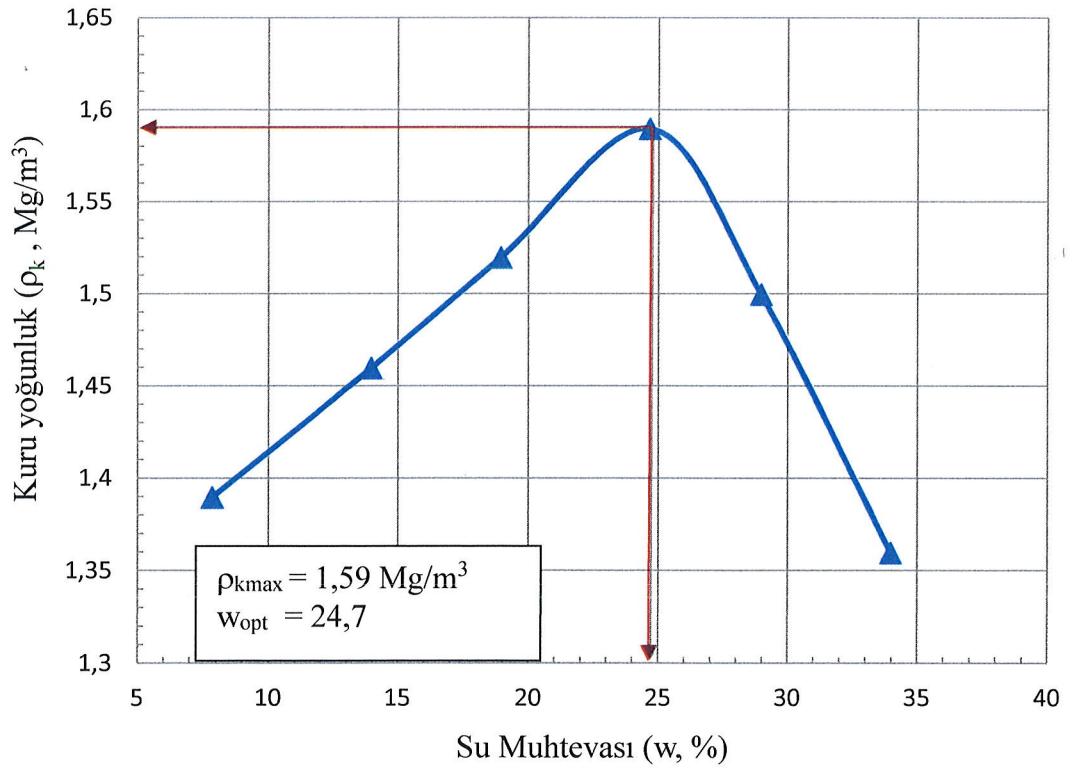
Ek-2 Şekil 2.9 SLP2/5 karışımının kompaksiyon eğrisi



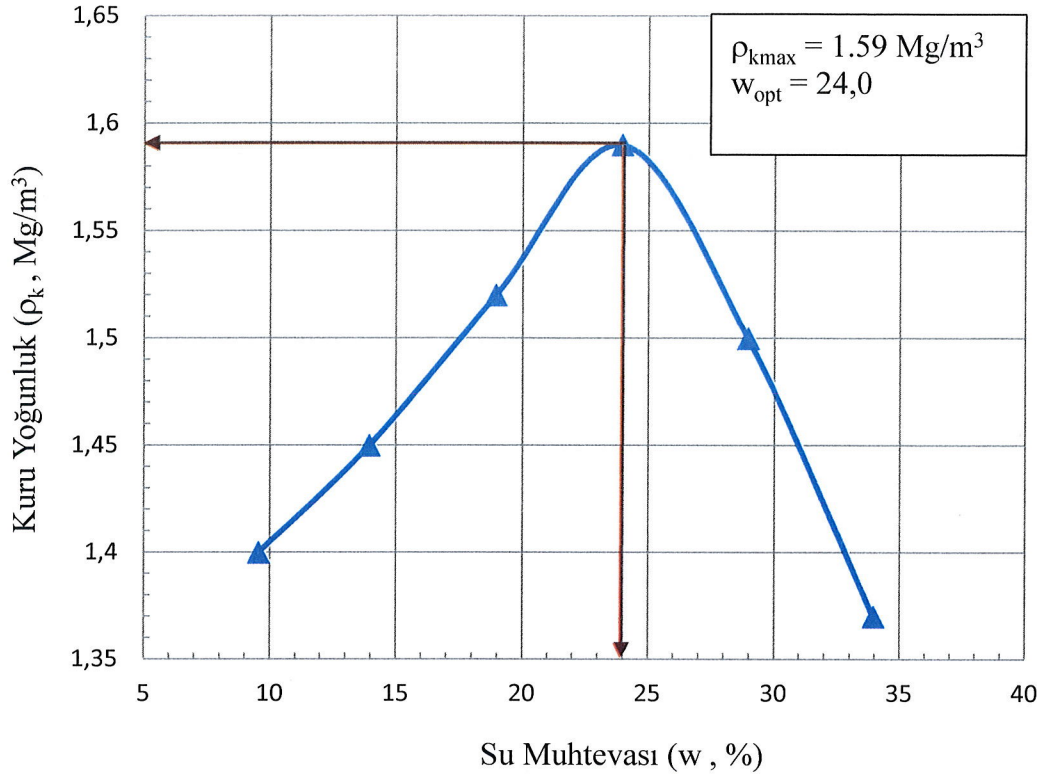
Ek-2 Şekil 2.10 SLP2/10 karışımının kompaksiyon eğrisi



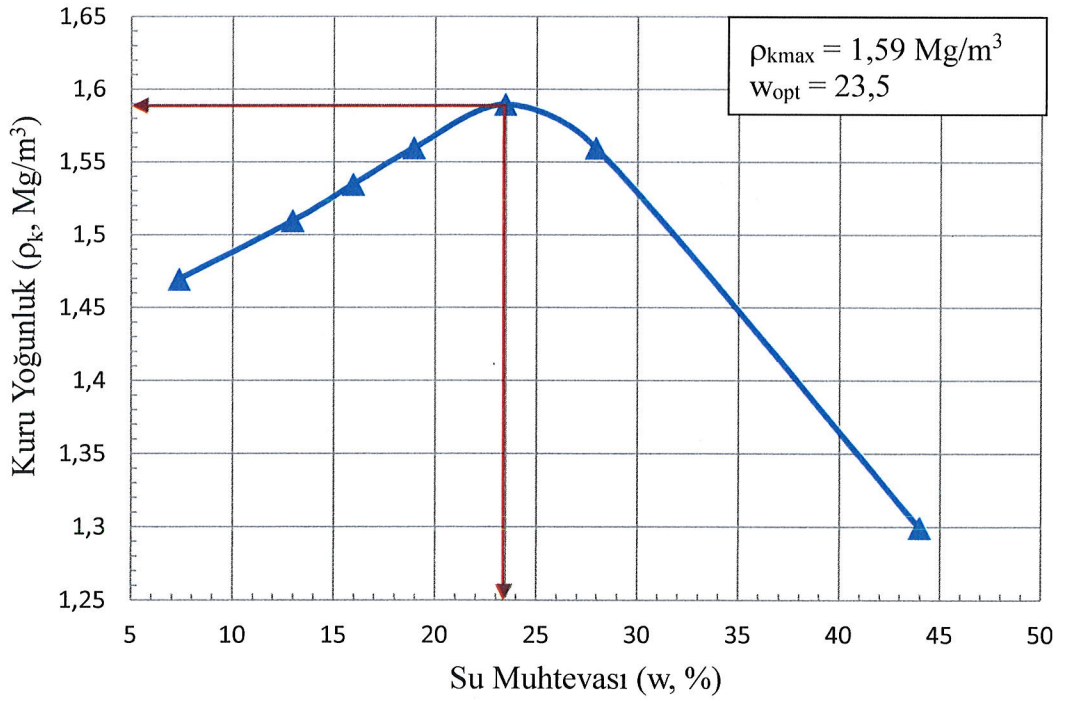
Ek-2 Şekil 2.11 SLP2/15 karışımının kompaksiyon eğrisi



Ek-2 Şekil 2.12 SLP2/20 karışımının kompaksiyon eğrisi



Ek-2 Şekil 2.13 SLP2/25 karışımının kompaksiyon eğrisi



Ek-2 Şekil 2.14 SLP2/30 karışımının kompaksiyon eğrisi

ÖZGEÇMİŞ



Duygu FİDAN

21.05.1991 yılında Trabzon'da doğdu. İlkokul ve ortaokulu Trabzon 24 Şubat İlköğretim Okulu'nda, lise öğrenimini Trabzon Yunus Emre Lisesi'nde tamamladı. Lisans eğitimine 2010 yılında Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde başladı. 2012-2013 güz yarıyılı akademik yılında Erasmus Programı ile İtalya'da bulunan Salerno Üniversitesi'nde eğitim gördü. Lisans öğrenimini 2014 yılında Bayburt Üniversitesi'nde tamamlayarak mezun oldu. 2014 yılında Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2015 yılında özel bir firma olan yapı denetim firmasında mühendis kontrol elemanı olarak bir süre çalıştı.