

**YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİL
STABİLİZASYONUNDA SİLİS DUMANI VE
MERMER ATIKLARININ KİREÇLE BERABER
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Ersin DEMİR

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ**

2019

(Her Hakkı Saklıdır)

T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİL STABİLİZASYONUNDA SİLİS DUMANI VE
MERMER ATIKLARININ KİREÇLE BERABER KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

(INVESTIGATION of THE USABILITY of SILICA FUME and MARBLE WASTES WITH
LIME in HIGH PLASTICITY CLAY STABILIZATION)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ersin DEMİR

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ

Bayburt
Temmuz-2019

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ danışmanlığında, 152004016 numaralı Ersin DEMİR tarafından hazırlanan “Yüksek Plastisiteli Kil Stabilizasyonunda Silis Dumanı ve Mermer Atıklarının Kireçle Beraber Kullanılabilirliğinin Araştırılması” adlı bu çalışma 26/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Bilim Dalı Programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU

İmza:

Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ

İmza:

Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Hakan Alper KAMILOĞLU

İmza:

Bu tezin Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

...../...../.....

Doç. Dr. Fatih GÜRBÜZ

Enstitü Müdürü

ETİK VE BİLDİRİM SAYFASI

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum ‘‘Yüksek Plastisiteli Kil Stabilizasyonunda Silis Dumanı ve Mermer Atıklarının Kireçle Beraber Kullanılabilirliğinin Araştırılması’’ başlıklı çalışmanın tarafımdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını ve yararlandığım eserleri kaynakçada gösterdiğimi beyan ederim.

26/07/2019



Ersin DEMİR

TEŞEKKÜR

Bu alıŐma kapsamındaki deneyler, Bayburt Üniversitesi ve Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarlarında yürütülmüŐtür.

ÇalıŐmam süresince her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen tez danıŐmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ'a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman ve her konuda beni asla yalnız bırakmayan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme Őükranlarımı sunarım.

ÖZ

Yüksek Lisans Tezi

YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİL STABİLİZASYONUNDA SİLİS DUMANI VE MERMER ATIKLARININ KİREÇLE BERABER KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Ersin DEMİR

Temmuz 2019, 90 sayfa

Zemin stabilizasyonu, mühendislik özellikleri bakımından yetersiz olan zeminlerin fiziksel, kimyasal, hidrolik ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi olarak tanımlanır. Bu çalışma kapsamında ferrosilisyum alaşımlarının ve silisyum metalinin üretiminde bir yan ürün olarak elde edilen endüstriyel atık olan silis dumanı ile mermer tozu killi bir zeminin stabilizasyonunda puzolonik katkı olarak kullanılmıştır. CaO oranı yüksek olan kireç birincil bağlayıcı olarak seçilmiştir.

Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre yüksek plastisiteli killi bir zeminin stabilizasyonunda kullanılan mermer tozu ve silis dumanı %0, %5, %10, %15, %20 doğal malzeme ile kireçsiz ve %6 kireçli (optimum kireç oranı) olarak karıştırılmıştır. Hazırlanan karışımların durabilite ve dayanım gibi geoteknik özellikleri detaylı olarak incelenmiştir.

İncelenen numunelerin dayanım değerlerinde silis dumanının kireçle beraber kullanıldığında doğal zemine, mermer tozuna ve sadece kireçli karışımlara göre daha yüksek çıktığı gözlemlenirken, durabilite özelliklerinde ise mermer tozunun daha etkin olduğu söylenilebilir.

Anahtar Kelimeler: Zemin stabilizasyonu, mermer tozu, silis dumanı, kireç, kil

ABSTRACT

MSc. Thesis

INVESTIGATION OF THE USABILITY OF SILICA FUME AND MARBLE WASTES WITH LIME IN HIGH PLASTICITY CLAY STABILIZATION

Ersin DEMİR

July 2019, 90 pages

Soil stabilization is defined as improving the physical, chemical, hydraulic and mechanical properties of soils that are insufficient in terms of engineering properties. In this study, lime with high CaO content was chosen as the primary binder, silica fume and marble powder were used as pozzolanic additives.

Natural soil is a high plasticity clay according to the Unified Soil Classification System. Marble powder and silica fume were mixed to this soil in 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, without lime and 6% lime (optimum lime ratio). Geotechnical properties of prepared mixtures such as strength and durability were examined in detail.

In the light of the obtained data, it was determined that SLS samples containing silica fume and lime had higher strength values than SLM samples containing marble powder and lime and SL samples containing only lime. High strength values up to 5 times have been achieved in lime-containing samples compared to lime-free samples. It was concluded that the samples containing marble powder had higher durability than the samples containing silica fume.

Keywords: Soil stabilization, marble dust, silica fume, lime, clay

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
TABLolar DİZİNİ.....	xiii
BİRİNCİ BÖLÜM.....	1
Giriş.....	1
Amaçlar.....	4
İKİNCİ BÖLÜM.....	5
Kaynak Özetleri.....	5
Zemin Stabilizasyon Yöntemleri.....	5
Mekanik stabilizasyon.....	9
Kimyasal stabilizasyon.....	9
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM.....	21
Materyal ve Yöntem.....	21
Materyal.....	21
Doğal malzeme.....	22
Yöntemler.....	24
Deneylerde referans alınan ASTM standartları.....	25
Zeminin sınıflandırılması.....	25
Kıvam limitleri.....	26
Kompaksiyon deneyi.....	29
Serbest basınç deneyi.....	31
Islanma-kuruma periyodu deneyi.....	32
Donma-çözülme çevrimi.....	33
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM.....	34
Bulgular.....	34
Deneylerden Elde Edilen Veriler.....	34
Kıvam limitleri.....	34
Kompaksiyon parametreleri.....	43
Serbest basınç dayanımları.....	49

Durabilite tetkikleri.....	56
BEŞİNCİ BÖLÜM	68
Sonuç, Tartışma ve Öneriler	68
KAYNAKLAR.....	70
EKLER.....	73
Ek-1. Düşen koni penetrasyon deneyi sonuçları.....	73
Ek-2. Kompaksiyon deneyi sonuçları	82
ÖZGEÇMİŞ.....	91

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

°	: Derece
°C	: Santigrat derece
A	: Aktivite
AASHTO	: Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği
ASCE	: Amerika İnşaat Mühendisleri Derneği
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
CAH	: Kalsiyum Alümina Hidrate
CBR	: Kaliforniya taşıma oranı
CH	: Yüksek Plastisiteli Kil
CL	: Düşük Plastisiteli Kil
CPT	: Koni penetrasyon deneyi
cm ²	: Santimetrekare
cm ³	: Santimetreküp
CSH	: Kalsiyum Silika Hidrate
GC	: Killi çakıl
GM	: Siltli çakıl
GP	: Kötü derecelenmiş çakıl
GW	: İyi derecelenmiş çakıl
Gs	: Özgül ağırlık
K-Ç-P	: Kireç, çimento, puzolan birleşimi
kPa	: Kilopaskal
LL	: Likit limit
m ³	: Metreküp
Mg	: Megagram
MH	: Yüksek plastisiteli inorganik silt
ML	: Düşük plastisiteli inorganik silt
mm	: Milimetre
P	: Ağırlıkça elekten geçen malzeme yüzdesi
pH	: Hidrojen gücü
PI	: Plastisite indisi
PL	: Plastik limit
S	: Doğal zemin
SL	: Doğal zemin, kireç karışımı

SLM	: Doğal zemin, kireç, mermer tozu karışımı
SLS	: Doğal zemin, kireç, silis dumanı karışımı
SM	: Siltli kum
Sn	: Saniye
SP	: Kötü derecelenmiş kum
SPT	: Standart penetrasyon deneyi
SW	: İyi derecelenmiş kum
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
w	: Su muhtevası
w _{opt}	: Optimum su muhtevası
μ	: Mikro
μm	: Mikrometre
ρ _k	: Kuru yoğunluk
ρ _{kmax}	: Maksimum kuru yoğunluk

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Zemin stabilizasyon yöntemleri (Uzuner, 2013).	2
Şekil 2. Zemin türlerine göre zemin stabilizasyon yöntemlerinin belirlenmesi (Mitchell, & Gallagher, 1998).	3
Şekil 3. Zemin üçgen gradasyonu (Tunç, 2001).	10
Şekil 4. Puzolanların doğal ve yapay sınıflandırılması (Ün, 2007).	16
Şekil 5. Silis dumanının elektrik-ark fırınından oluşumu (Azevedo, 2001).	20
Şekil 6. Doğal malzemenin alındığı Demirözü ilçesinin konumu.	23
Şekil 7. Doğal malzemenin dane boyutu dağılım eğrisi.	23
Şekil 8. Birleşik zemin sınıflandırma sistemi.	26
Şekil 9. Plastisite kartı.	26
Şekil 10. Deneyde kullanılan malzemeler.	28
Şekil 11. Hacim-su muhtevası grafiği.	29
Şekil 12. Standart kompaksiyon deney görüntüsü.	30
Şekil 13. Serbest basınç deneyine ait görüntüler.	31
Şekil 14. Islanma-kuruma periyodu deneyi.	32
Şekil 15. Donma-çözülme deneyine ait görüntü.	33
Şekil 16. SM karışımlarına ait likit limitler.	37
Şekil 17. SS karışımlarına ait likit limitler.	37
Şekil 18. SLM karışımlarına ait likit limitler.	38
Şekil 19. SLS karışımlarına ait likit limitler.	38
Şekil 20. SM karışımlarına ait plastik limitler.	39
Şekil 21. SS karışımlarına ait plastik limitler.	39
Şekil 22. SLM karışımlarına ait plastik limitler.	40
Şekil 23. SLS karışımlarına ait plastik limitler.	40
Şekil 24. SM karışımlarına ait plastisite indisleri.	41
Şekil 25. SS karışımlarına ait plastisite indisleri.	41
Şekil 26. SLM karışımlarına ait plastisite indisleri.	42
Şekil 27. SLS karışımlarına ait plastisite indisleri.	42
Şekil 28. SM karışımlarının optimum su içerikleri.	45
Şekil 29. SS karışımlarının optimum su içerikleri.	45
Şekil 30. SLM karışımlarının optimum su içerikleri.	46
Şekil 31. SLS karışımlarının optimum su içerikleri.	46
Şekil 32. SM karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları.	47

Şekil 33. SS karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları.....	47
Şekil 34. SLM karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları.	48
Şekil 35. SLS karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları.	48
Şekil 36. Tek eksenli serbest basınç dayanım testi.....	51
Şekil 37. Kireçli numunelerin serbest basınç dayanımı testi altındaki görüntüsü.	51
Şekil 38. Kirecsiz numunelerin serbest basınç dayanımı testi altındaki görüntüsü.....	51
Şekil 39. SS karışımlarının 7 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları.	52
Şekil 40. SM karışımlarının 7 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları.....	52
Şekil 41. SLS karışımlarının 7 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları.	53
Şekil 42. SLM karışımlarının 7 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları.	53
Şekil 43. SS karışımlarının 28 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları.....	54
Şekil 44. SM karışımlarının 28 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları.....	54
Şekil 45. SLS karışımlarının 28 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları.	55
Şekil 46. SLM karışımlarının 28 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları.	55
Şekil 47. İslanma-kuruma çevrimine ait görüntü.....	57
Şekil 48. Silis dumanı içeren numunelerin ıslanma-kuruma çevrimine ait görüntüsü.	57
Şekil 49. Silis dumanı içeren numunelerin 12 gün çevriminin sonuna ait görüntüsü.	58
Şekil 50. Mermer tozu içeren numunelerin 12 gün çevriminin sonuna ait görüntüsü.....	58
Şekil 51. S ve SS numunelerinin çevrim süresi grafiği.	59
Şekil 52. S, SL ve SLS numunelerinin çevrim süresi grafiği.	59
Şekil 53. S ve SM numunelerinin çevrim süresi grafiği.	60
Şekil 54. S, SL ve SLM numunelerinin çevrim süresi grafiği.....	60
Şekil 55. Donma-çözülme çevrimine ait görüntü.	62
Şekil 56. SS karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımları.	64
Şekil 57. SM karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımları.	64
Şekil 58. SLS karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımları.	65
Şekil 59. SLM karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımları.	65
Şekil 60. SS karışımlarının 28 günlük serbest basınç ve donma-çözülme sonrası serbest basınç değişim yüzdesi.....	66
Şekil 61. SM karışımlarının 28 günlük serbest basınç ve donma-çözülme sonrası serbest basınç değişim yüzdesi.	66

<i>Şekil 62.</i> SLS karışımlarının 28 günlük serbest basınç ve donma-çözülme sonrası serbest basınç değişim yüzdesi.	67
<i>Şekil 63.</i> SLM karışımlarının 28 günlük serbest basınç ve donma-çözülme sonrası serbest basınç değişim yüzdesi.	67

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Zemin Cinslerine Göre Stabilizasyon Yöntemleri (Hunt, 1984)	6
Tablo 2. Zeminin Stabilizasyon Amacına Göre Uygulanacak İyileştirme Yöntemleri	7
Tablo 3. Zemin Stabilizasyonunda Yaklaşık Maliyet Çizelgesi (U.S. Army Corps. of Eng., 2003)	8
Tablo 4. Zemin Stabilizasyonunda Katkı Seçimi (U.S Army Corps. Of Eng., 2003).....	11
Tablo 5. Zemin Çeşitlerine Göre Yaklaşık Kireç Oranları (Nelson, & Debora, 1992)	12
Tablo 6. Zemin Çeşitlerine Göre Optimum Kireç Oranları (Tunç, 2002)	12
Tablo 7. Farklı Zemin Sınıflarına Göre Çimento Oranları (Tunç, 2002)	14
Tablo 8. Doğal Puzolanların Sınıflanması (Cook, 1986).....	15
Tablo 9. Doğal Puzolanlara Ait Kimyasal Bileşimlerindeki Oksit Oranları (Erdoğan, 2003)	17
Tablo 10. Uçucu Kül Ve Taban Külünün Kimyasal Bileşim Oranları (Alataş, 1996)	17
Tablo 11. Türkiye 'deki Termik Santraller (Tokyay, & Erdoğan, 1998).....	18
Tablo 12. Yüksek Fırın Cürufunun Yapısındaki Kimyasalların Ülkelere Göre Oranları (Erdoğan, 2003)	19
Tablo 13. Silis Dumanı Kimyasallarının Ülkelere Göre Oranı (Erdoğan, 2003).....	20
Tablo 14. Deney Numuneleriyle İlgili Notasyonlar	22
Tablo 15. Doğal Zeminin Özellikleri.....	24
Tablo 16. Kirecin Analiz Sonuçları	24
Tablo 17. Deneylerde Referans Alınan Standartlar	25
Tablo 18. Deneydeki Numunelere Ait Kıvam Limit Değerleri	35
Tablo 19. Kireç İlavesiz Numunelerin Kompaksiyon Parametreleri	44
Tablo 20. Kireç İlaveli Numunelerin Kompaksiyon Parametreleri	44
Tablo 21. Kireç İlavesiz Karışımlara Ait Tek Eksenli Basınç Dayanımı Sonuçları.....	50
Tablo 22. Kireç İlaveli Karışımlara Ait Tek Eksenli Basınç Dayanımı Sonuçları.....	50
Tablo 23. Kireç İlavesiz Numunelerin Donma-Çözülme Periyodu Sonrası Tek Eksenli Basınç Dayanım Sonuçları	63
Tablo 24. Kireç İlaveli Numunelerin Donma-Çözülme Periyodu Sonrası Tek Eksenli Basınç Dayanım Sonuçları	63

BİRİNCİ BÖLÜM

Giriş

Zemin; kayaların mekanik ve kimyasal ayrışması sonucu meydana gelen, yük altında şekil değiştirmeler gösteren ve içinde organik maddeler içerebilen doğal malzemelerdir. Zemin mekaniği, hidrolik ve mekanik alandaki kurallar ve yöntemlerle çalışarak zeminlerin davranış özelliklerini inceleyen bilim dalıdır.

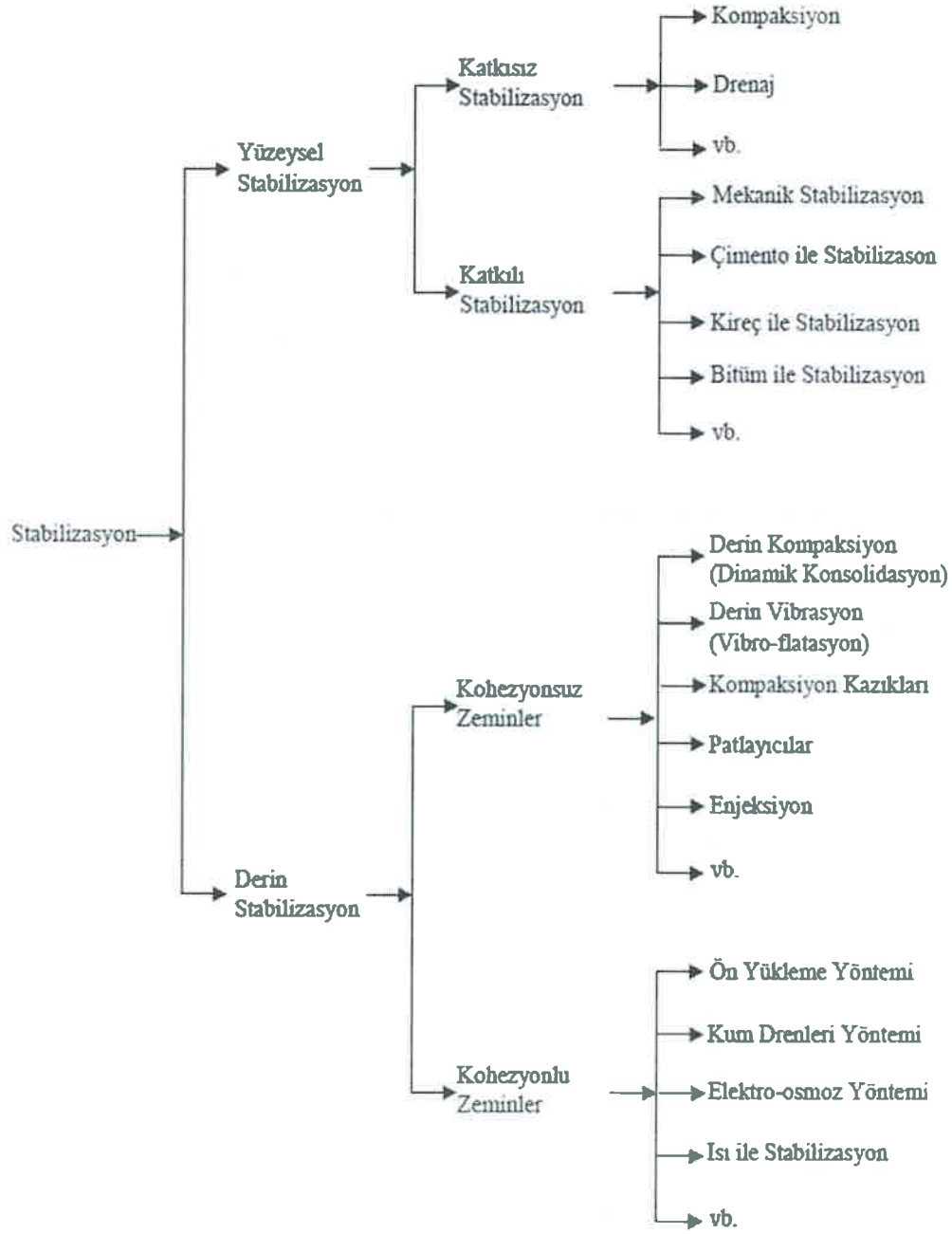
Stabilizasyon, mühendislik uygulamaları kullanılarak zeminin fiziksel özelliklerinin değiştirilerek iyileştirilmesidir. Zemin özelliklerinin iyileştirilmesi üç grupta değerlendirilebilir.

- Yeraltı su seviyesinin düşürülmesi, ısıtma işlemleri gibi zemini geçici olarak iyileştirme.
- Patlama ile sıkıştırma, yüzey kompaksiyonu ve dinamik konsolidasyon yöntemleri ile zemine başka bir malzeme eklemeyen kalıcı olarak iyileştirme.
- Kireç, çimento, uçucu kül gibi katkı maddeleri ile zemini kalıcı olarak iyileştirme.

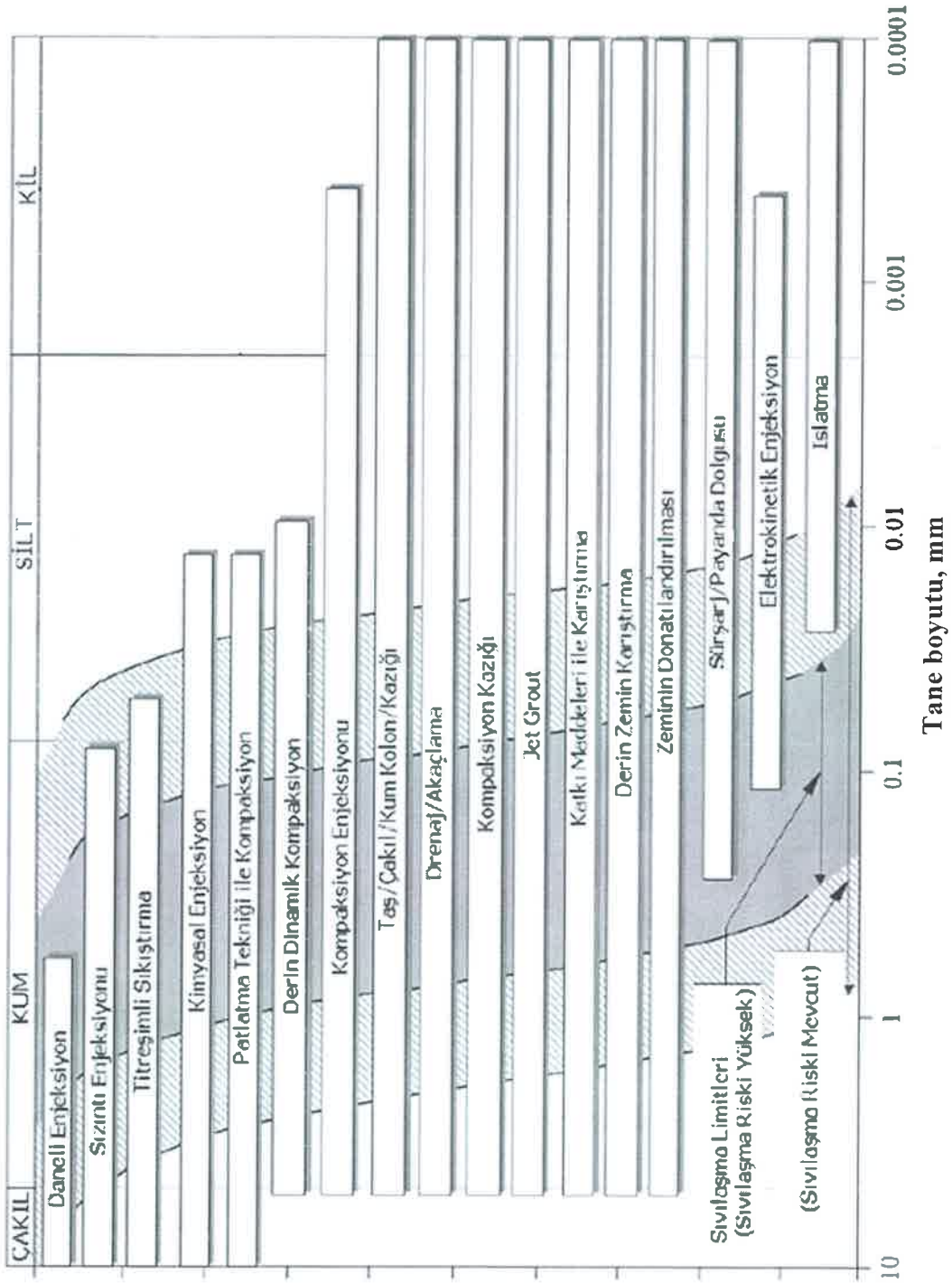
Zemin iyileştirme yöntemlerindeki esas amaç, mühendislik özellikleri bakımından zayıf olan zeminlerin mukavemet, dayanım, durabilite ve permeabilite gibi özelliklerinin iyileştirilmesidir. Mühendislik özellikleri bakımından yetersiz olan zeminlerin ortaya çıkaracağı problemlerin çözümünde kullanılacak yöntemler şunlardır;

- İstenmeyen zeminin kazınarak taşınarak yerine uygun özellikteki zemini koyma,
- Üst yapı projesinde kullanılan malzemenin kalitesinin artırılması ve yapısal elemanlarının ebatlarının değiştirilmesi,
- Zeminin mevcut kısmının mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi (Balta, 1984).

Zemin ıslah yöntemleri Uzuner'e (2013) göre Şekil 1'de, Mitchell ve Gallagher'e (1998) göre zemin türlerine göre zemin stabilizasyon yöntemleri Şekil 2'deki gibi verilmiştir.



Şekil 1. Zemin stabilizasyon yöntemleri (Uzuner, 2013).



Şekil 2. Zemin türlerine göre zemin stabilizasyon yöntemlerinin belirlenmesi (Mitchell, & Gallagher, 1998).

Kireç doğada fazla miktarda bulunmasından ve maliyeti çok düşük olduğundan dolayı zemin stabilizasyonlarında tercih edilen malzemedir. Puzolanlar, ortam sıcaklığındaki sulu ortamlarda genellikle kireçle birleşerek bağlayıcılık özelliği kazanan malzemelerdir (Yılmaz, 2015). Kireçle stabilizasyonunda genellikle zeminin kuru ağırlığının %5-10'u oranında kireç katılır (Uzuner, 2013).

Silis dumanı, çok ince taneli ve amorf yapıya sahip bir malzeme olmasından dolayı aynı zamanda yüksek oranda SiO₂ içermesinden dolayı harika puzolonik özelliğe sahip

malzemedir (Erdoğan, 2003). Silis dumanı genellikle gri renktedir. İçerisindeki karbon oranı arttıkça renk koyulaşmaktadır. Hatta su ile karıştırıldığında rengi siyaha dönüşmektedir (Malhotra, 1997).

Mermer, başkalaşım süreci geçiren dolomit ve kalker gibi karbonat içerikli kayalara denilmektedir. Yapısında yüksek miktarda CaCO_3 (kalsiyum karbonat) içeren kayalardır. Mermer, saf kalsiyum karbonat bileşimde olduğunda karşımıza beyaz ve yarı saydam olarak çıkar. Renkleri genellikle beyaz yada gridir. Yapısındaki yabancı maddelerin etkisiyle kırmızı, sarı, siyah gibi renklerle de bulunabilir (Yorulmaz, 2018).

Mermer tozu taneciklerinin çok küçük yapıya sahip olması ve kireçle benzerlik göstermesinden dolayı ince daneli zeminlerin iyileştirilmesinde kireç yerine tercih edilebilir (Zorluer, & Usta, 2003).

Amaçlar

Bu çalışmanın amacı, mermer tozunun ve silis dumanının tek başına ve kireçle birlikte zemin stabilizasyonunda kullanılması sonucunda, zeminin mühendislik özelliklerinin (dayanım, durabilite vs.) değişimlerinin araştırılmasıdır. Çalışma kapsamında serbest basınç, donma-çözülme ve ıslanma kuruma deneyleri için toplamda 180 tane numune hazırlanmıştır. Hazırlanmış numunelere 7 ve 28 günlük kür uygulandıktan sonra serbest basınç deneyi Amerikan Test ve Malzeme Kurumu D 2166 (2006) standardına uygun yapılarak, dayanım değerleri belirlenmiş ve hangi oranda kullanılan numunenin daha yüksek sonuçlar ortaya koyduğu araştırılmıştır. Hazırlanan numunelere ıslanma-kuruma ve donma-çözünme deneyleri uygulanarak numunelerin durabilite davranışları incelenmiştir.

İKİNCİ BÖLÜM

Kaynak Özetleri

Zemin Stabilizasyon Yöntemleri

Zeminin cinsine ve amacına göre stabilizasyon çalışmaları farklılık gösterir. Zemin cinslerine göre stabilizasyon yöntemleri Hunt'a (1984) göre Tablo 1'de, stabilizasyon amacına göre zemin iyileştirme yöntemleri ise Tablo 2.'de gösterilmiştir (U.S. Army Corps. of Eng., 2003).

Kimyasal iyileştirme, zemine belirli oranlarda katkıları katılarak kimyasal reaksiyon yaptırılıp zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi işlemleridir (Lambe, Khosla, & Jayaratne, 1990). Mekanik iyileştirme ise zeminlerin fiziksel, mekanik ve hidrolik özelliklerini fiziksel işlemler kullanılarak iyileştirilmesi işlemidir.

Zemin stabilizasyonunda hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın elde edilen sonuçları sahada standart penetrasyon deneyi (SPT) ve koni penetrasyon deneyi (CPT) ile kontrol edilmelidir. İstenilen özellikte veriler elde edilene kadar stabilizasyon işlemleri farklı şekillerde tekrarlanmalıdır (Kayabalı, 2010).

Tablo 1. *Zemin Cinslerine Göre Stabilizasyon Yöntemleri (Hunt, 1984)*

Zemin cinsleri		Stabilizasyon yöntemleri
Çeşitli dolgular	Sığ	Kazı/Geri dolgu
	Derin	Dinamik kompaksiyon, kum kolonlar
Organik zeminler	Sığ	Kazı/Geri dolgu, geotekstil
	Derin	Sürşarj, geotekstil, kum kolonlar
	Tabakalı	Sürşarj, patlatma tekniği, dinamik kompaksiyon, kompaksiyon enjeksiyonu, kum kolonlar, taş kolonlar
Yumuşak killer	Sığ	Kazı/Geri dolgu, geotekstil
	Derin	Sürşarj, geotekstil, kum veya kireç kolonlar
	Tabakalı	Sürşarj, dinamik kompaksiyon, kompaksiyon enjeksiyonu, kum veya kireç kolonlar
Killer		Mekanik stabilizasyon, kireç stabilizasyonu, termal (dondurma), elektro-osmoz, geosentetik, drenaj
Gevşek siltler	Sığ	Kazı/Geri dolgu, tuz katkısı
	Derin	Dinamik kompaksiyon, sürşarj, taş kolonlar, elektro-osmoz, vakum kuyuları
Gevşek kumlar	Sığ	Çimento veya bitüm stabilizasyonu, dinamik kompaksiyon
	Derin	Vibroflatasyon, vibrokompaksiyon, dinamik kompaksiyon, taş kolonlar, drenaj kuyuları, termal (dondurma)
Sıvılaşılabilen zeminler		Dinamik kompaksiyon, enjeksiyon, taş kolonlar, drenaj
Şişen zeminler		Kireç stabilizasyonu, drenaj, çimento, uçucu kül, tuz, kimyasal katkıları
Çatlaklı kayalar		Enjeksiyon, ankraj, şatkrit, yüzey altı yatay drenaj

Tablo 2. Zeminin Stabilizasyon Amacına Göre Uygulanacak İyileştirme Yöntemleri

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

Derin zemin karıştırılması yöntemi gibi maliyetin yüksek olduğu çalışmaların yanı sıra düşey drenler gibi maliyetin az olduğu çalışmalarda mevcuttur. Tablo 3.'de zemin stabilizasyonlarında yaklaşık maliyet tablosu sunulmaktadır (U.S. Army Corps. of Eng., 2003).

Tablo 3. Zemin Stabilizasyonunda Yaklaşık Maliyet Çizelgesi (U.S. Army Corps. of Eng., 2003)

Metodlar	Göreceli Maliyet	\$/m	\$/ m ²	\$/ m ³	Referans
Derin dinamik kompaksiyon	Düşük	-	8-32	5	
Vibrokompaksiyon	Düşük-Orta	Arka dolgusuz 15, Granüler arka dolgulu 25	-	1-4	FHWA (1998)
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 300-200, Kazı sahasının desteklenmesi 95-650	-	-	
Zemin çivileri	Orta-Yüksek	-	Geçici 165-775, Sürekli 160-400	-	FHWA (1998)
Kompaksiyon enjeksiyon	Düşük-Orta	-	-	5-50	
Derin zemin karıştırılması	Yüksek-Çok yüksek	-	-	100-150	
Kimyasal enjeksiyon	Yüksek	-	-	150-400	Hayward (1996)
Bioteknik stabilizasyon	Uygulamaya bağlı	Bitkilendirilmiş geogridler 40-100	Şevi ağ şeklindesaran 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)

Mekanik stabilizasyon.

Mekanik stabilizasyon, herhangi bir kimyasal maddeyi zemine karıştırmadan ve kimyasal reaksiyon meydana gelmeden kompaksiyon veya sıkıştırma yöntemleri kullanılarak zemin özelliklerinin istenilen hale getirilmesidir (Aytekin, 2004).

Zemin iyileştirmesi yapılırken, kendi aralarında farklı özelliklere sahip zeminlerin karışımının homojen olması gerekmektedir. Mekanik iyileştirmenin amacı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

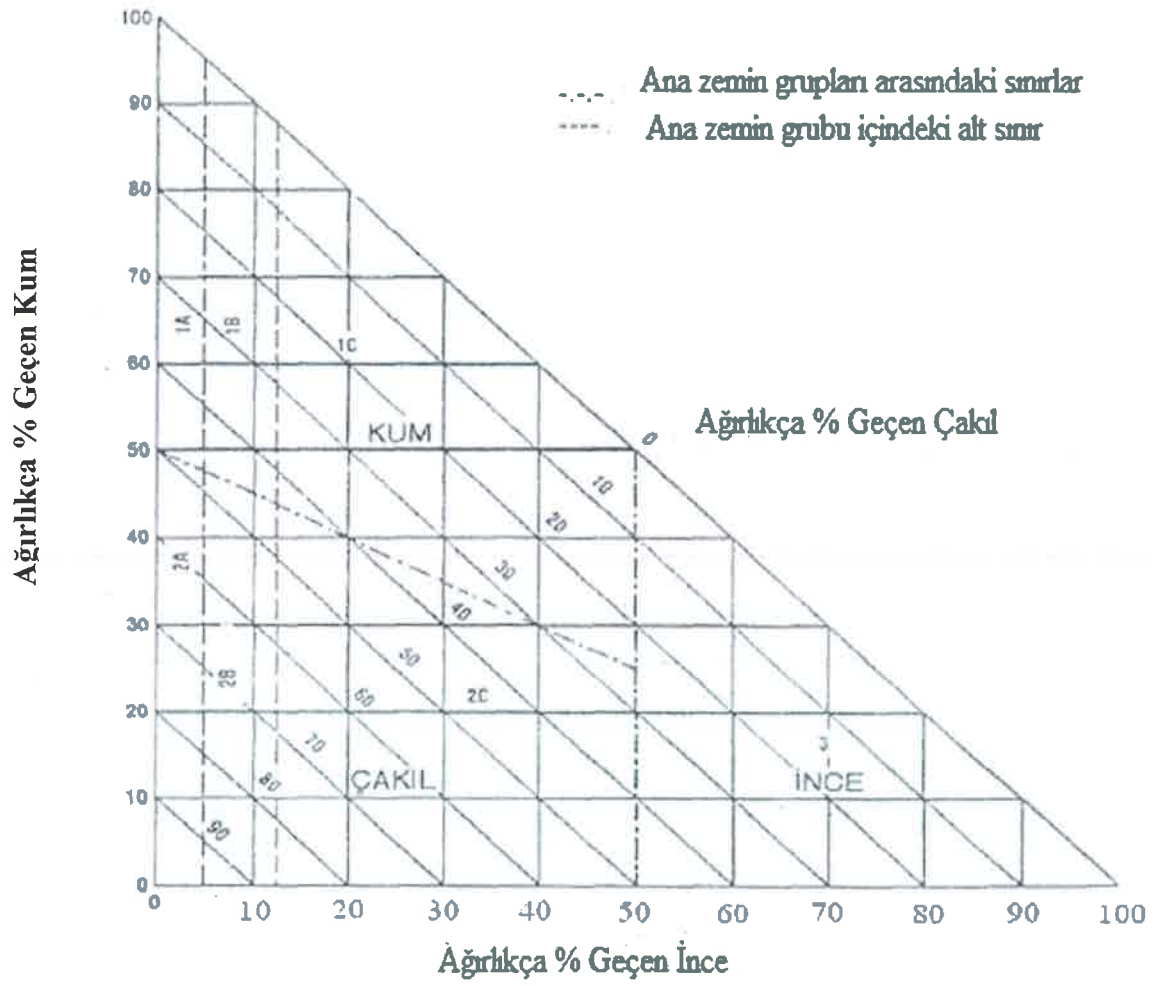
- Gradasyonların düzeltilmesi,
- Drenaj özelliklerinin yükseltilmesi,
- Kapileritenin düşürülmesi,
- Plastisite indisi ve likit limit değerlerinin azaltılması,
- Durabilite ve dayanım değerlerinin yükseltilmesi (Winterkorn, & Fang, 1975).

Kimyasal stabilizasyon.

Kimyasal iyileştirme, zemine farklı katkı maddeleri karıştırıldığında ortaya çıkan kimyasal reaksiyonların sonucunda zeminin özelliklerinde iyileşme meydana gelir bu iyileştirmeye kimyasal stabilizasyon denilmektedir (Aytekin, 2004).

Kimyasal iyileştirme yöntemi zemin stabilizasyonlarında uygulanan en ekonomik ve en uygun yöntemdir (Kukko, 2000). Kimyasal iyileştirme oturmaları, aşınabilirliği, permeabiliteyi ve meydana gelebilecek deformasyonları azaltma olduğu gibi aynı zamanda dayanımı ve durabiliteyi arttırmayı amaçlar.

Şekil 3’de zeminin ufalanma özellikleri göze alınarak hazırlanan üçgen gradasyonu verilmiştir. Buna göre zeminin ufalanma özelliği belirlenir ve en uygun stabilizör cinsi seçilir.



Şekil 3. Zemin üçgen gradasyonu (Tunç, 2001).

Kimyasal iyileştirmede katkı maddesi seçimini U.S Army Corps. Of Eng. (2003) tarafından hazırlanan Tablo 4.'den faydalanılarak bulabiliriz.

Tablo 4. Zemin Stabilizasyonunda Katkı Seçimi (U.S Army Corps. Of Eng., 2003)

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

*K-Ç-P: Kireç, çimentove puzolan birleşimi

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

Kireç ile zemin stabilizasyonu.

Zeminlerin mühendislik özelliklerinin geliştirilmesinde kireç kullanımı özellikle killi zeminlerde oldukça önemlidir. Havaalanı ve karayolu kaplamalarında kireçle iyileştirme en çok uygulanan yöntemlerdendir (Tunç, 2002).

Kireç, killi zeminlere uygulandığında zeminin plastisite indisini düşürdüğü tespit edilmiştir (Uzuner, 2013). Aynı zamanda zemine karıştırılan kireç oranı ne kadar artarsa likit limit değerinde azalma meydana gelirken, plastik limit değerinde ise yükselme meydana gelir (Aytekin, 2004).

Zemin cinsine göre uygulanması gereken kireç oranları Nelson ve Debora (1992) tarafından hazırlanan Tablo 5.'te verilmiştir. Zemin çeşitlerine göre uygulanan optimum kireç miktarları ise Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 5. *Zemin Çeşitlerine Göre Yaklaşık Kireç Oranları (Nelson, & 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

Tablo 6. *Zemin Çeşitlerine Göre Optimum Kireç Oranları (Tunç, 2002)*

Zemin türü	Kireç miktarı, kuru zeminin ağırlıkça yüzdesi
İyi derecelenmiş killi çakıl	3
Organik zeminler	Tavsiye edilmez.
Kumlu kil	5
Siltli kil	2-4
Plastik kil	3-8
Yüksek plastisiteli kil	3-10
Kumlar	Tavsiye edilmez.

Tablodaki veriler ışığında, organik zeminler ve bünyesinde kil bulundurmayan zeminleri kireçle iyileştirme uygun bir yöntem değildir (Tunç, 2002).

Kireçle iyileştirme sonucunda zeminin geoteknik özellikleri incelendiğinde mevcut zeminin plastisite indisinin düştüğü, plastik limit, serbest basınç mukavemeti, kayma mukavemeti ve don etkisine karşı olan direncin arttığı gözlemlenir.

Zemin iyileştirmelerinde CaO (sönmemiş kireç) veya Ca(OH)₂ (sönmüş kireç) kullanılmaktadır. Kireç taşının öğütülüp 900°C veya daha yüksek bir sıcaklıkta pişirilmesiyle meydana gelen reaksiyon sonucu sönmemiş kireç oluşur. Bu kirecin su ile karıştırıldığında meydana gelen reaksiyon sonucunda ise sönmüş kireç meydana gelir. Killerin yapısında genellikle bulunan SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ bileşikler ile kirecin suda iyonlaşmasıyla açığa çıkan Ca⁺² katyonu arasında kimyasal reaksiyon oluşur. Kilin yapısında yeterli miktarda SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ bileşikleri yoksa dışardan puzolan katkısıyla kilin etkinliği yükseltilir (Atanur, 1973).

Killi zeminlerde %10'dan fazla kireç bulunmasının mukavemet artışında fazla etkili olmadığı belirlenmiştir (Ola, 1978). Bell (1996), killi zeminlere belirli oranlarda kireç ilave ederek yaptığı deneylerde en uygun kireç yüzdesinin %4-6 olduğunu söylemiştir.

Çimento ile zemin stabilizasyonu.

Çimento, kalker taşları, kil ve alçı taşının yüksek sıcaklıkta ısıtılıp sonra öğütülmesiyle elde edilen hidrolik bir bağlayıcı maddedir. Genellikle zeminin kuru ağırlığının %5-15'i oranında çimento katılarak stabilizasyon sağlanır. En çok kullanılan çimento cinsi portland çimentodur. Organik zeminler ve saf kohezyonlu zeminlerin dışında kalan tüm zeminler için çimento ile iyileştirme uygun yöntemdir. İyileştirme için gerekli optimum çimento miktarı serbest basınç testleriyle belirlenir (Uzuner, 2013).

Çimentonun yapısında bulunan silika, puzolanik aktiviteyi oluşturduğu için, kil minerali içermeyen zeminlerde çimentoyla iyileştirme uygulanabilir yöntemdir. 1920'li yıllardan günümüze kadar Amerika Birleşik Devletleri'nin eyalet karayollarında da çimentoyla iyileştirme uygulamaları görülmektedir. Havaalanlarından karayollarına kadar birçok ulaşım yollarında, bu stabilizasyon çalışmaları temel ve alt temel uygulamalarında bulunmaktadır (Mitchell, & Gallagher, 1993). Farklı zemin sınıflarında bulunan zeminler için ağırlıkça çimento oranları Tablo 7'de gösterilmiştir (Tunç, 2002).

Tablo 7. Farklı Zemin Sınıflarına Göre Çimento Oranları (Tunç, 2002)

AASHTO zemin sınıfı	Birleştirilmiş zemin sınıfı	Tipik çimento içeriği (% ağırlıkça)	Çimento sınırları % ağırlıkça	İhtiyacı % hacimce %
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

Bitüm ile zemin stabilizasyonu.

Bitüm ile iyileştirme en çok karayollarında uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntemde zemin danelerinin birleşip suyun zararlı etkilerinden korunması sağlanır. Bitüm ile iyileştirme de genellikle katran ve asfalt gibi malzemeler tercih edilir. Plastik olmayan ve granüler zeminlerde bitüm ile iyileştirme istenilen sonuçları vermektedir. Bitüm, kohezyonsuz ve granüler zeminlerde bir taraftan zeminin su geçirmesini engellerken diğer taraftan zeminin danelerini birbirine bağladığı için yük taşıma kapasitesini artırır. Bitüm ile iyileştirmenin ince daneli zeminlerde uygulanmasının asıl amacı geçirimsizliği azaltmaktır (Çakılcıoğlu, 2007).

Kil ve organik maddelerden arındırılmış zeminler bitüm ile iyileştirmede en fazla tercih edilen zemin türüdür. Bitüm, zeminin kuru ağırlığının %5-10 arasında tercih edilir. (Uzuner, 2013). Bitüm ile iyileştirmenin maliyeti yüksek olduğundan dolayı stabilizasyon çalışmalarında fazla tercih edilmemektedir.

Puzolanlar ile zemin stabilizasyonu.

Puzolanlar, yapısında çok miktarda koloidal elemanlar ve silis bulunduran malzemelerdir. Tek başına bağlayıcılık özelliği zayıf olan ya da hiç gösteremeyen puzolanlar başka bir bağlayıcı olan kireç veya çimento ile birleştiğinde bağlayıcılık özelliği kazanır.

Puzolanlar ismini İtalya'da bulunan Pozzuoli kasabasından alır. Ülkemizde genellikle Karadeniz, İç Anadolu, Akdeniz, Marmara ve Ege bölgelerinde çokça doğal puzolan

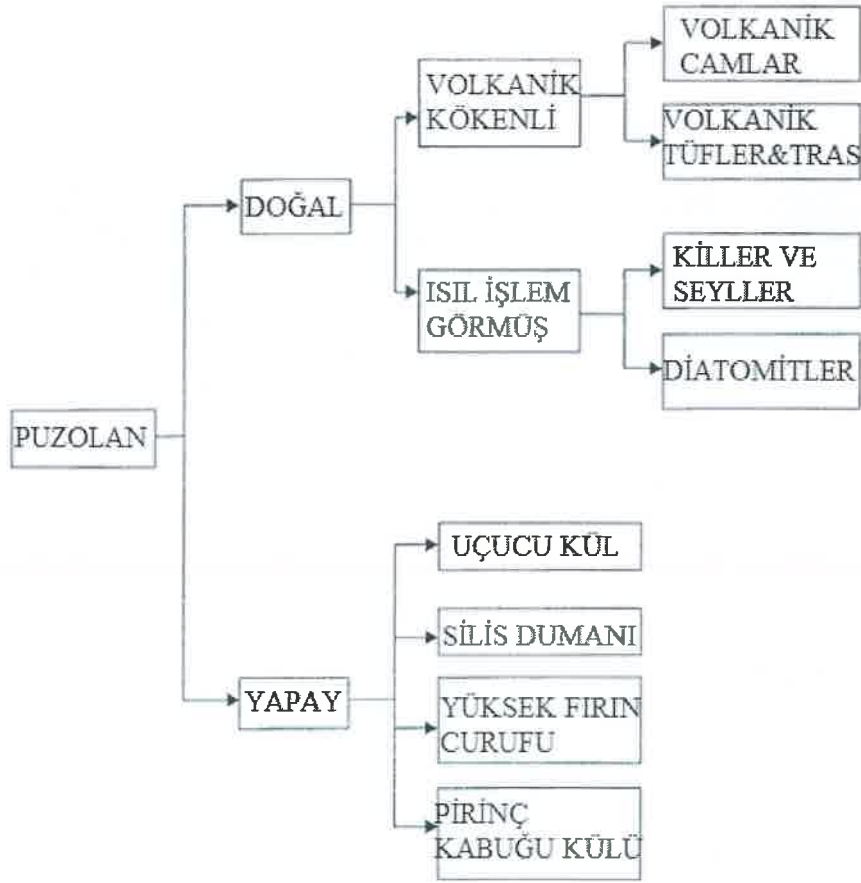
kaynaklarına rastlanmaktadır (Okucu, 1998). Cook (1986) yaptığı çalışmalarda doğal puzolanları aktivite tiplerine ve özelliklerine göre Tablo 8.'deki gibi sınıflandırmıştır.

Puzolanların yapısında çok miktarda SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 bileşikleri vardır. Fakat SiO_2 puzolonik özelliği sağlayan en önemli bileşik olduğundan dolayı toplam kütlede %25'den az olmamalıdır.

Puzolanların birçoğu kireç ve çimento gibi bağlayıcı özellik göstermezler. Genellikle ikincil bağlayıcı madde diye adlandırılırlar. Bunun nedeni kireç ve çimentonun yapısında CaO bulunurken puzolanların yapısında genellikle SiO_2 ve Al_2O_3 bileşiklerinin bulunmasıdır. Puzolanları, doğal ve yapay olmak üzere Şekil 4'deki gibi sınıflandırabilirler (Ün, 2007).

Tablo 8. Doğal Puzolanların Sınıflanması (Cook, 1986)

Aktivite tipi	Aktivite özellikleri
1	Volkanik cam
2	Opal
3A	Kaolinit tipi kil
3B	Montmorillonit tipi kil
3C	İllit tipi kil
3D	Vermikülit karışık kil
3E	Attapulijit tipi kil
4	Zeolit
5	Alüminyum hidrate oksitleri
6	Puzolan olmayanlar



Şekil 4. Pozolanların doğal ve yapay sınıflandırılması (Ün, 2007).

Yeryüzünde doğal olarak yer alan ve pozolanik özelliğe sahip kendi içinde volkanik kökenli (volkanik camlar, volkanik tüfler vs.) ve ısıl işlem görmüş (killer, diatomitler vs.) malzemelere doğal pozolan denilmektedir.

Eski Mısır'da pişmiş tuğlaya kireç karıştırılarak bağlayıcılık özellik kazanan pozolanlar kullanılmıştır. Tarihte Osmanlı Devleti pozolanları geliştirerek meydana getirdiği horasan denilen harcı kullanarak geçmişten günümüze kadar Hürrem Sultan Hamamı, Topkapı, Selimiye Cami gibi eserlerin ulaşmasını sağlamıştır.

Erdoğan (2003), yaptığı araştırmalar sonucunda doğal pozolanların kimyasal bileşimindeki oksit içeriklerini Tablo 9.'da belirtmiştir.

Tablo 9. Doğal Puzolanlara Ait Kimyasal Bileşimlerdeki Oksit Oranları (Erdoğan, 2003)

	Volkanik cam	Volkanik tuf	Diatomit	Pişmiş kil	Pomza taşı
SiO ₂	%65,1	%52,1	%86,0	%42,2	%60,5
Al ₂ O ₃	%14,5	%18,3	%2,3	%16,1	%17,2
Fe ₂ O ₃	%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

Endüstriyel üretim sonucunda yan ürün olarak meydana gelen puzolanik özelliğe sahip malzemelere yapay puzolanlar adı verilmektedir. Silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve pirinç kabuğu külü en çok karşılaştığımız yapay puzolanlardır.

Uçucu kül, termik enerji santrallerinde pulverize kömürünün yakılması sonucunda yan ürün olarak ortaya çıkan malzemedir. Yapısında çok miktarda silika ve alümina bileşiklerini içeren amorf yapıya sahip yaklaşık 1 µm-150 µm boyutundaki kül parçacıklarıdır. Genellikle gri renkte olmalarına rağmen içerisindeki yanmamış karbon miktarına göre rengi daha da koyulaşabilmektedir. Alataş (1996), uçucu kül ve taban külünün kimyasal bileşimlerinin yüzdelerini Tablo 10.'daki gibi sunmuştur.

Tablo 10. Uçucu Kül Ve Taban Külünün Kimyasal Bileşim Oranları (Alataş, 1996)

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

ABD, Çin, Almanya ve Hollanda gibi ülkelerde uçucu kül kullanımı oldukça yaygındır. Türkiyede ise termik santrallerinin bulunduğu il ve kurulu güçleri Tablo 11.'deki gibidir (Tokyay, & Erdoğan, 1998).

Yüksek fırın cürufu, doğada demir cevheri demir oksit olarak bulunmaktadır. Demir elde etmek için 1600°C sıcaklıkta bulunan yüksek fırına kok kömürü, kalker taşı ve cevher yerleştirilip, demir oksitteki oksijen ile kok kömüründeki karbon birleşerek karbonmonoksit ya da karbondioksit olarak ortamı terk ettikten sonra eriyik halde demir ve eriyik halde cüruf yan ürün olarak elde edilmektedir. Geride kalan bu yan ürünün içerisinde fazla miktarda silika, alümina ve kalsiyumoksit bulunur.

Ortaya çıkan cüruf hızlı bir soğumayla ya da suyla karıştırılırsa amorf bir yapıya sahip olur fakat havada yavaş soğumaya bırakılırsa kristal yapıda bir görünüm kazanır.

ABD, Güney Afrika, Avustralya ve Türkiyede bulunan yüksek fırın cürufunun içindeki kimyasal bileşen oranları Tablo 12.'deki gibi verilmiştir (Erdoğan, 2003).

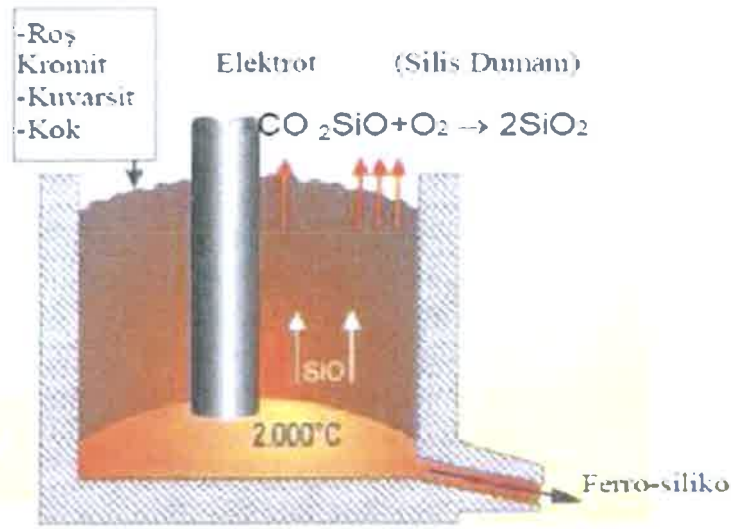
Tablo 11. *Türkiye'deki Termik Santraller (Tokyay, & Erdoğan, 1998)*

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
Çtalağzı	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

Tablo 12. Yüksek Fırın Cürufunun Yapısındaki Kimyasalların Ülkelere Göre Oranları (Erdoğan, 2003)

	ABD	Güney Afrika	Avustralya	Türkiye
CaO	%29-50	%30-40	%39-44	%34-41
SiO ₂	%30-40	%30-36	%33-37	%34-36
Al ₂ O ₃	%7-18	%9-16	%15-18	%13-19
Fe ₂ O ₃	%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

Pirinç, çeltik fabrikalarında işlenerek tanelerin çeltik saplarından ve kabuklarından ayrılması sonucu elde edilir. Kepek ve kapçık denilen iki kabuk pirinç tanalarında yer almaktadır. Kepek genellikle hayvan yemi olarak kullanılır. Kapçık birçok inorganik ve organik bileşenlerden meydana geldiğinden yapısında yüksek oranda silika bulunmaktadır (Cook, 1986). 700°C’de yakılan pirinç kabuğu SiO₂ bileşiği bakımından zengin olan ve endüstriyel yan ürün olarak da kullanılabilen pirinç kabuğu külünü ortaya çıkarmaktadır. Soğutma işlemi hızlı olduğunda küldeki silika amorf bir yapıya sahip olur ve çok miktarda amorf silika içerdiğinden dolayı puzolanik özellik kazanır (An, Guo, Zou, Zhu, & Wang, 2011). Silis dumanı, silikon metali alaşımların ya da silikon metalinin 2000°C sıcaklıktaki yüksek saflığa sahip kuvarsın indirgenmesiyle açığa çıkan puzolanik özellik gösteren endüstriyel bir yan üründür. Bu işlem sırasında çok yüksek oranda SiO gazı meydana gelmektedir. SiO gazının soğuk havayla temas edip yoğunlaşmasıyla amorf yapıya sahip SiO₂ durumuna geçmektedir. Açığa çıkan bu malzemeye “silika tozu”, “mikrosilika” ya da “silika füme” denilmektedir. Elektrik-ark fırınından silis dumanı üretimi Şekil 5’de gösterilmiştir (Azevedo, 2001).



Şekil 5. Silis dumanının elektrik-ark fırınından oluşumu (Azevedo, 2001).

Silis dumanı, $0.1\mu m-0.2\mu m$ inceliğe sahip taneciklerden meydana gelmektedir. Dünyada ilk kez Norveç'te çimentoya katkı malzemesi olarak kullanıldığı bilinmektedir. Genellikle gri renkte olup su ile temas ettiğinde siyah renk tonlarını almaktadır. Silis dumanının kimyasal bileşenlerinin ülkelere göre oranları Tablo 13.'deki gibi belirtilmiştir (Erdoğan, 2003).

Tablo 13. Silis Dumanı Kimyasallarının Ünelere Göre Oranı (Erdoğan, 2003).

	ABD	Norveç	Türkiye
SiO ₂	%90-93	%90-96	%93-95
Al ₂ O ₃	%0,5-1,6	%0,5-3	%0,4-1,4
Fe ₂ O 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 ₂ O	%1-1,2	%0,4-1	%0,5-1
Na ₂ O	%0,1-0,3	%0,2-0,7	%0,1-0,4

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

Materyal ve Yöntem

Zeminlerin iyileştirilmesinde silis dumanı ve mermer tozunun etkilerinin araştırıldığı bu yüksek lisans çalışmasında kullanılan materyallerle (doğal malzeme, kireç, silis dumanı ve mermer tozu) hazırlanan numunelerin fiziksel, kimyasal ve hidrolik özelliklerinin belirlenmesi için yapılan geoteknik deneyler ve bu deneylerdeki standartlar, deney numunelerinin hazırlanması, kür edilmesi ve isimlendirilmesiyle ilgili bilgilere bu bölümde yer verilmiştir. Deneyler için, Bayburt Üniversitesi ve Atatürk Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarları kullanılmıştır.

Materyal

Yüksek lisans çalışmasındaki deneylerde kullanılan malzemeler; doğal malzeme, kireç, silis dumanı ve mermer tozudur. Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'na getirilen malzeme zemin yüzeyinden yaklaşık 2 m derinlikten alınmıştır. Bütün deneylerde doğal malzeme 24 saat etüvde bekletildikten sonra numuneler hazırlanmıştır.

Deney numuneleri; doğal malzemeye kireç, silis dumanı ve mermer tozu katılmasıyla hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında silis dumanı ve mermer tozunun dayanım ve durabiliteye olan etkisi kireçli ve kireçsiz numuneler hazırlanarak ayrı ayrı incelenmiştir. Zemine %5, %10, %15 ve %20 oranlarında silis dumanı ve mermer tozu kireç ilavesiz ve kireç (%6) ilaveli deney numuneleri hazırlanmıştır.

Deney numuneleriyle ilgili isimlendirmeler Tablo 14.'de verilmiştir.

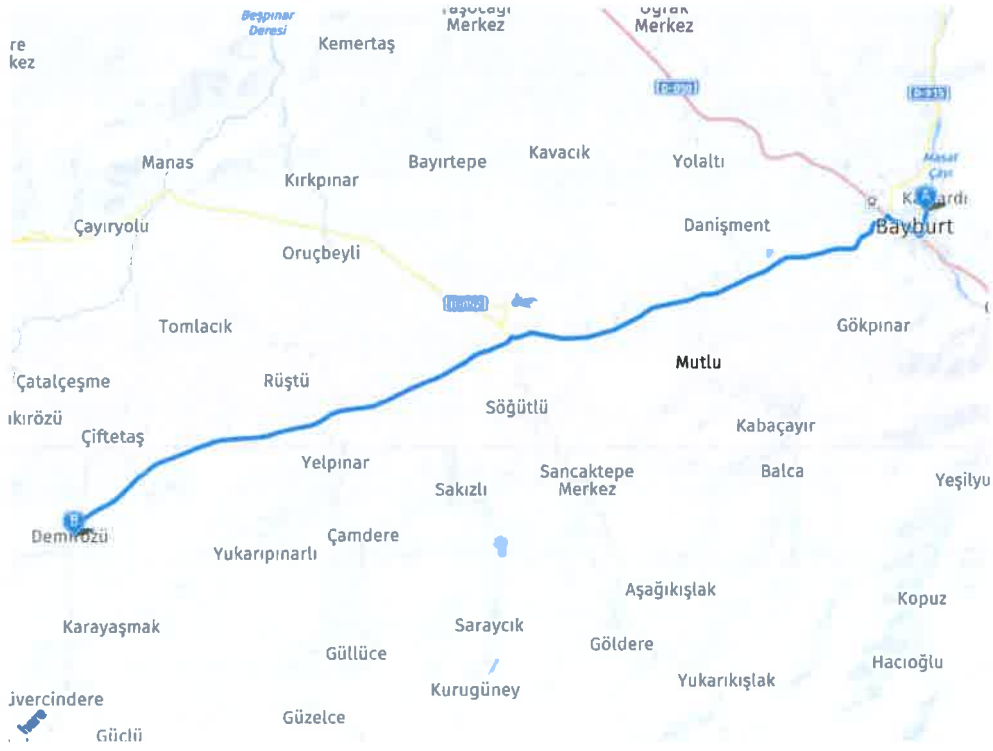
Tablo 14. *Deney Numuneleriyle İlgili Notasyonlar*

Deney numunelerinin karışım oranları	ve	Notasyon
Doğal zemin		S
Doğal zemin ve kireç		SL
Doğal zemin ve silis dumanı		SS
Doğal zemin ve mermer tozu		SM
Doğal zemin, kireç ve silis dumanı		SLS
Doğal zemin, kireç ve mermer tozu		SLM
Doğal zemin ve %5 silis dumanı		SS/5
Doğal zemin ve %10 silis dumanı		SS/10
Doğal zemin ve %15 silis dumanı		SS/15
Doğal zemin ve %20 silis dumanı		SS/20
Doğal zemin ve %5 mermer tozu		SM/5
Doğal zemin ve %10 mermer tozu		SM/10
Doğal zemin ve %15 mermer tozu		SM/15
Doğal zemin ve %20 mermer tozu		SM/20
Doğal zemin, kireç ve %5 silis dumanı		SLS/5
Doğal zemin, kireç ve %10 silis dumanı		SLS/10
Doğal zemin, kireç ve %15 silis dumanı		SLS/15
Doğal zemin, kireç ve %20 silis dumanı		SLS/20
Doğal zemin, kireç ve %5 mermer tozu		SLM/5
Doğal zemin, kireç ve %10 mermer tozu		SLM/10
Doğal zemin, kireç ve %15 mermer tozu		SLM/15
Doğal zemin, kireç ve %20 mermer tozu		SLM/20

Doğal malzeme.

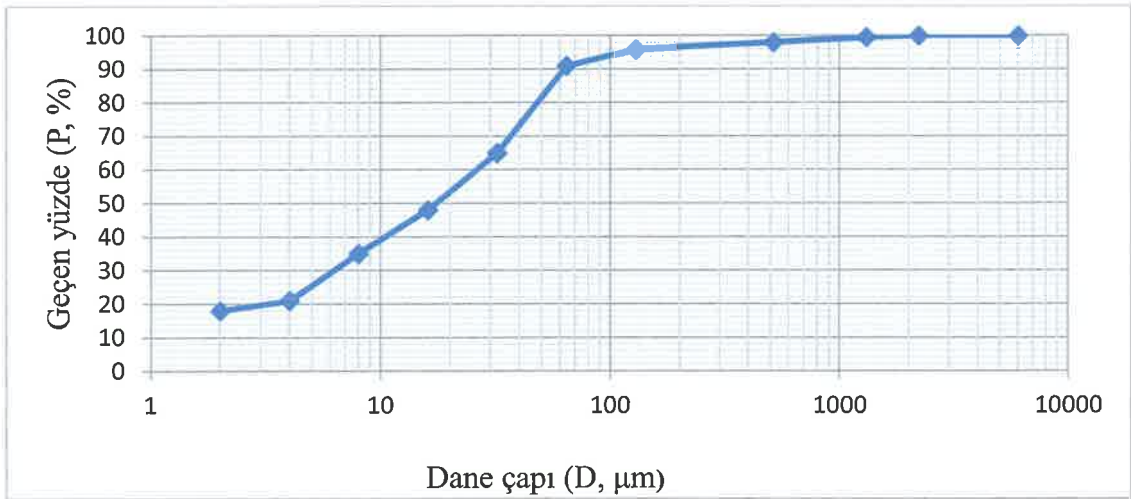
Deneylerde kullanılan doğal zemin Bayburt İline bağlı Demirözü ilçesinde bulunan bir araştırma çukurundan alınmıştır. Alınan malzeme Bayburt Üniversitesi Geoteknik

Laboratuvarına getirilmiştir. Şekil 6.'da zeminin temin edildiği bölgenin konumu belirtilmiştir.



Şekil 6. Doğal malzemenin alındığı Demirözü ilçesinin konumu.

Temin edilen malzemenin ASTM D 2487 (2011) standardına göre zemin sınıfı CH (yüksek plastisiteli kil) olarak belirlenmiştir.



Şekil 7. Doğal malzemenin dane boyutu dağılım eğrisi.

Yapılan geoteknik deneyler sonucu doğal malzemenin özellikleri Tablo 15.'de verilmiştir.

Tablo 15. Doğal Zeminin Özellikleri

USCS sınıflandırma	CH
Likit limit, LL (%)	60,81
Plastik limit, PL (%)	30
Plastisite indisi, PI (%)	30,81
Özgül ağırlık, G_s	2,60
Optimum su içeriği, w_{opt} (%)	22,5
Maksimum kuru yoğunluk, ρ_{kmax} (Mg/ m ³)	1,63
Renk	Sarımtırak

Tablo 16’da mühendislik özellikleri verilen doğal malzemeye ASTM D 2974 standardına göre organik madde tayini analizi Karadeniz Teknik Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Analitik Kimya Laboratuvarı’nda tespit edilmiştir. Çıkan veriler neticesinde doğal malzeme içindeki organik madde miktarı %5 seviyelerinde tespit edilmiştir. Bu değer kireçle iyileştirme için sınır ve uygun bir değerdir. Literatüre göre organik madde miktarı %5’ten yüksek olan zeminlere kireçle iyileştirme uygulanması neticesinde, zemin içindeki organik malzemelerin kimyasal reaksiyonları azaltıcı etkisinin olduğu ve ıslanma kurumalarda zemini ufalayıp dağıttığı gözlemlenmiştir (Arman, & Moonfish, 1972). Numunelerde kullanılması gerekli olan kireç miktarının belirlenmesi için, doğal malzemeye ASTM D 6276 (2006) standardına göre uygun bir şekilde pH deneyi yapılmıştır. Optimum kireç oranı belirlenmesi için hazırlanan solüsyonlarla ilgili pH verileri Tablo 16.’da verilmiştir

Tablo 16. 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 sonuçlara bakıldığında %5 oranında kireçli solüsyon için optimum kireç oranı şartlarını sağladığı görülmektedir. Ancak Mathew ve Rao’nun (1997) çalışmaları dikkate alınarak optimum kireç oranı %6 olarak belirlenmiştir.

Yöntemler

Bu bölümde yüksek lisans tez çalışmasındaki deneylerde kullanılan yöntemler ve deneylere ait referans alınan standartlara değinilmiştir.

Deneylerde referans alınan ASTM standartları.

Yüksek lisans çalışmasında yapılan geoteknik deneyleri Tablo 17’de verilen ASTM standartları referans alınarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 17. *Deneylerde Referans Alınan Standartlar*

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)
Optimum kireç miktarının tespiti	ASTM D 6276 (2006)
Organik madde tayini	ASTM D 2974 (2007)
Donma çözülme deneyi	ASTM D 560 (1996)
Durabilite testi (Islanma-kuruma periyodu)	ASTM D 559 (1996)

Zeminin sınıflandırılması.

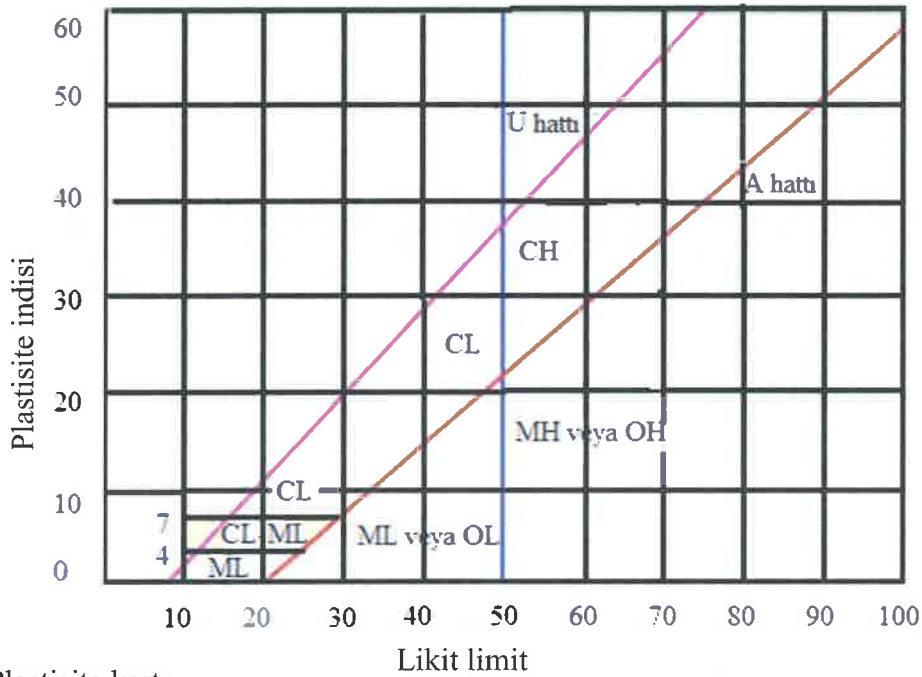
Deneylerde kullanılan zeminin hangi zemin sınıfına sahip olduğunun belirlenmesi için elek analizi yapılmıştır.

Şekil 8. yardımıyla gösterilen Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi’ne uygun olarak zemin sınıfı belirlenmiş. Şekil 9.’te verilen plastisite kartından yararlanılarak zemin sınıfı yüksek plastisiteli kil (CH) olarak tespit edilmiştir.

Ana guruplar	Özellikler	Gurup sembolü	İnce malzeme	Derecelenme	Plastisite	
İri taneli %50 den fazlası 200 nolu elekte kalan	ÇAKILLAR Çakıl taneleri %50 den fazla, 40 nolu elek üstü	İyi derecelenmiş çakıl-kum karışımı	GW	0-5	$C_u > 4, 1 < C_c < 3$	
		Kötü derecelenmiş çakıl, kumlu çakıl, ince taneli az veya yok	GP	0-5	GW deki şartlar sağlanmaz ise	
		Siltli çakıl ve siltli kumlu çakıl	GM	>12		A hattının altında $PI < 4$
		Killi çakıl ve killi kumlu çakıl	GC	>12		A hattının üstünde $PI > 7$
KUMLAR Kum taneleri %50 den fazla		İyi derecelenmiş kum, çakıllı kum, ince taneli az veya yok	SW	0-5	$C_u > 6, 1 < C_c < 3$	
		Kötü derecelenmiş kum, çakıllı kum, ince taneli az veya yok	SP	0-5	GW deki şartlar sağlanmaz ise	
		Siltli kum	SM	>12		A hattının altında $PI < 4$
		Killi kum	SC	>12		A hattının üstünde $PI > 7$
İnce taneli %50 den fazlası 200 nolu elekten geçen	SİTLER VE KİLLER	Inorganik silt, siltli veya killi ince kum, az plastik	ML			Plastisite kartı kullanılır
		Inorganik kil, siltli kil, düşük plastisiteli kumlu kil	CL			Plastisite kartı kullanılır
		Düşük plastisiteli inorganik silt ve organik siltli kil	OL			Plastisite kartı kullanılır
	SİTLER VE KİLLER	Yüksek plastisiteli inorganik silt	MH			Plastisite kartı kullanılır
		Yüksek plastisiteli inorganik kil	CH			Plastisite kartı kullanılır
		Yüksek plastisiteli organik kil	OH			Plastisite kartı kullanılır
Yüksek organik zeminler	Turba ve diğer zeminler	Pt				

Not: İnce tane oranı %5 ile %12 arasında ise zemin çift sembol ile ifade edilir*.

Şekil 8. Birleşik zemin sınıflandırma sistemi.



Şekil 9. Plastisite kartı.

Kıvam limitleri.

Zeminin su içeriğine bağlı olarak farklı davranış sergilemesi Atterberg (1911) tarafından deneysel olarak dile getirilmiştir. Atterberg (1991) sınırları başlıca plastik limit, likit limit ve rötre limitidir. Likit limit, zeminin kendi yükü altında akabilmesi için gerekli su muhtevasıdır. Düşen koni penetrasyon veya Casagrande yöntemleri kullanılarak belirlenebilir. Yüksek lisans tez çalışması kapsamında likit limit deneyi için düşen koni penetrasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde standart koninin 5 saniyede hazırlanan numune içerisine

20 mm batmasına karşılık gelen su muhtevası likit limit olarak belirlenmektedir. Deneyde kullanılan bu yönteme ait malzemeler Şekil 10.'da gösterilmektedir.

Deney için 40 nolu elekten elenmiŐ bir miktar numune, su ilavesi yapılarak iyice karıŐtırılmaktadır. Hazırlanan numune metal deney kaba içerinde boşluk kalmayacak Şekilde yerleştirilip yüzeyi düzeltilmektedir. Metal ağırlık zeminin yüzeyine batmayacak Şekilde indirilir. Alet sıfırlanarak metal koni ağırlığı serbest bırakan düğmeye basılır. 5 saniye bekleddikten sonra metal koninin batma miktarı okunur. Daha sonra metal koni ucu kaldırılarak batan kısımdan bir miktar numune su muhtevasını belirlemek üzere alınır. Bu işlem birkaç defa farklı su muhtevalarında tekrarlanır. Alınan numuneler daha önce darası alınan kapta tartılarak su muhtevası belirlenmesi için etüve konulur. 24 saat bekletildikten sonra kuru ağırlığı tartılır. Elde edilen sonuçlardan 20 mm batma miktarına karşılık gelen su muhtevası likit limit olarak belirlenir.

Plastik limit, zemin numunesinin plastik kıvamdan yarı plastik kıvama geçtiği sınır su muhtevasıdır. 40 nolu elekten geçen bir miktar numune su ile yoğurularak, cam plaka üzerinde yuvarlanarak çapları 3 mm olan silindirler elde edilir. Bu durumda bir miktar suyunu kaybeden silindir numunelerde plastikliğinin azalmasıyla kopmalar ve yarılmalar meydana gelir. Bu haldeki numunenin su muhtevasına plastik limit adı verilmektedir. Şekil 11.'de hacim-su muhtevası grafiği verilmiştir.



Numune hazırlanışı



Karıştırma işlemi



Düşen koni penetrasyon aleti



Aletle yapılan ölçüm



Numunenin su muhtevasının artırılması



Plastik limit için hazırlanan 3 mm çapındaki silindirik numune

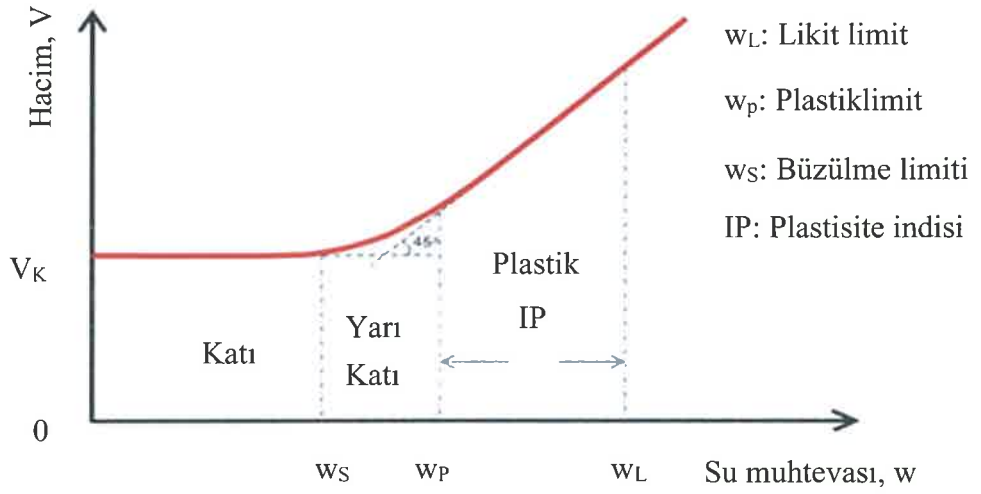


Numunelerin etüvde kurutulması



24 saat etüvde bekleyen numune

Şekil 10. Deneyde kullanılan malzemeler.



Şekil 11. Hacim-su muhtevası grafiği.

Kompaksiyon deneyi.

Kompaksiyon, zeminin tabakalar halinde serilip, zemin danelerinin birbirine yaklaştırılması ve boşluk oranının azaltılması durumunda zeminin daha sıkı hale gelmesini sağlayan mekanik işlemlerdir. Kompaksiyonun amacı minimum hava boşluğunda maksimum yoğunluğun elde edilmesidir. Zemin iyileştirme yöntemlerinden en ekonomik ve en etkin yöntem kompaksiyon uygulanmasıdır (Tunç, 2002). Kompaksiyon ile zeminin taşıma gücünün artması, oturmaların azalması, mukavemet, geçirimsizlik ve aynı zamanda hacim değiştirme direncinin artması sağlanabilmektedir.

Yüksek lisans tez çalışmasında standart kompaksiyon deneyi uygulanarak numunenin maksimum kuru birim hacim ağırlık değerine karşılık gelen optimum su muhtevası değeri belirlenmiştir. Bu deney için daha önceden kurutulmuş bir miktar zemin kullanılmaktadır. Bu zemine belirli miktarda su katılarak iyice karıştırılır. Hazırlanan numune standartlara uygun silindirik çelik kalıba üç kademe şeklinde ve katmanına 25 tokmak darbesi uygulanarak kalıbın içine sıkıştırılır. Daha sonra sıkıştırılmış zemin yapısal bütünlüğünü kaybetmeden kalıptan çıkartılır. Çıkartılan numune 3 eşit parçaya ayrıldıktan sonra bir parçası üzerinde su muhtevası deneyi yapılır. Bu işlem numuneye su eklenerek en az beş kez tekrarlanır. Deneyden elde edilen veriler ρ_k-w grafiğinde belirtilerek, kompaksiyon grafiği çizilir. Bu grafiğin tepe noktasından, w_{opt} ve ρ_{kmax} bulunur (Uzuner, 2007). Şekil 12.'de standart kompaksiyon deneyine ait görüntüler yer almaktadır.



Karışımın hazırlanması



Karışımlara su eklenmesi



Kompaksiyon deneyi



Her kademeye 25 tokmak darbesi



Kalıpların tartılması



Yapısal bütünlüğünü
kaybetmeden kalıptan çıkarılması

Şekil 12. Standart kompaksiyon deney görüntüsü.

Serbest basınç deneyi.

Zemine tek yönde uygulanmış olan kuvvetlere karşı gösterilen direnç tek eksenli dayanım olarak ifade edilebilir. Sonuçların yaklaşık, hızlı ve ekonomik olması bakımından en çok tercih edilen deneydir. Daha çok suya doymun saf killi zeminlerde kayma direncinin saptanması için yapılan deneydir. Yüksek lisans tez çalışması kapsamında, 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde silindirik numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 7 ve 28 gün desikatörde bekletilerek kür edilmiştir ve ardından tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Şekil 13.'de serbest basınç deneyine ait görüntüler yer almaktadır.



Numune hazırlanışı



Desikatör



Tek eksenli basınç deney düzeneği

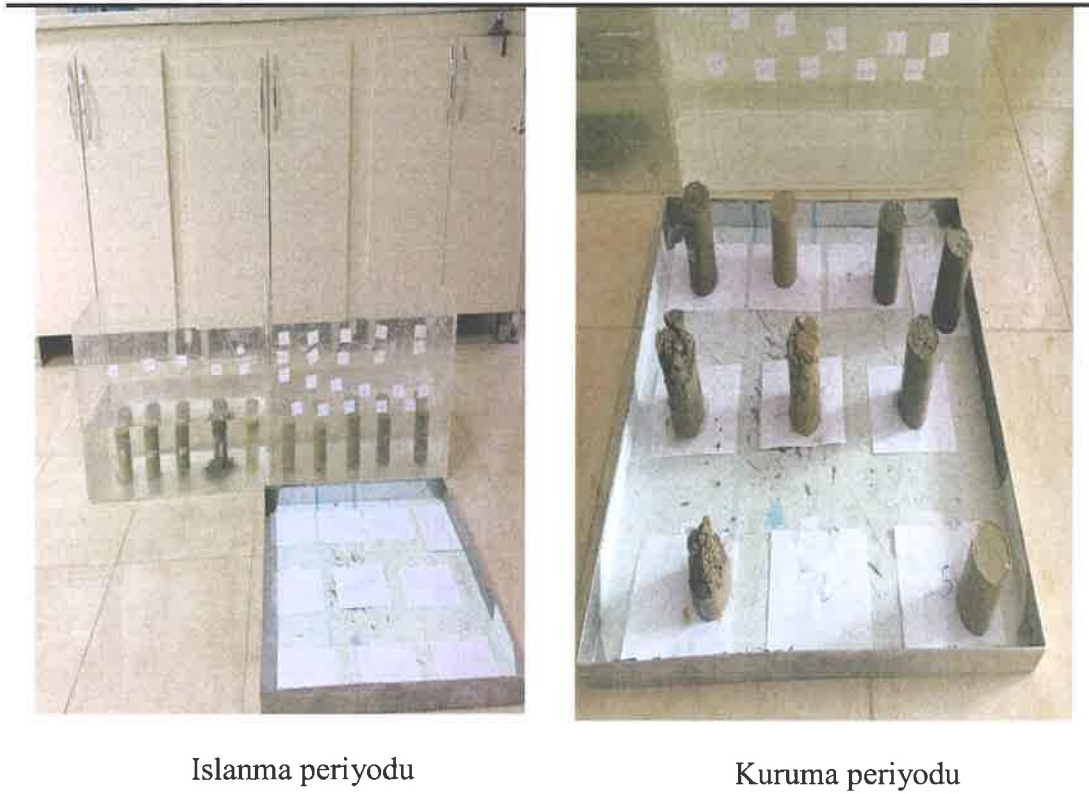


Kırılan numune

Şekil 13. Serbest basınç deneyine ait görüntüler.

Islanma-kuruma periyodu deneyi.

Bu çalışma kapsamında serbest basınç deneyindeki gibi 50 mm çapında 100 mm yüksekliğinde silindirik numuneler hazırlanmıştır. Deney numuneleri 28 gün desikatörde kür edildikten sonra ıslanma-kuruma periyodu için hazır hale getirilmiştir. Numuneler 28 gün sonunda ASTM D 559'a göre 12 adet ıslanma-kuruma periyoduna tabi tutulmuştur. Deney numunelerinin öncelikle kür sonunda kuru haldeki ağırlıkları tartılmıştır. Daha sonra bu deney için hazırlanmış su dolu kabın içerisine bırakılmıştır. Ertesi gün numuneler su içerisinden alınıp kuru bir yerde kurumaya bırakılmış ve 24 saat sonra kurumaya bırakılan numuneler tartılmıştır. Bu işlem 12 ıslanma-kuruma periyodu şeklinde tamamlanmıştır. Deney sonunda numunelerdeki kütle kayıpları tespit edilerek numunelerin yapısal bütünlüğünü koruyup koruyamadığı irdelenmiştir. Şekil 14'de ıslanma-kuruma deneyine ait görüntüler yer almaktadır.



Şekil 14. Islanma-kuruma periyodu deneyi.

Donma-çözülme çevrimi.

Bu çalışma kapsamında 50 mm çapında 100 mm yüksekliğinde silindirik numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler 28 gün desikatörde kür edildikten sonra donma-çözülme kabinine konularak 12 kez donma-çözülme çevrimine tabi tutulmuştur. Bu çevrim -20°C ve 24°C 'de 1'er gün olmak üzere donma-çözülme kabiniinde gerçekleştirilmiştir. Bu çevrimin tamamlanmasından sonra numuneler tek eksenli basınç deneyine tabi tutularak dayanımları belirlenmiştir. Şekil 15'de donma-çözülme deneyine ait görüntülere yer verilmiştir.



Donma-çözülme kabini

-20°C 'de soğutma işlemi

Şekil 15. Donma-çözülme deneyine ait görüntü.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

Bulgular

Bu çalışmanın ana konusu, Bayburt iline bağlı Demirözü ilçesinden temin edilen doğal malzemenin kireç, silis dumanı ve mermer tozuyla stabilize edilmesi ve sonuçlarının değerlendirilmesidir. Çalışma kapsamında optimum oranda kireç eklenen ve eklenmeyen zemine %5, %10, %15, %20 oranlarında silis dumanı ve mermer tozu katılarak numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere kıvam limitleri, kompaksiyon, serbest basınç, ıslanma-kuruma ve donma-çözülme çevrimi deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar bu bölümde detaylı şekilde dile getirilmektedir.

Deneylerden Elde Edilen Veriler

Zemin indeks özelliklerinin belirlenmesi ve serbest basınç dayanım değerlerinin elde edilmesi zeminin mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde geçmişten günümüze kadar yararlanılan yöntemlerdendir. Mühendislik özelliklerinin zayıf olduğu tespit edilen zeminlerde önerilen çalışmalardan biri ise zemini iyileştirmeye çalışmaktır. Doğal malzemeye kireç, silis dumanı ve mermer tozu ilavesiyle yapılan deneysel çalışmada öncelikle likit ve plastik limit değerleri belirlenmiştir. Belirli oranlarda hazırlanan numunelere kompaksiyon deneyleri yapılarak optimum su içerikleri ve maksimum kuru yoğunlukları tespit edilmiş daha sonra serbest basınç deneyi ve durabilite deneyleri yapılmıştır.

Kıvam limitleri.

Yüksek lisans çalışması kapsamında oluşturulan numunelerin ASTM D 4318 (2010) standardı göz önüne alınarak elde edilen likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri Tablo 18.'de gösterilmiştir.

Tablo 18. Deneydeki Numunelere Ait Kıvam Limit Değerleri

Deney Numuneleri	Likit Limit(%)	Plastik Limit(%)	Plastisite İndisi(%)
S	60,8	30	30,8
SL	54,9	34,5	20,4
SM/5	57,4	32,1	25,3
SM/10	58,6	32,8	25,8
SM/15	58,1	31,6	26,5
SM/20	57,8	30,9	26,9
SS/5	57,1	32,7	24,4
SS/10	56,7	33,3	23,4
SS/15	56,6	33,9	22,7
SS/20	56,2	32,3	23,9
SLM/5	54,1	34,9	19,2
SLM/10	53,9	35,7	18,2
SLM/15	53,0	34,8	18,2
SLM/20	51,6	34,5	17,1
SLS/5	50,8	36,2	14,6
SLS/10	50,6	36,2	14,4
SLS/15	50,5	36,3	14,2
SLS/20	50,4	35,1	15,3

Kıvam limitleri sonuçları incelendiğinde yüksek plastisiteli zemin örneğinin likit limit değerinin en yüksek olduğu aynı zamanda plastik limit değerinin diğer karışımlara göre daha düşük olduğu görülmektedir.

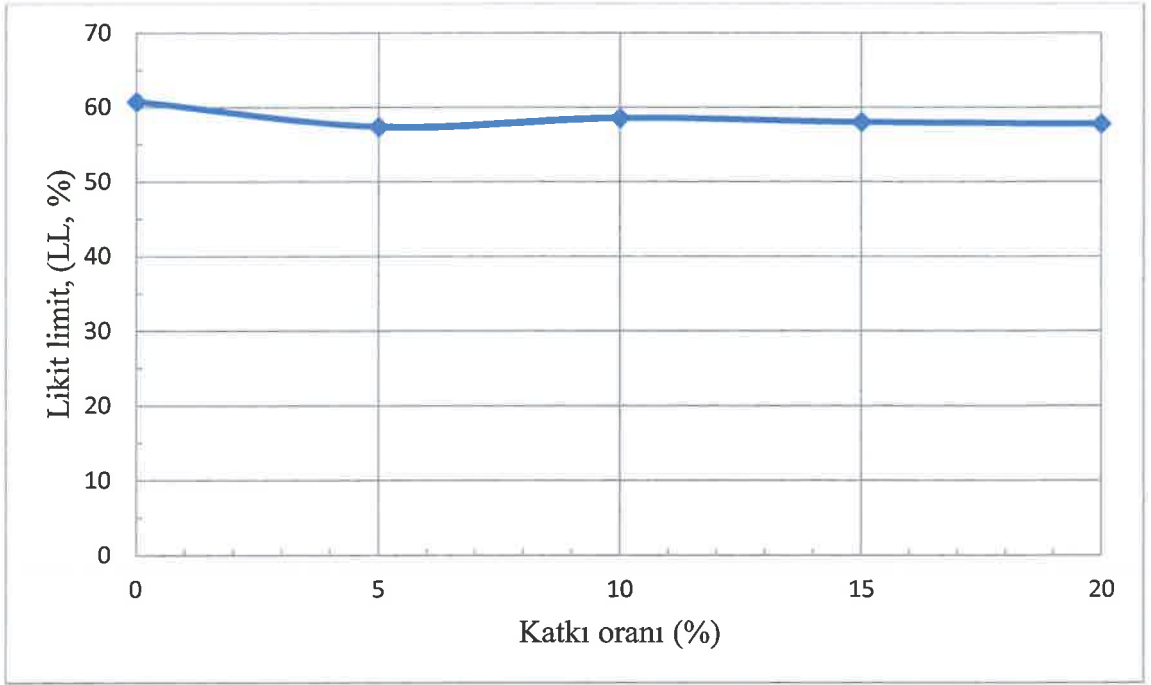
Doğal zemine %6 kireç eklenerek yapılan numune olan SL karışımının doğal zemin numunesine göre likit limit değerinde azalma meydana gelirken, plastik limit değerinde artış tespit edilmiştir.

Doğal zemine mermer tozu eklenerek yapılan karışımlarda likit limit değerinde %10'a kadar artış olduğu daha yüksek oranlarda likit limit değerinin düşüşe geçtiği gözlemlenmiştir.

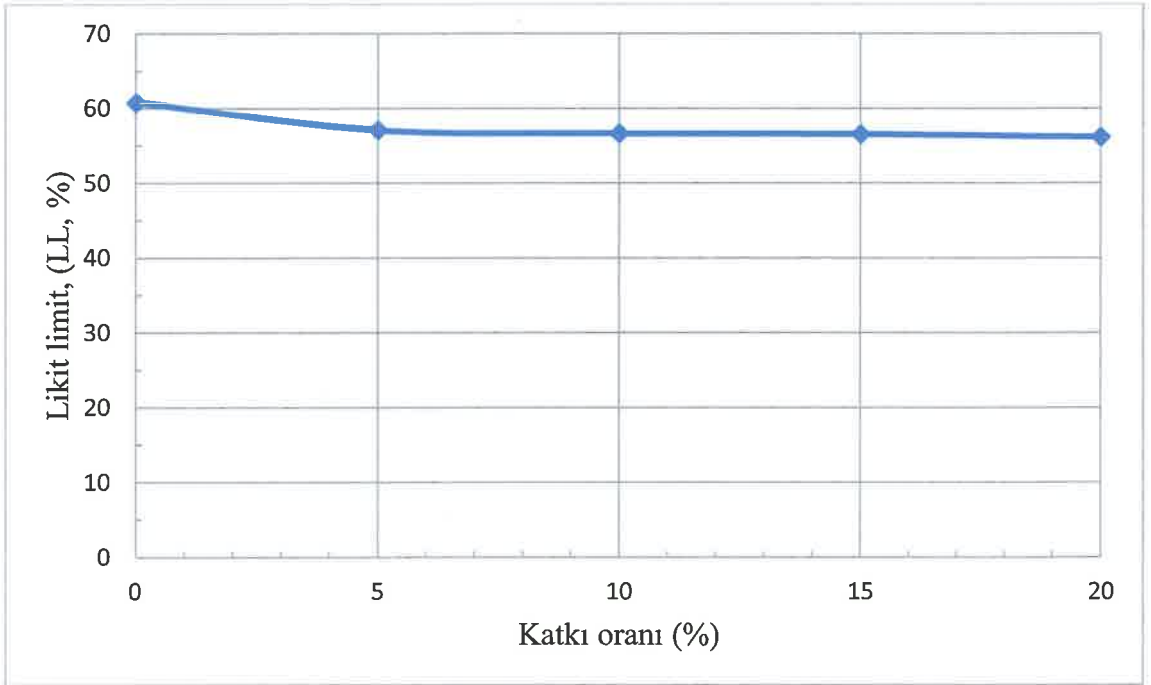
Doğal zemine sadece silis dumanı eklenerek yapılan karışımlarda ise en yüksek likit limit değerı %5'te elde edilirken, daha sonraki yüzdelerde az da olsa bir düşüş meydana gelmiştir. Plastik limit değerinin ise %15'e kadar artış gösterip daha sonra düşüşe geçtiği belirlenmiştir.

SM numunelerinin SLM numunelerine göre likit limit değerleri yüksek çıkarken, plastik limit değerleri daha düşüktür. Hazırlanan numuneler arasında en düşük likit limit değerine SLS numunelerinde rastlanmıştır. Bu numunelerde silis oranı arttıķa likit limit değerlerinde düşüşler tespit edilmiştir. Aynı zamanda dengeli bir artış olmasa da %15'e kadar plastik limit değerlerinde artışlar görülürken daha yüksek oranlarda bu değerin düşüşe geçtiği saptanmıştır.

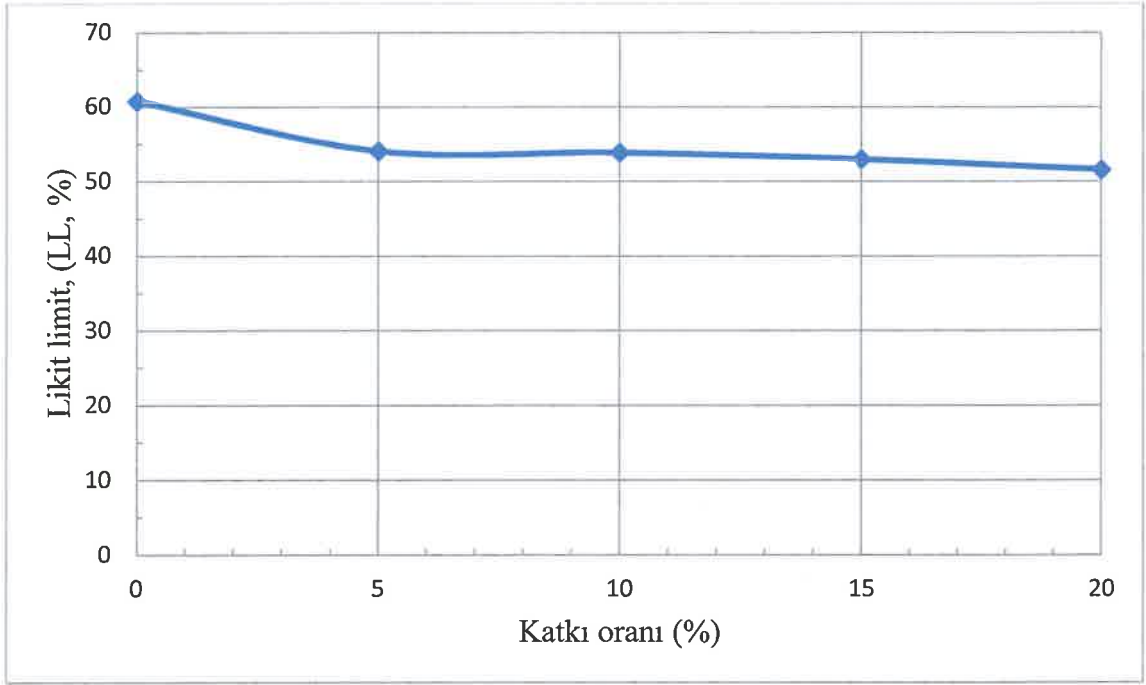
Numunelerin likit limitlerini belirlemede kullanılan düşen koni penetrasyon deney sonuçları Ek-1'de sunulmuştur. Likit limit, plastik limit ve plastisite indisi grafikleri ise Şekil 16., 17., 18., 19., 20., 21., 22., 23., 24., 25., 26. ve 27.'de verilmiştir.



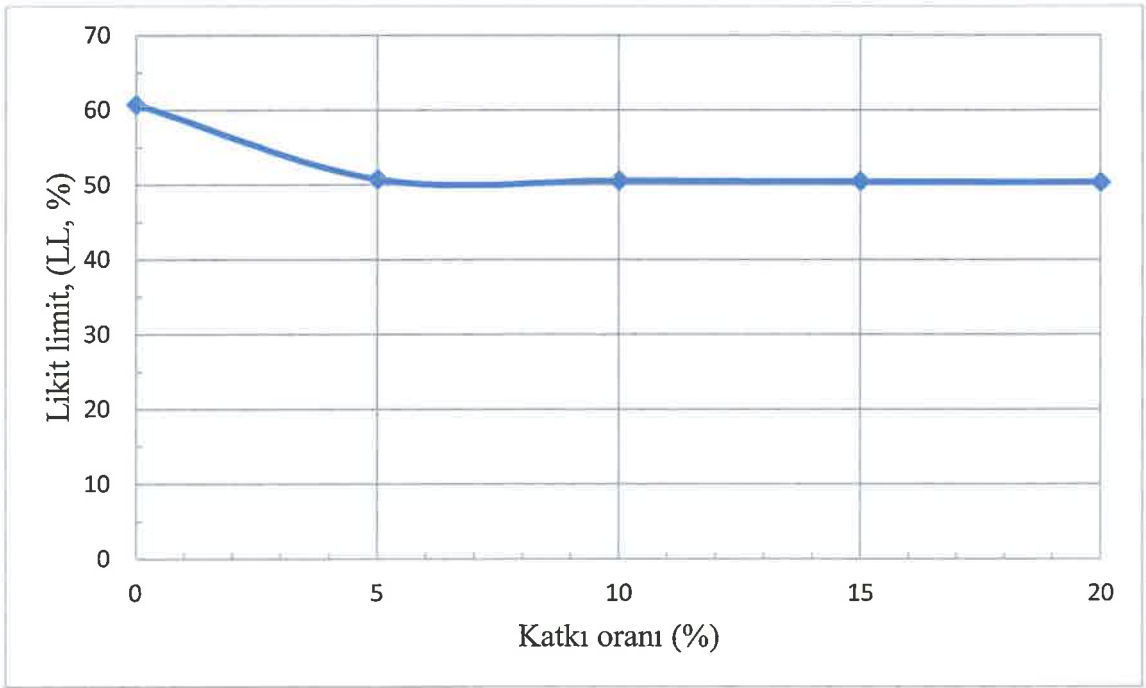
Şekil 16. SM karışımlarına ait likit limitler.



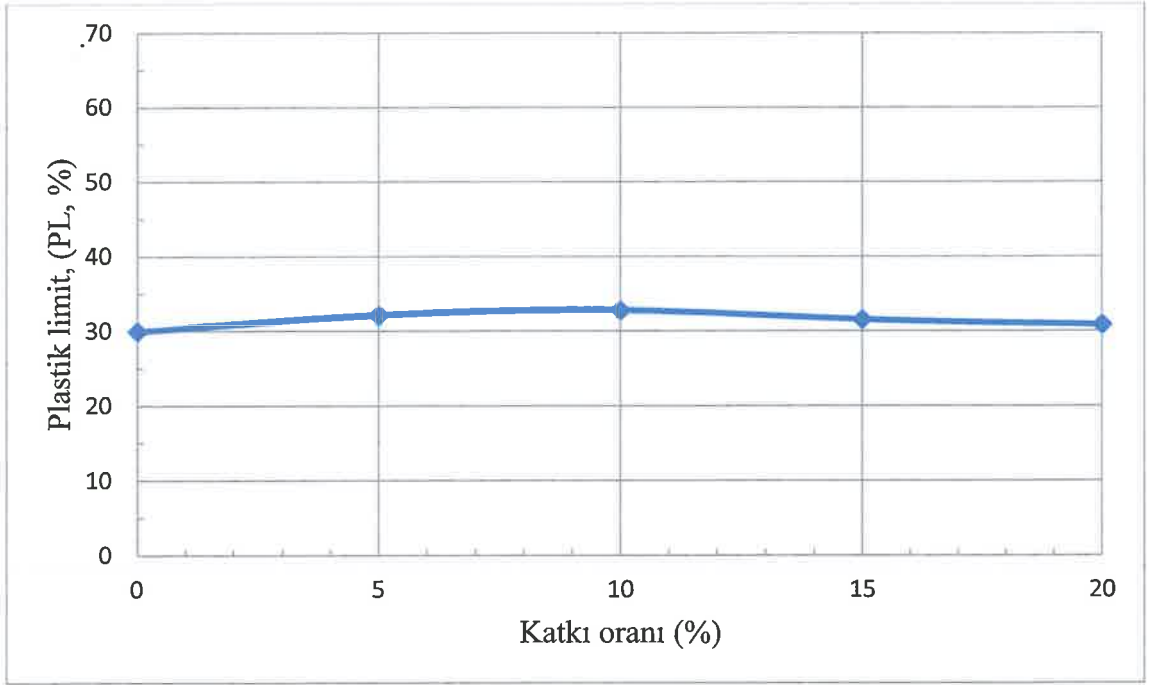
Şekil 17. SS karışımlarına ait likit limitler.



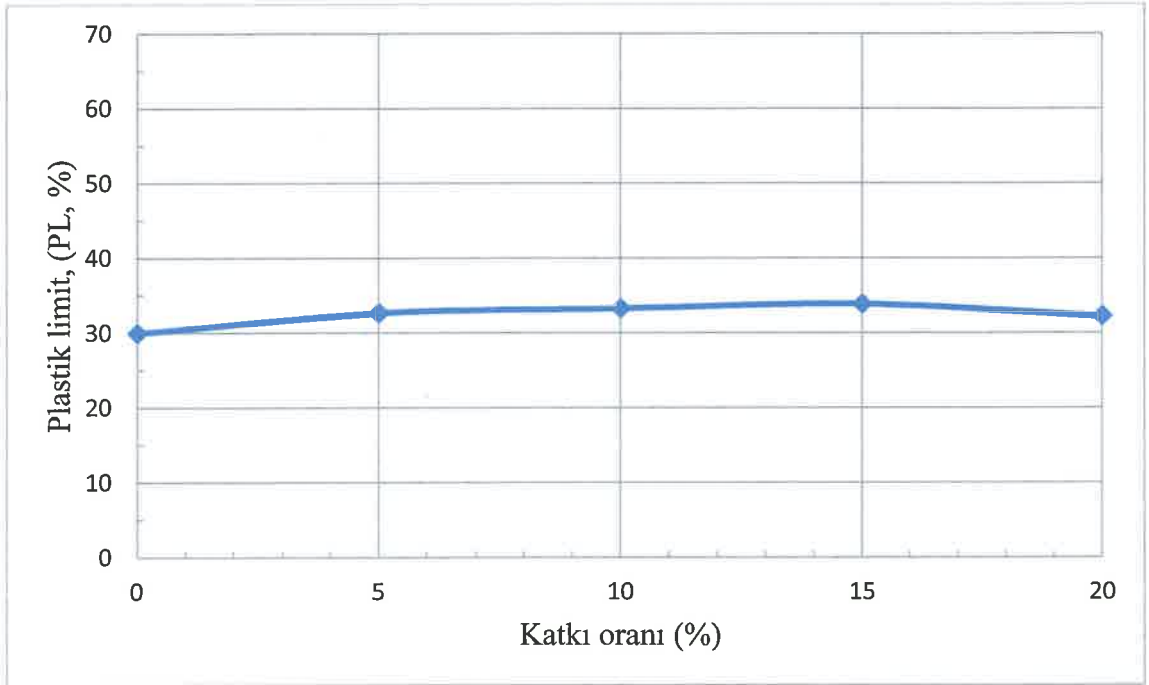
Şekil 18. SLM karışımlarına ait likit limitler.



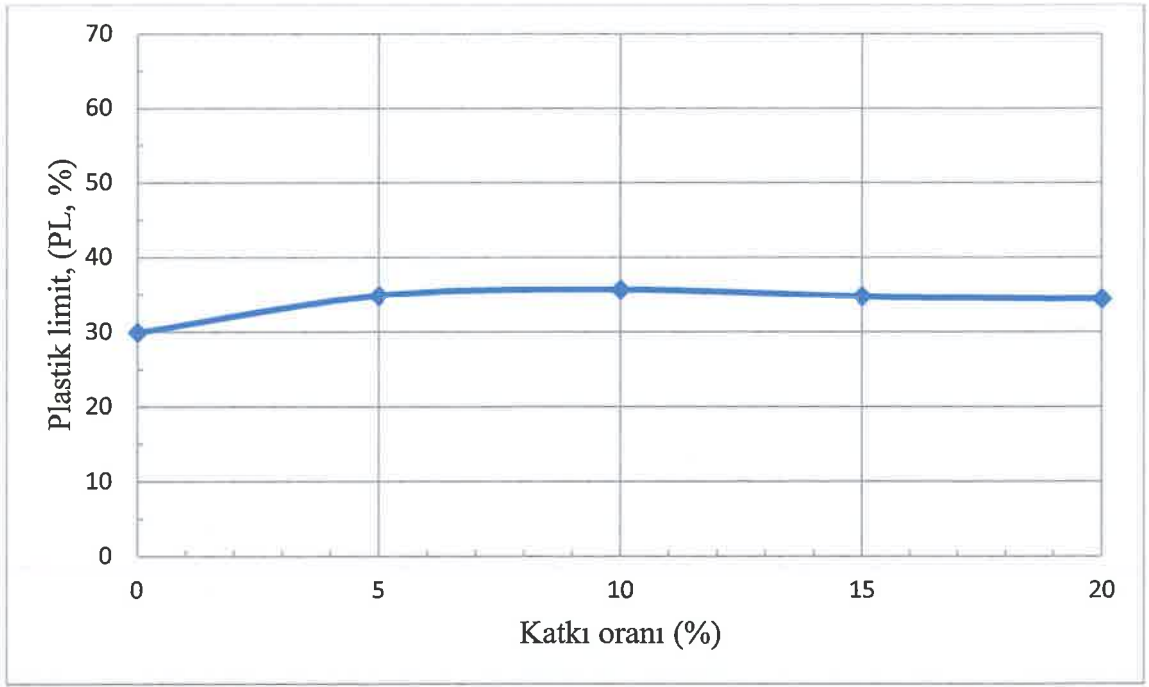
Şekil 19. SLS karışımlarına ait likit limitler.



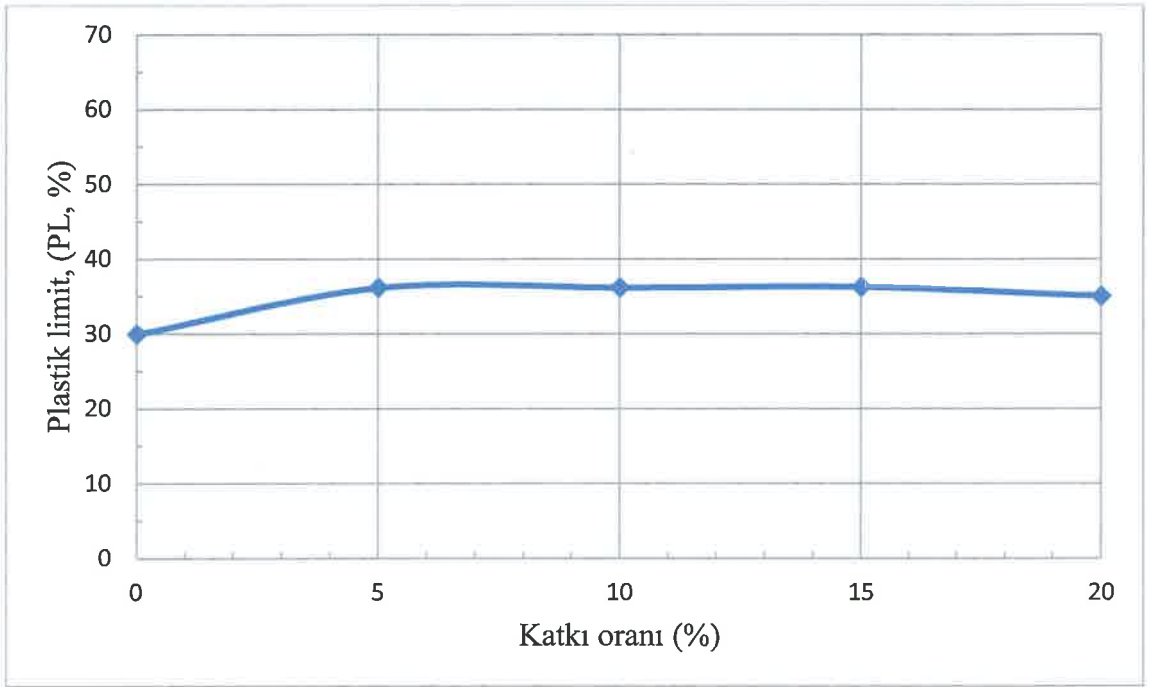
Şekil 20. SM karışımlarına ait plastik limitler.



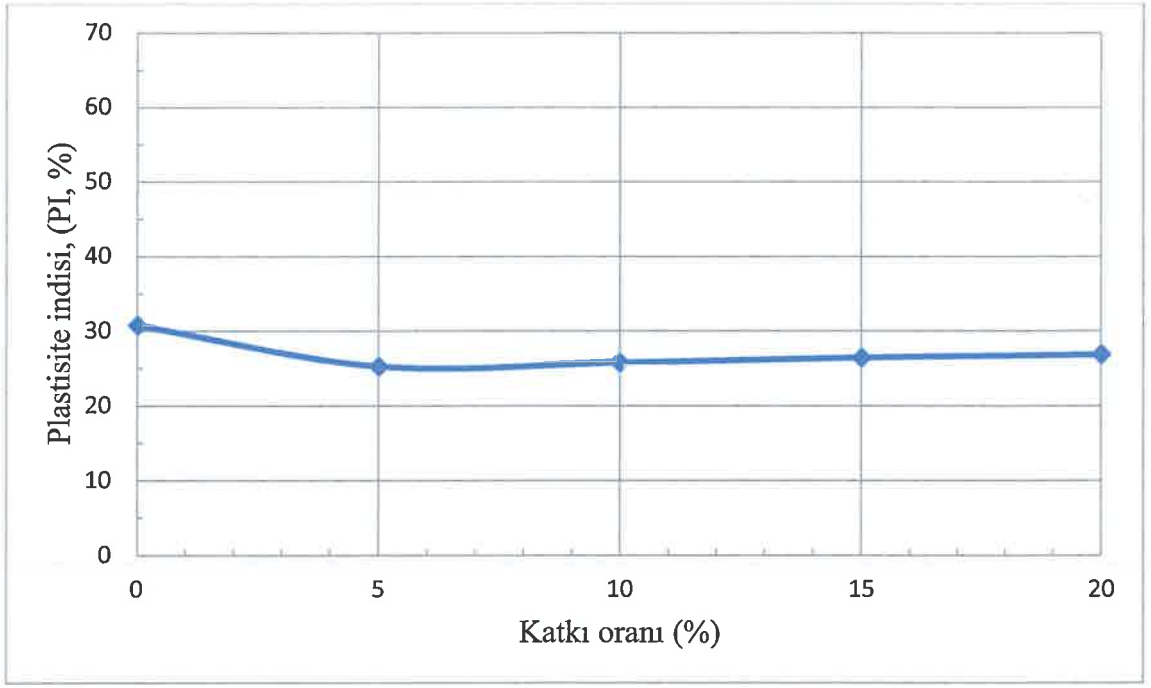
Şekil 21. SS karışımlarına ait plastik limitler.



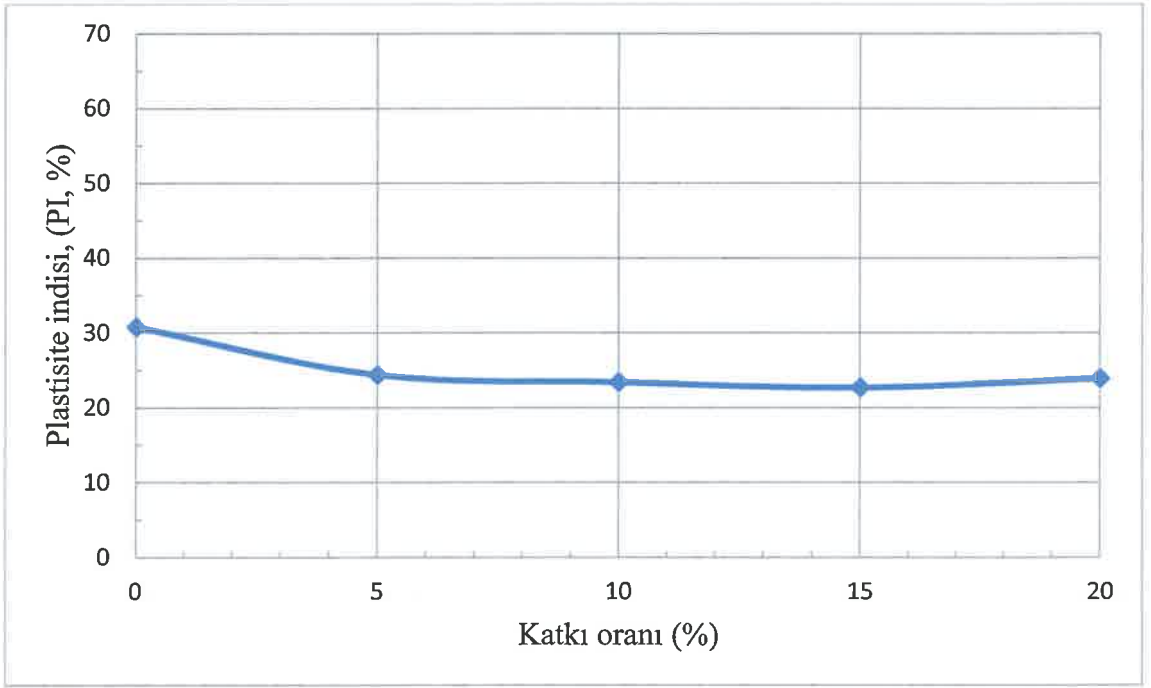
Şekil 22. SLM karışımlarına ait plastik limitler.



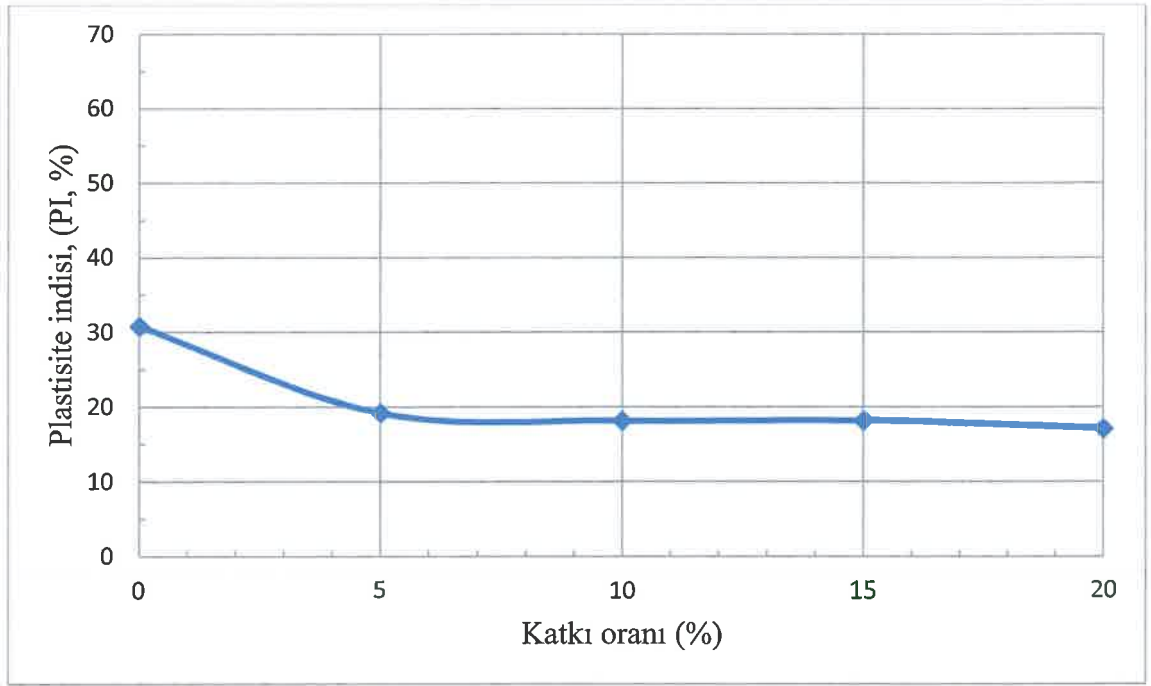
Şekil 23. SLS karışımlarına ait plastik limitler.



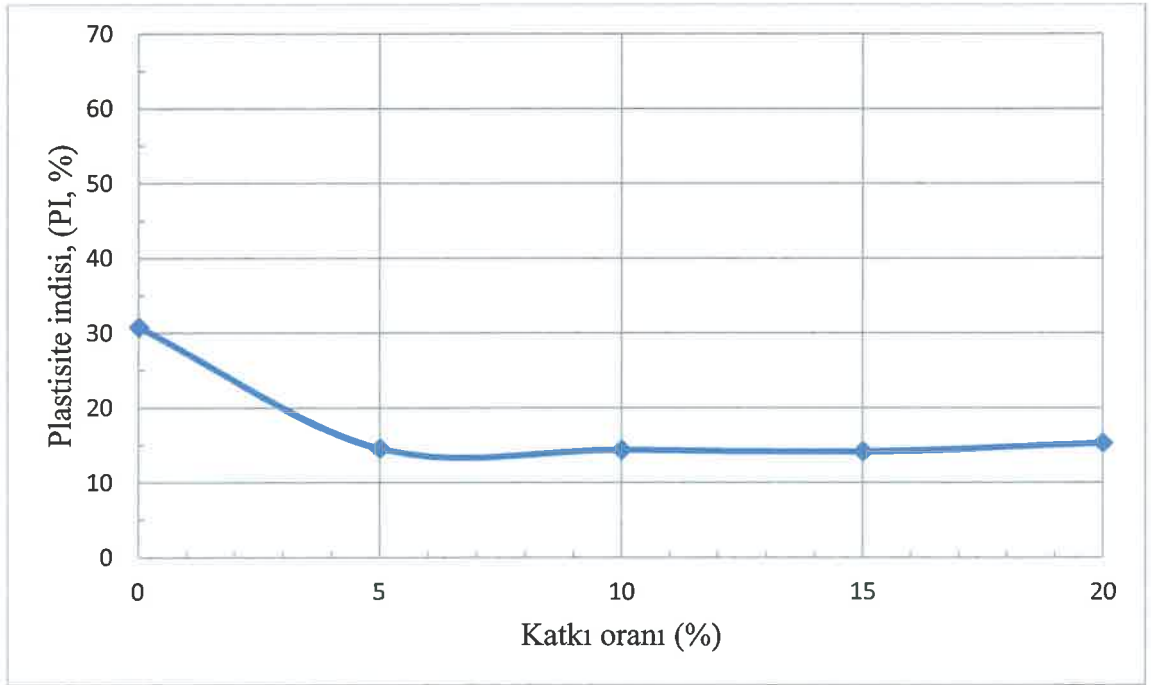
Şekil 24. SM karışımlarına ait plastisite indisleri.



Şekil 25. SS karışımlarına ait plastisite indisleri.



Şekil 26. SLM karışımlarına ait plastisite indisleri.



Şekil 27. SLS karışımlarına ait plastisite indisleri.

Kompaksiyon parametreleri.

Tez çalışması kapsamında notasyonları belirlenen toplamda 18 farklı numune yer almaktadır. Bu numunelerin kompaksiyonları yapılarak maksimum kuru yoğunlukları ve optimum su içeriği değerleri ASTM D 698 (2007) standardına uygun olarak elde edilmiştir. Kompaksiyon deneyleri sonucunda elde edilen kompaksiyon eğrisi grafikleri Ek-2'de verilmektedir. Tablo 19. ve Tablo 20.'de karışımlara ait maksimum kuru yoğunluk ve optimum su içerikleri verilmiştir.

Doğal zemine kireç katılmasıyla elde edilen SL karışımlarının kompaksiyon sonuçlarına bakıldığında optimum su içeriği değerlerinde genellikle artışlar olduğu, maksimum kuru yoğunluk değerlerinde ise azalmalar olduğu saptanmıştır. SM numuneleri'nin genel olarak doğal zemine göre maksimum kuru yoğunlukları artarken, optimum su içeriklerinde ise az da olsa düşüşler olduğu gözlemlenmiştir. SS numunelerinde ise doğal zemine göre maksimum kuru yoğunluklar azalırken, optimum su içerikleri %15'e kadar artış göstermiştir. SLM numunelerinin SL numunelerine kıyasla maksimum kuru yoğunluklarında artışlar olduğunu tespit edilirken, optimum su içeriklerinde azalmalar meydana geldiği belirlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında en düşük maksimum kuru yoğunluk ve en yüksek optimum su içeriğine SLS numunelerinde rastlanırken, en yüksek maksimum kuru yoğunluk ve en düşük optimum su içeriği değerleri SLM numunelerinde tespit edilmiştir. Karışımlara ait optimum su içerikleri sırasıyla Şekil 28., Şekil 29., Şekil 30. ve Şekil 31'de verilmiştir.

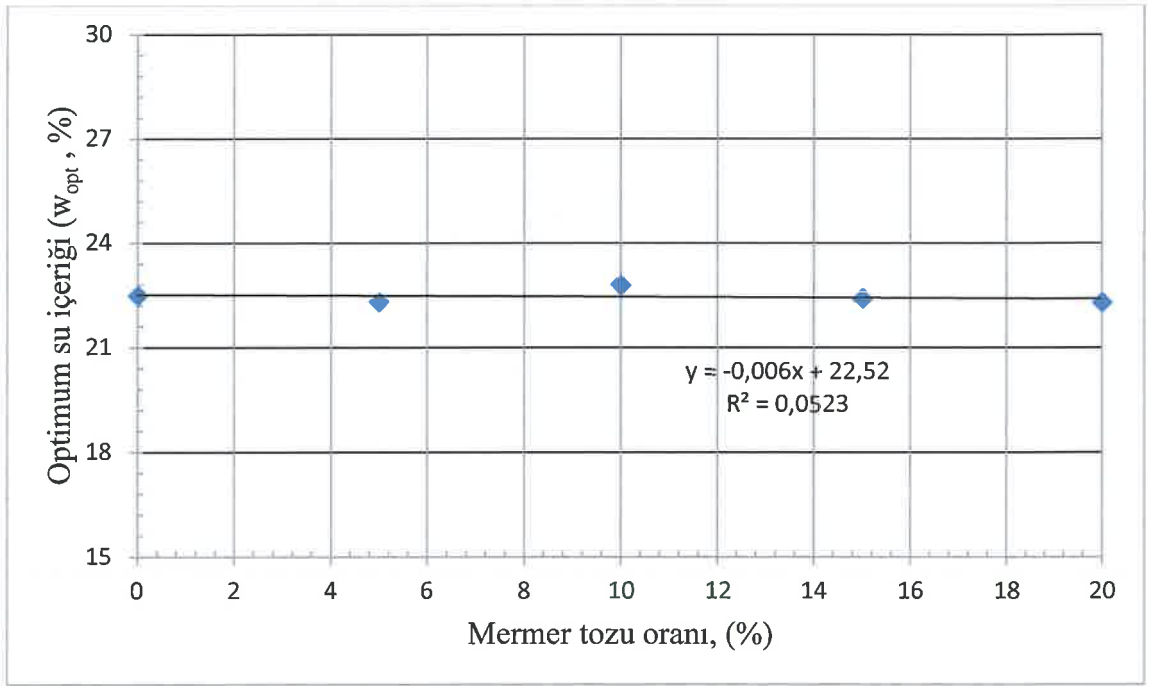
Karışımlara ait maksimum kuru yoğunluk grafikleri ise Şekil 32., Şekil 33., Şekil 34., Şekil 35.'de verilmiştir.

Tablo 19. Kireç İlavesiz Numunelerin Kompaksiyon Parametreleri

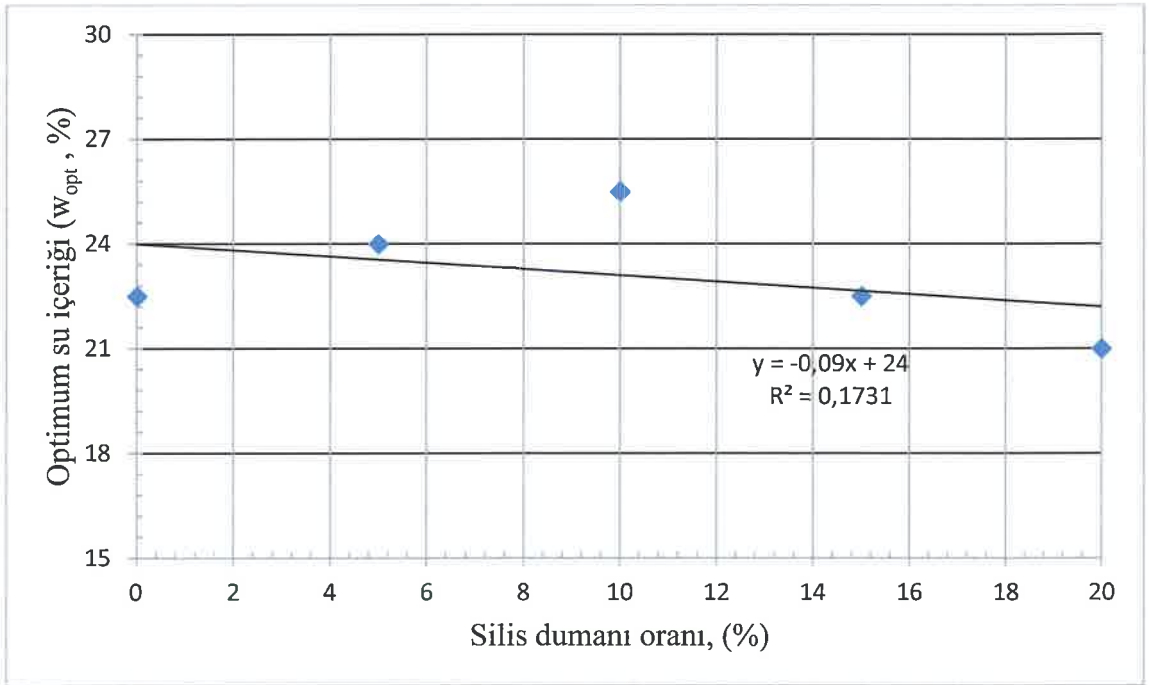
Numune	Maksimum Kuru Yoğunluk, Mg/ m ³	Optimum Su İçeriği, %
S	1,63	22,5
SM/5	1,62	22,3
SM/10	1,66	22,8
SM/15	1,65	22,4
SM/20	1,65	22,3
SS/5	1,58	24,0
SS/10	1,59	25,5
SS/15	1,54	22,5
SS/20	1,56	21,0

Tablo 20. Kireç İvelili Numunelerin Kompaksiyon Parametreleri

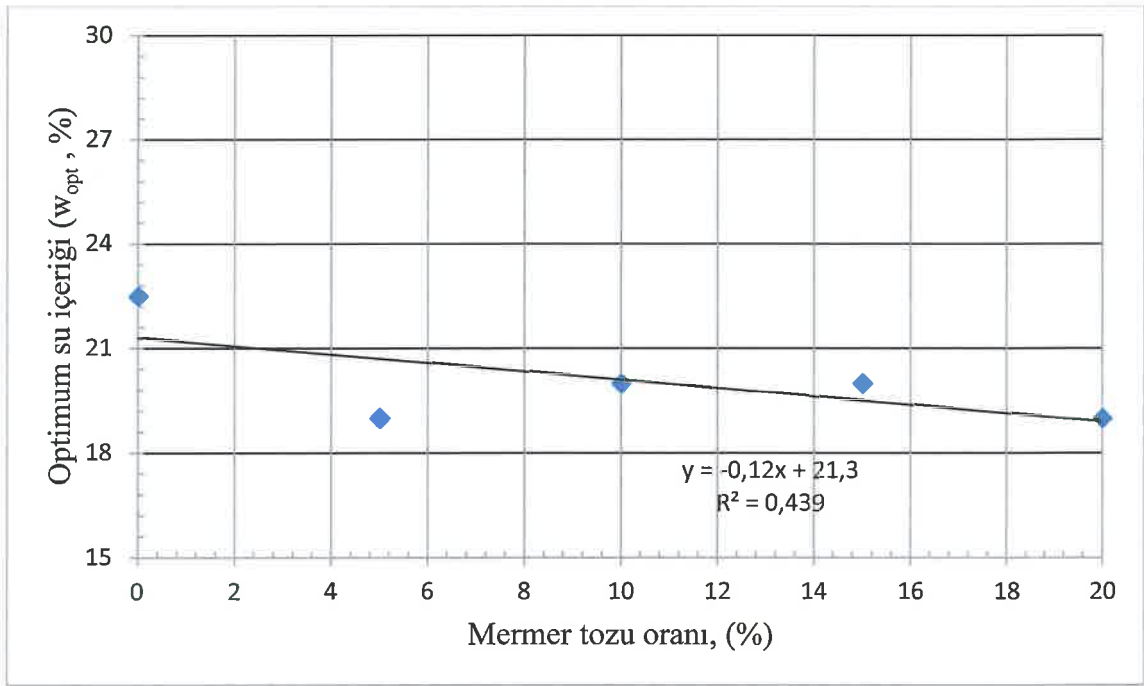
Numune	Maksimum Kuru Yoğunluk, Mg/ m ³	Optimum Su İçeriği, %
SL	1,50	26,0
SLM/5	1,62	19,0
SLM/10	1,59	20,0
SLM/15	1,64	20,0
SLM/20	1,68	19,0
SLS/5	1,56	21,0
SLS/10	1,51	25,5
SLS/15	1,49	26,0
SLS/20	1,47	26,0



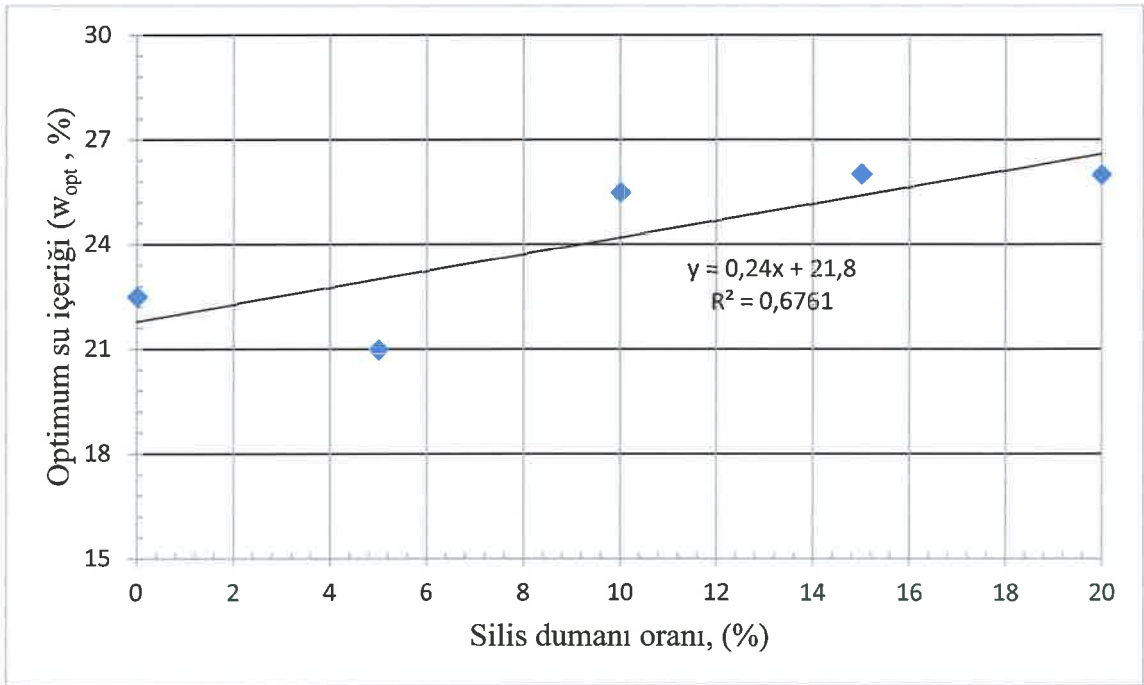
Şekil 28. SM karışımlarının optimum su içerikleri.



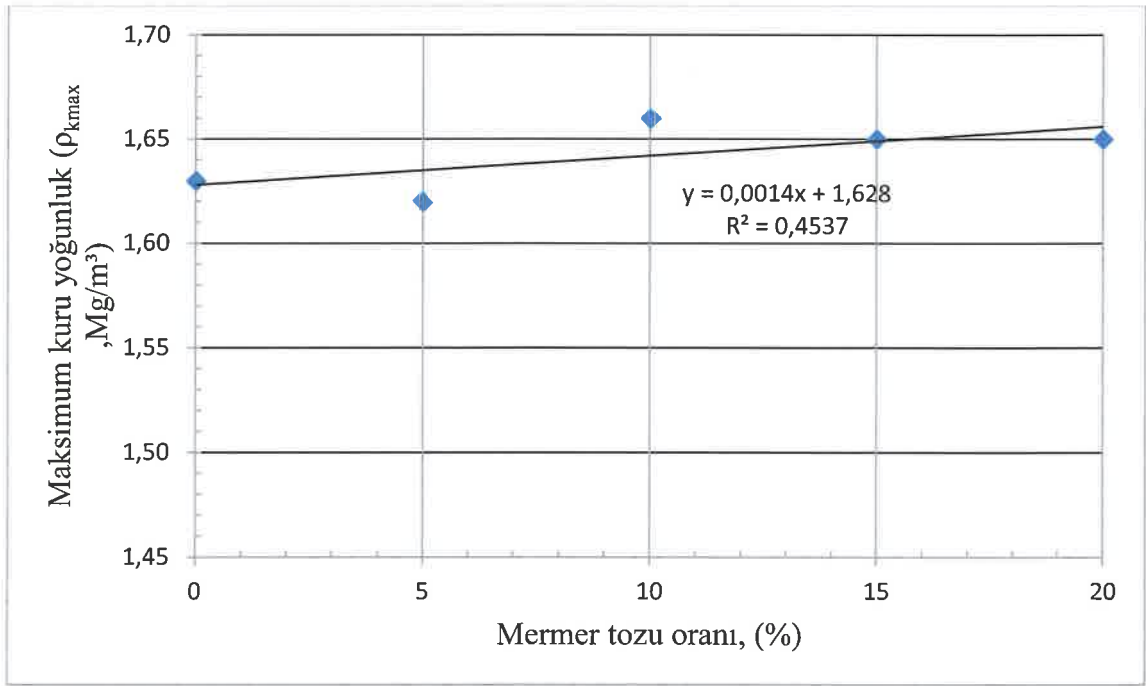
Şekil 29. SS karışımlarının optimum su içerikleri.



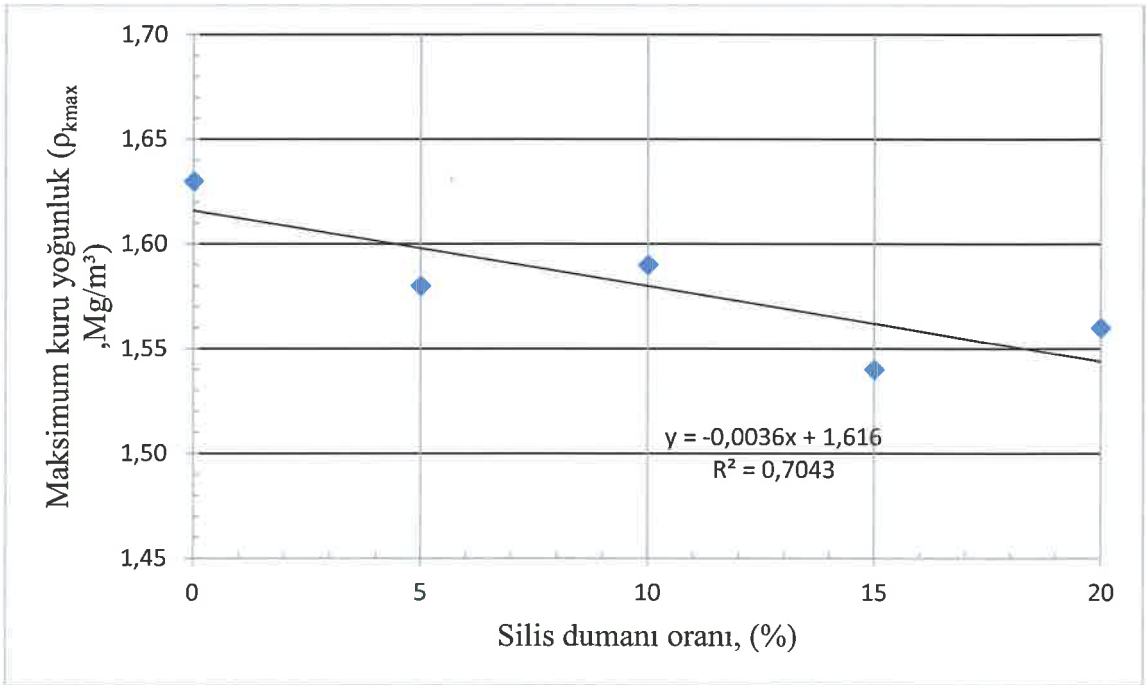
Şekil 30. SLM karışımlarının optimum su içerikleri.



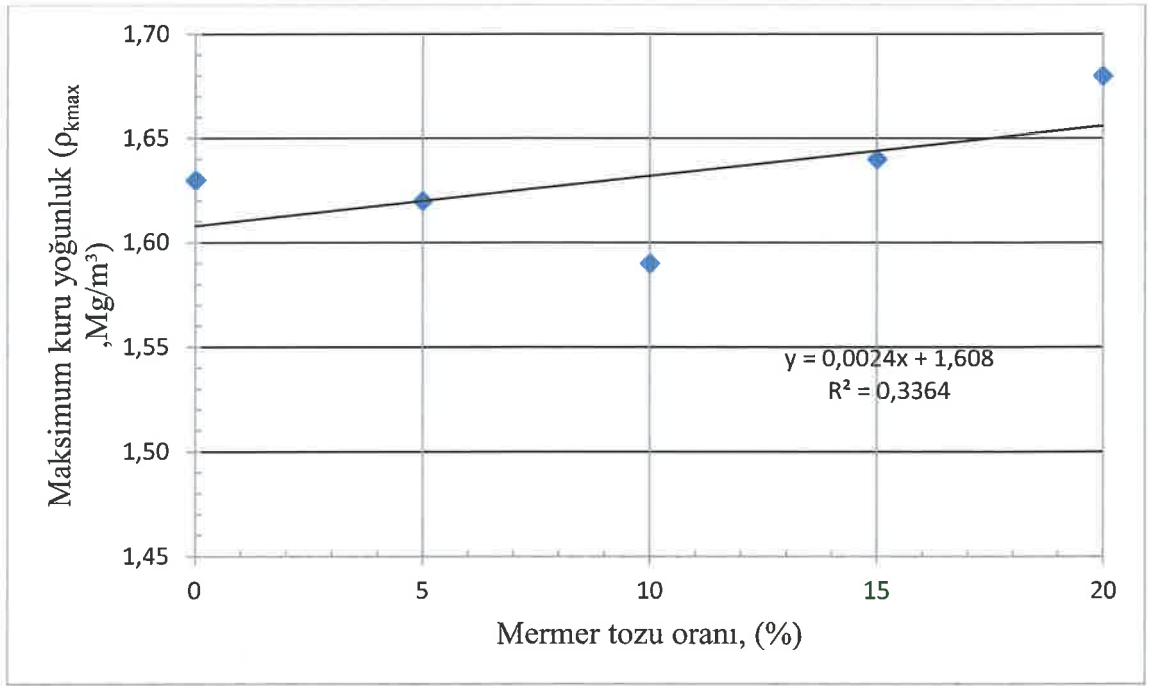
Şekil 31. SLS karışımlarının optimum su içerikleri.



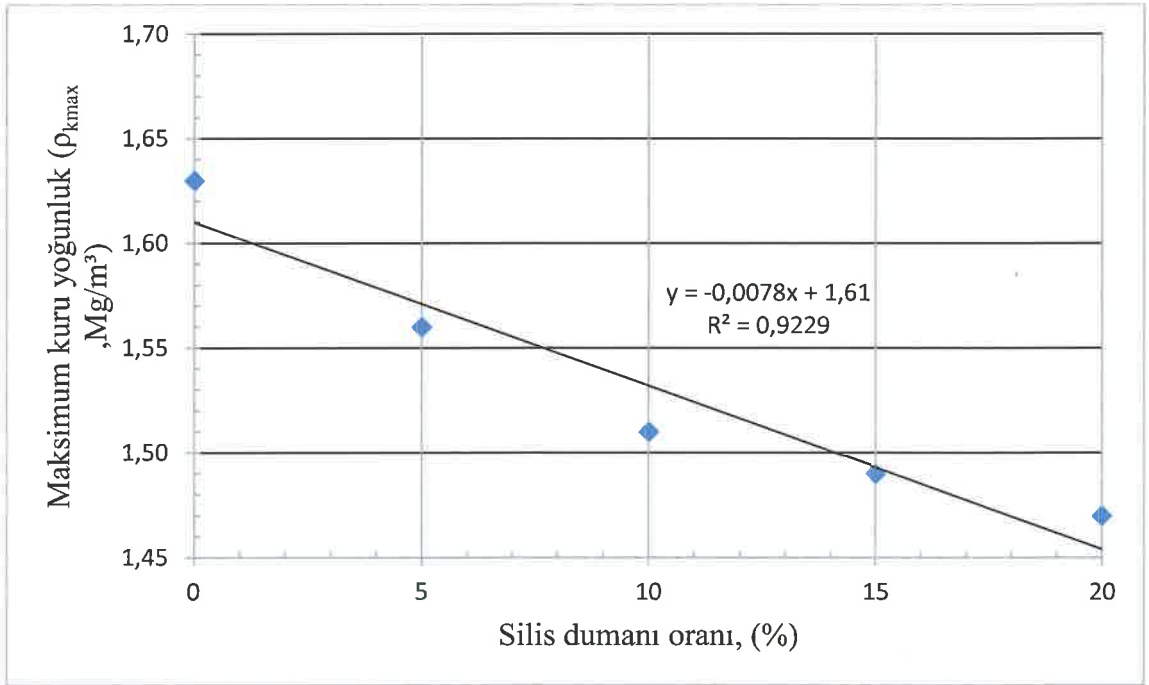
Şekil 32. SM karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları.



Şekil 33. SS karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları.



Şekil 34. SLM karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları.



Şekil 35. SLS karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları.

Serbest basınç dayanımları.

Bu çalışma kapsamında hazırlanan karışımların optimum su içerikleri belirlendikten sonra, serbest basınç deneyine geçilmiştir. Deney numuneleri silindirik olarak 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde hazırlanmıştır. Her farklı notasyon için üçer numune hazırlanarak 7 ve 28 gün kür yapıldıktan sonra tek eksenli basınç deneyi yapılmış ve kırılan üçer numunelerin ortalaması alınarak dayanım değeri belirlenmiştir.

Deneyler ASTM D 2166 (2006) standardına uygun bir biçimde yapılmıştır. Tablo 21. ve Tablo 22.'de numunelere ait 7 ve 28 günlük kür sonrası uygulanan tek eksenli basınç deneyi dayanım sonuçları verilmiştir.

Tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde doğal zemine optimum oranda kireç ilavesinin dayanımı yaklaşık 5 kat arttırdığı tespit edilmiştir. Kireçli numunelerin kırılma davranışlarına bakıldığında gevrek şekilde kırılma meydana gelirken, kireç ilavesiz numunelerin sünek kırılma davranışı gösterdiği gözlemlenmiştir.

Doğal zemine sadece silis dumanı ilave edilen numunelerde 7 ve 28. günlerindeki serbest basınç dayanım sonuçlarının %15 oranına kadar arttığı daha sonraki oranlarda düşüşe geçtiği belirlenmiştir. Doğal zeminin sadece mermer tozu ile elde edilen karışımlarında ise %10'a kadar artış gösterip daha sonraki oranlarında düşüşe geçtiği belirlenmiştir.

SLS numunelerinin SS numuneleri gibi %15'e kadar dayanımlarında artış gözlemlenirken daha sonraki oranlarda düşüşe geçtiği gözlemleniyor. Aynı şekilde SLM karışımlarında SM karışımlarında olduğu gibi %10'a kadar artış olurken daha sonraki oranlarda dayanım kayıpları meydana gelmiştir. SLS numunelerinin diğer numunelere oranla 7 ve 28. gün serbest basınç dayanım sonuçları daha yüksek çıkmıştır.

Mermer tozu ve silis dumanı ile yapılan numuneler kendi arasında incelendiğinde, mermer tozunun 7 ve 28. gün sonundaki dayanım sonuçları arasındaki fark silis dumanı numunelerinin kendi içindeki dayanım farklarından daha düşüktür. Yani kür süresi uzadıkça silis dumanlı numunelerin dayanım sonuçlarında artış olduğu gözlemlenmiştir. Bundan kür süresinin silis dumanı için daha etkin olduğunu söylemek mümkündür.

Şekil 36.'da tek eksenli serbest basınç dayanım testine ait görüntüye yer verilmiştir. Şekil 37.'de kireçli numunelerin gevrek kırılma davranışını gösteren görsellere yer verilmiştir. Şekil 38.'de kireçsiz numunelerin sünek kırılma davranışını gösteren görsellere yer verilmiştir.

Tez çalışması kapsamında hazırlanan numunelere ait serbest basınç dayanımı 7 günlük kür sonrasındaki grafikleri sırasıyla Şekil 39., Şekil 40., Şekil 41. ve Şekil 42.'de verilmiştir.

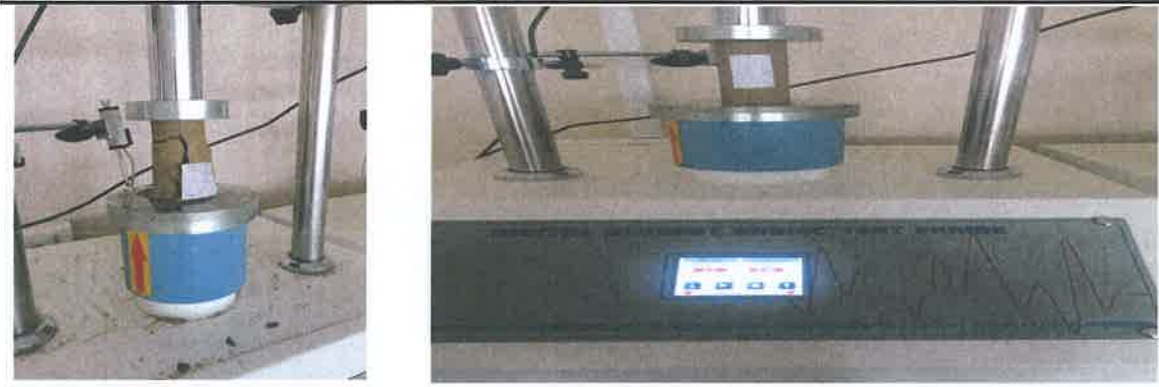
Çalışmadaki karışımlara ait numunelerin serbest basınç dayanımlarının 28 günlük kür sonrasındaki grafikleri ise sırasıyla Şekil 43., Şekil 44., Şekil 45. ve Şekil 46.'da verilmiştir.

Tablo 21. *Kireç İlavesiz Karışımlara Ait Tek Eksenli Basınç Dayanımı Sonuçları*

Numune	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kPa)	
	Kür Süresi	
	7. gün	28. gün
S	115,2	120,3
SS/5	118,3	127,0
SS/10	124,7	192,2
SS/15	167,5	267,5
SS/20	159,5	221,5
SM/5	134,0	162,1
SM/10	212,2	254,8
SM/15	174,8	192,0
SM/20	146,5	176,5

Tablo 22. *Kireç İlaveli Karışımlara Ait Tek Eksenli Basınç Dayanımı Sonuçları*

Numune	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kPa)	
	Kür Süresi	
	7. gün	28. gün
SL	560,2	657,0
SLS/5	692,2	761,4
SLS/10	1077,0	1284,3
SLS/15	1152,3	1689,5
SLS/20	1134,3	1417,6
SLM/5	621,0	672,0
SLM/10	778,3	981,2
SLM/15	710,4	937,5
SLM/20	685,3	861,2



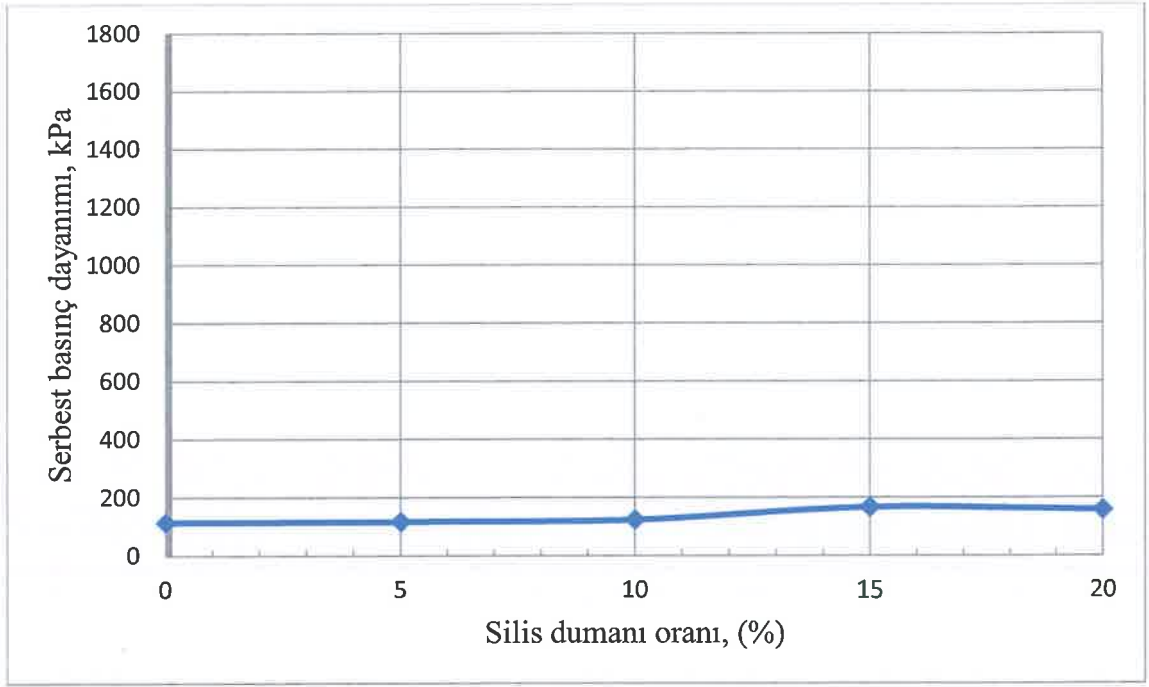
Şekil 36. Tek eksenli serbest basınç dayanım testi.



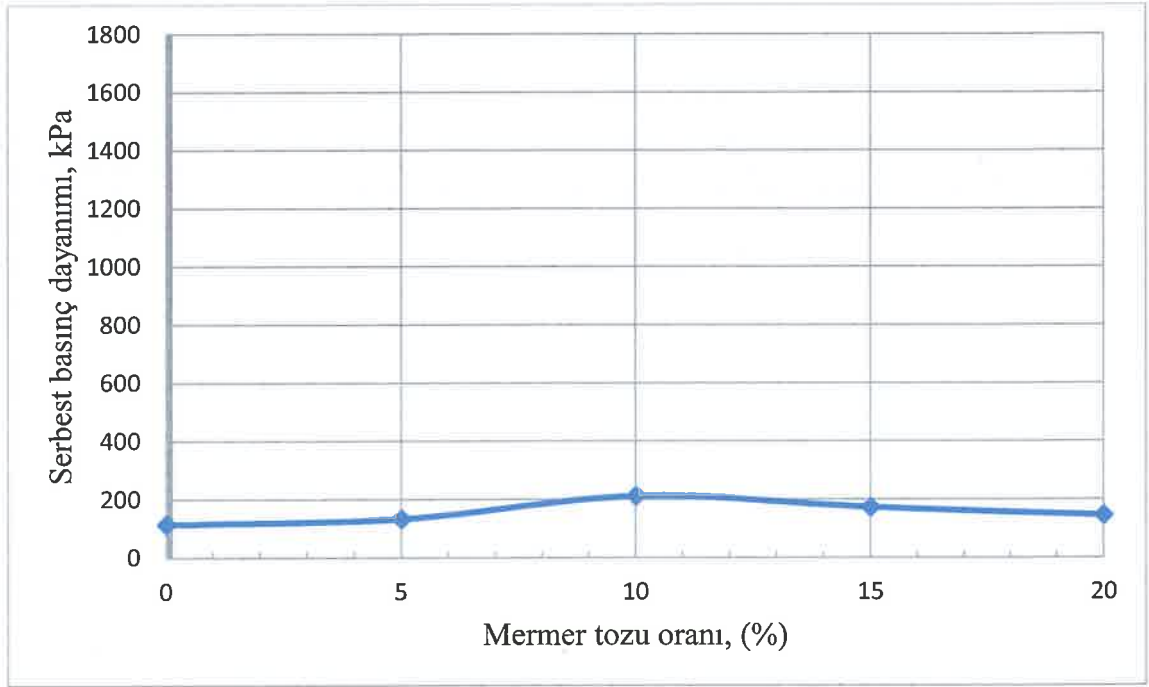
Şekil 37. Kireçli numunelerin serbest basınç dayanımı testi altındaki görüntüsü.



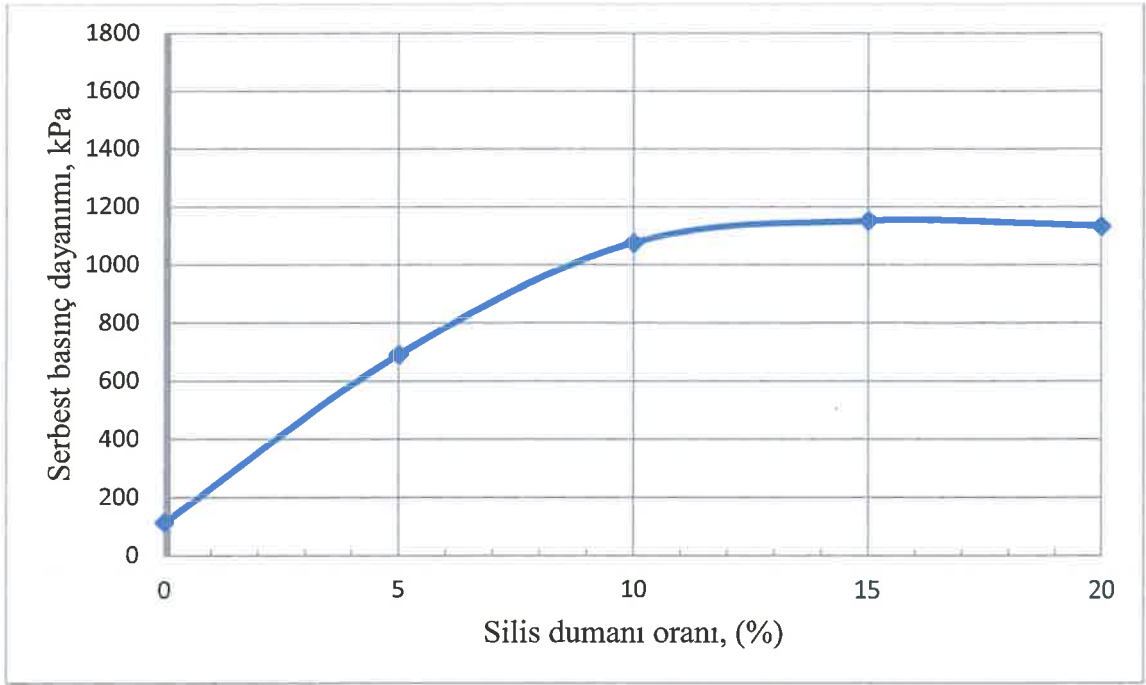
Şekil 38. Kireçsiz numunelerin serbest basınç dayanımı testi altındaki görüntüsü.



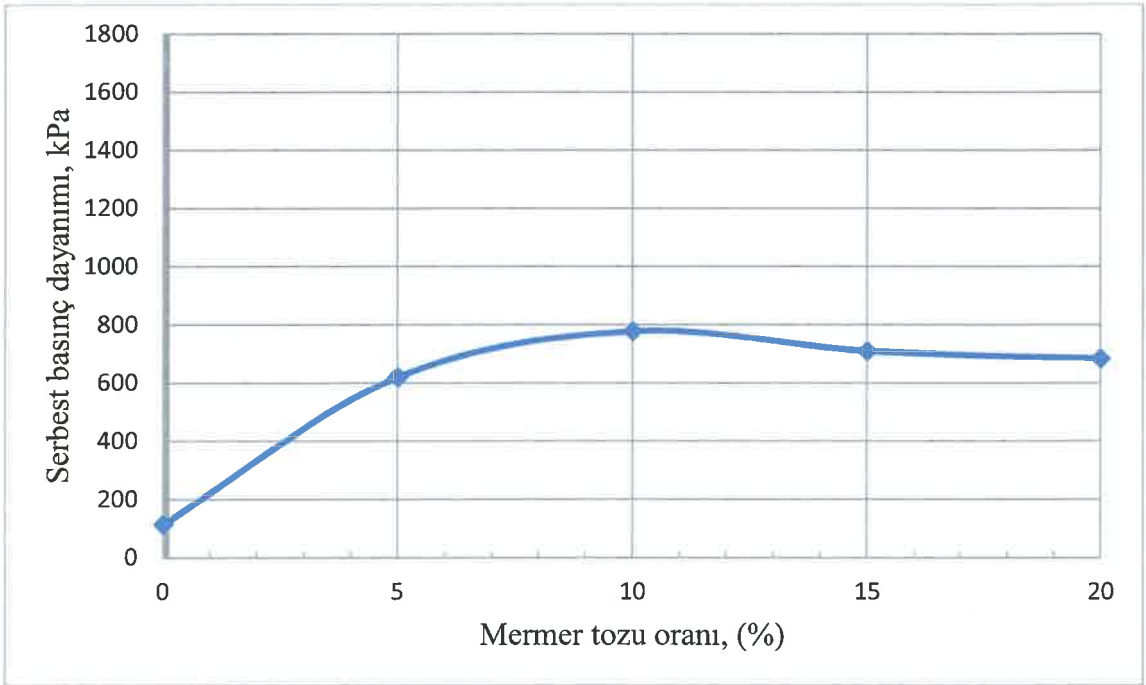
Şekil 39. SS karışımlarının 7 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları.



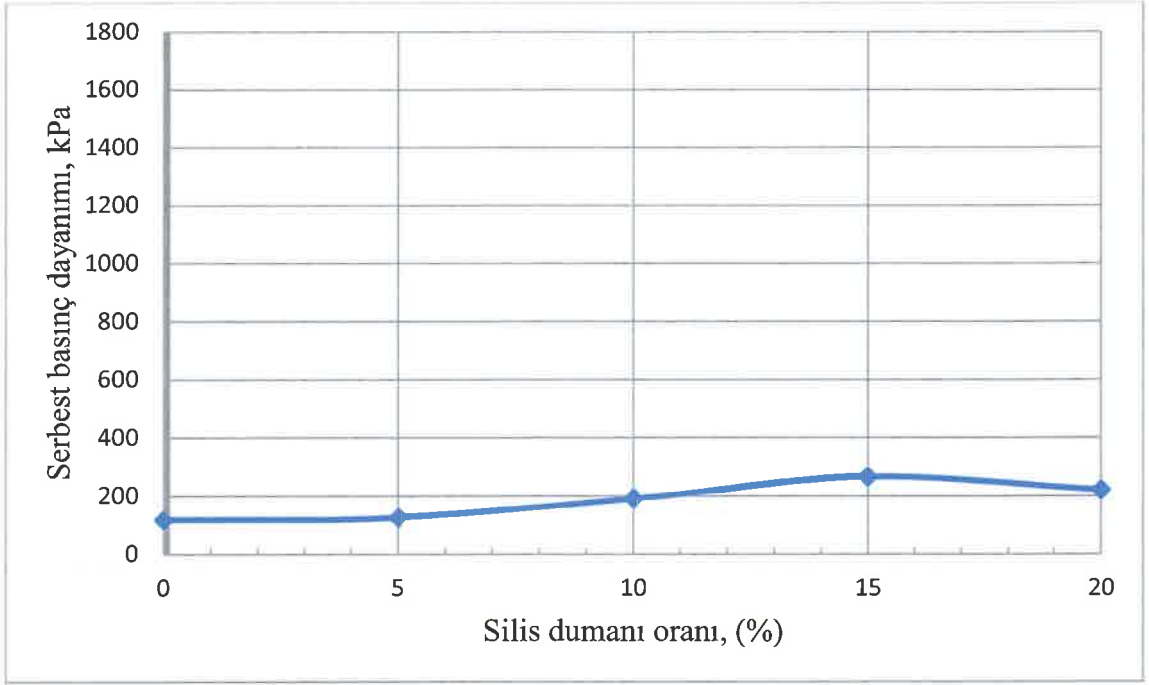
Şekil 40. SM karışımlarının 7 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları.



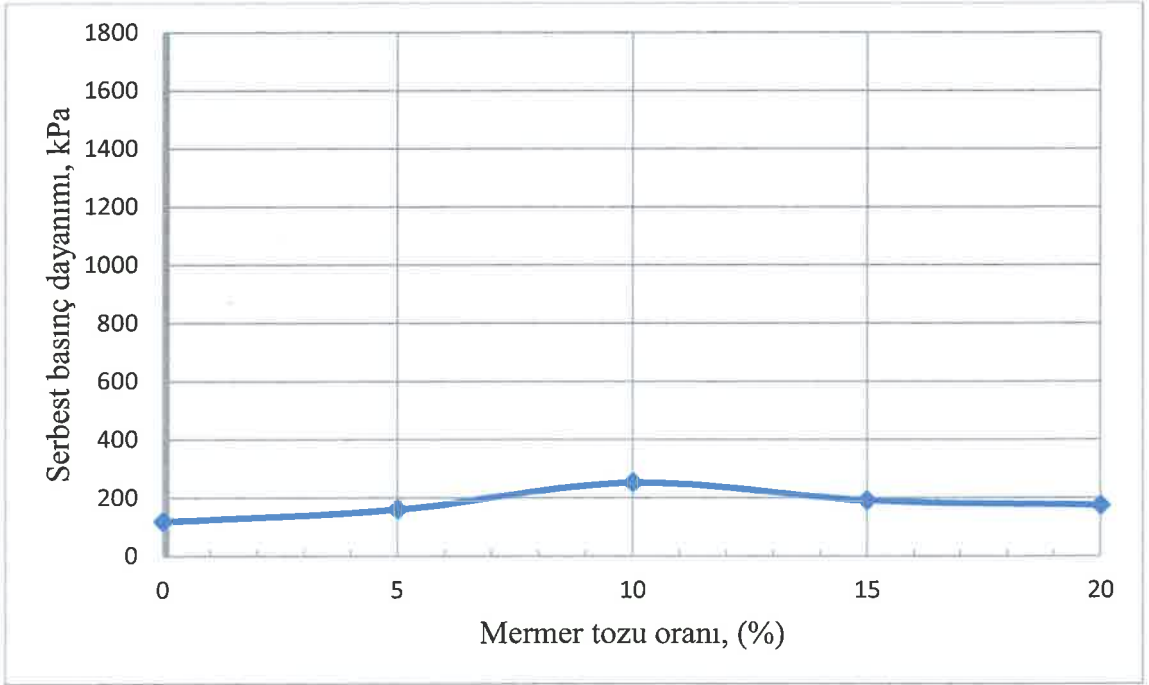
Şekil 41. SLS karışımlarının 7 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları.



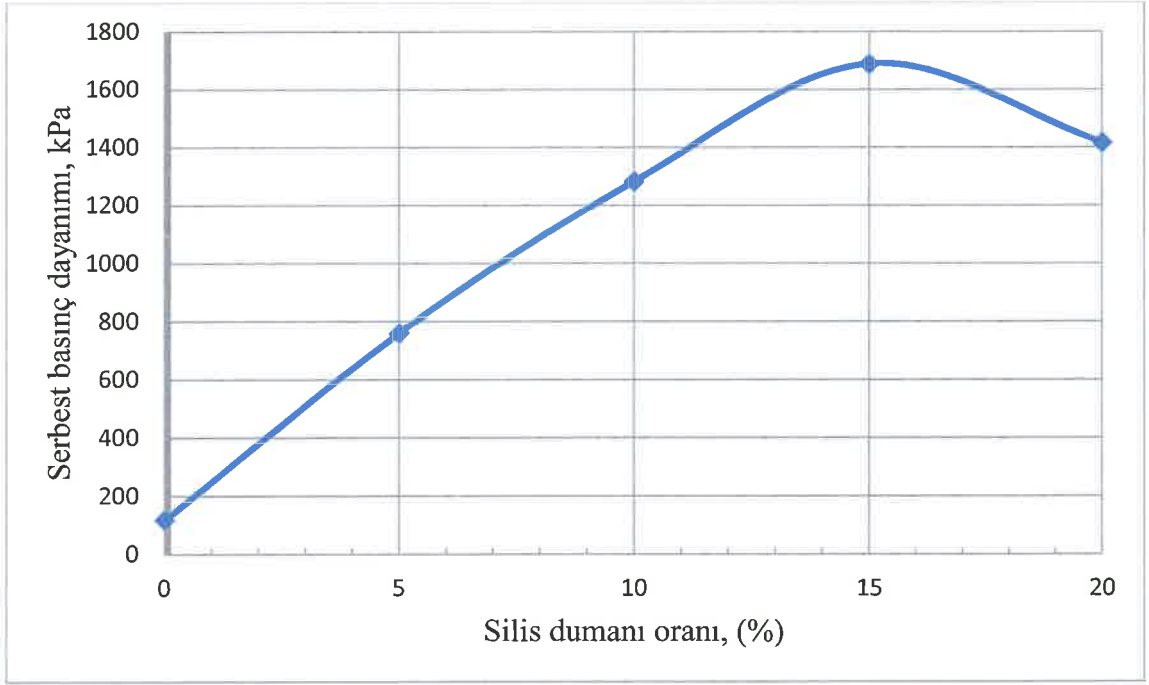
Şekil 42. SLM karışımlarının 7 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları.



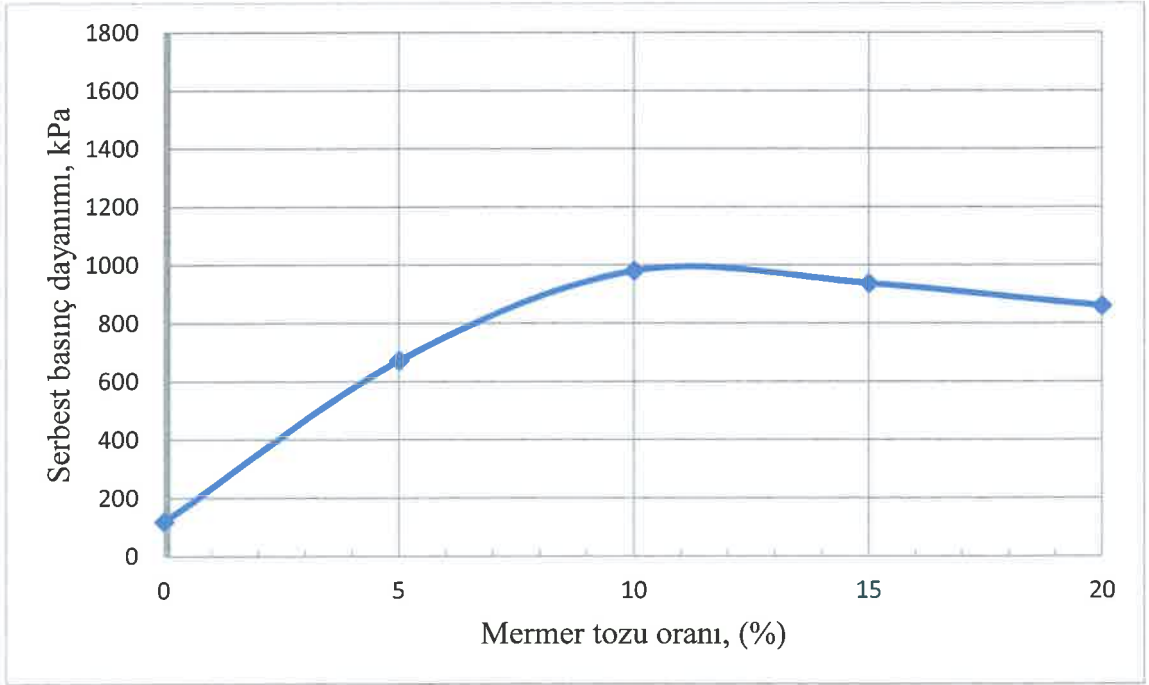
Şekil 43. SS karışımlarının 28 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları.



Şekil 44. SM karışımlarının 28 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları.



Şekil 45. SLS karışımlarının 28 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları.



Şekil 46. SLM karışımlarının 28 günlük kürden sonraki serbest basınç dayanımları.

Durabilite tetkikleri.

Yüksek lisans tez çalışması kapsamında hazırlanan numunelerin farklı çevre durumlarında ortaya koyduğu dayanım davranışlarını belirlemek amacıyla hazırlanan deney numunelerine ASTM D 560 (1996) standardına uygun donma-çözülme ve ASTM D 559 (2003) standardına göre ıslanma-kuruma deneyleri yapılmıştır.

Islanma-kuruma deneyi.

Islanma-kuruma deneyleri için 50 mm çapında 100 mm yüksekliğinde 18 adet silindir deney numuneleri hazırlanmıştır. Bu deney için hazırlanan numuneler 28 gün kür edildikten sonra 12 ıslanma-kuruma periyodu gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde sadece silis dumanı içeren numuneler ıslanma-kuruma çevrimi sırasında hacimsel bütünlüğünü 2. günün sonunda tamamen kaybetmişlerdir. Silis dumanı içeren numunelerden sadece SLS/15 12 gün ıslanma-kuruma periyoduna dayanmıştır. Şekil 47.'de ıslanma-kuruma çevrimine ait görüntüler yer almaktadır. Şekil 48.'de silis dumanı içeren numunelerin ıslanma-kuruma periyoduna ait, Şekil 49.'da ise silis dumanlı numunelerin 12 gün çevrimin sonuna ait görsellere yer verilmiştir.

Mermer tozu içeren numuneler ıslanma-kuruma periyoduna karşı yapısal bütünlüklerini korumuştur. Şekil 50.'de mermer tozu içeren numunelerin 12 ıslanma-kuruma çevrimi sonundaki görüntüsüne yer verilmiştir.

Şekil 51.'de doğal zemin ve silis dumanı içeren numunelerin, Şekil 52.'de doğal zemin, kireç ve silis dumanı içeren numunelerin ıslanma-kuruma çevrim süreleri verilmiştir. Şekil 53.'de doğal zemin ve mermer tozu içeren numunelerin, Şekil 54.'de doğal zemin, kireç ve mermer tozu içeren numunelerin ıslanma-kuruma çevrim süreleri verilmiştir.



Islanma periyodu



Kuruma periyodu

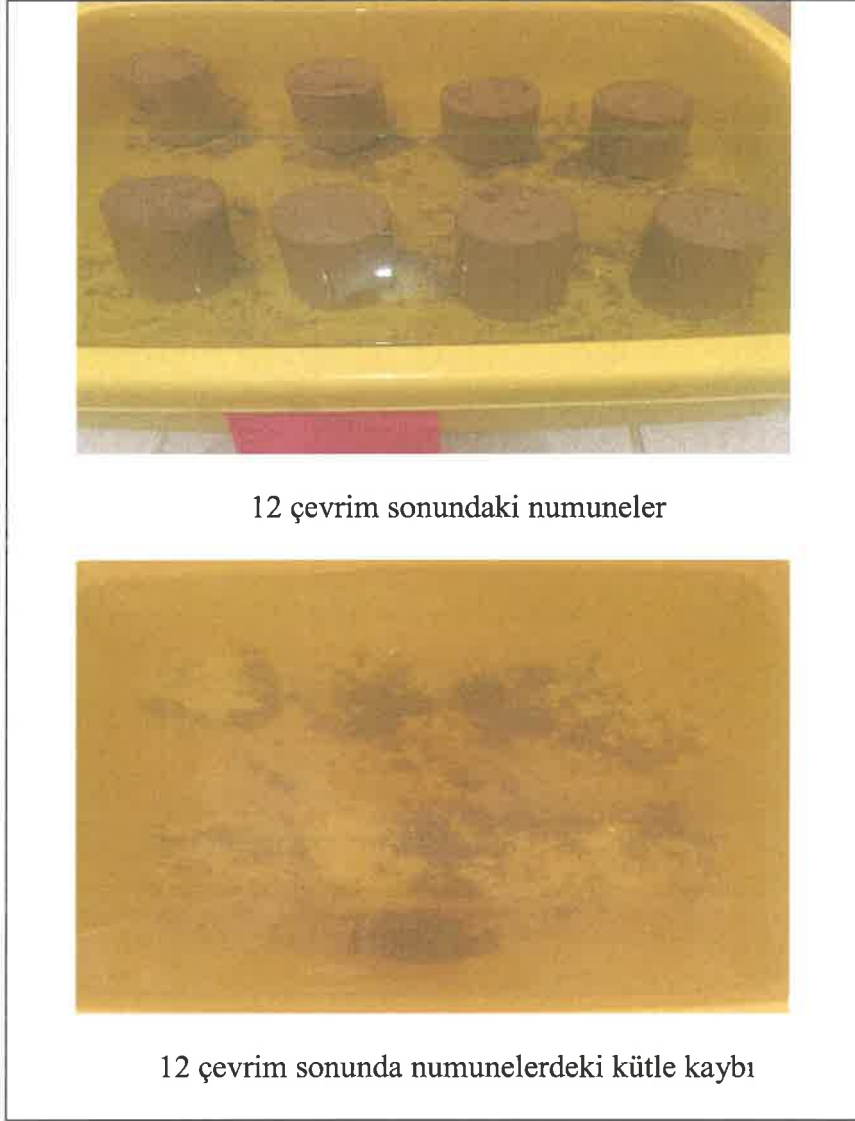
Şekil 47. Islanma-kuruma çevrimine ait görüntü.



Şekil 48. Silis dumanı içeren numunelerin ıslanma-kuruma çevrimine ait görüntüsü.



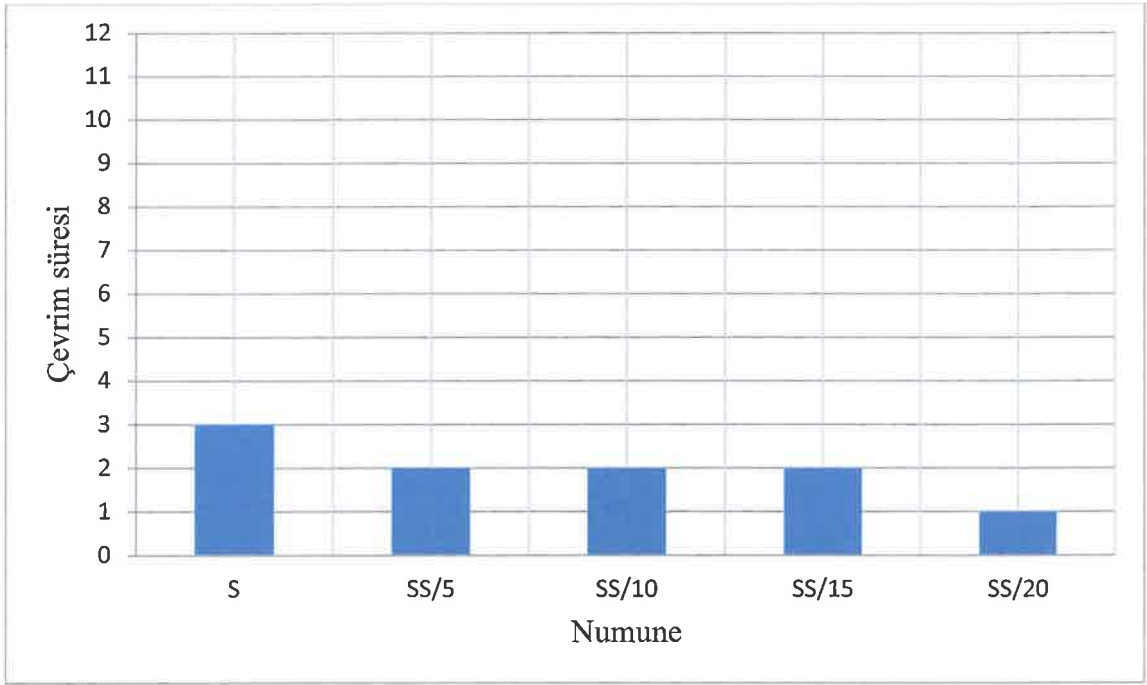
Şekil 49. Silis dumanı içeren numunelerin 12 gün çevriminin sonuna ait görüntüsü.



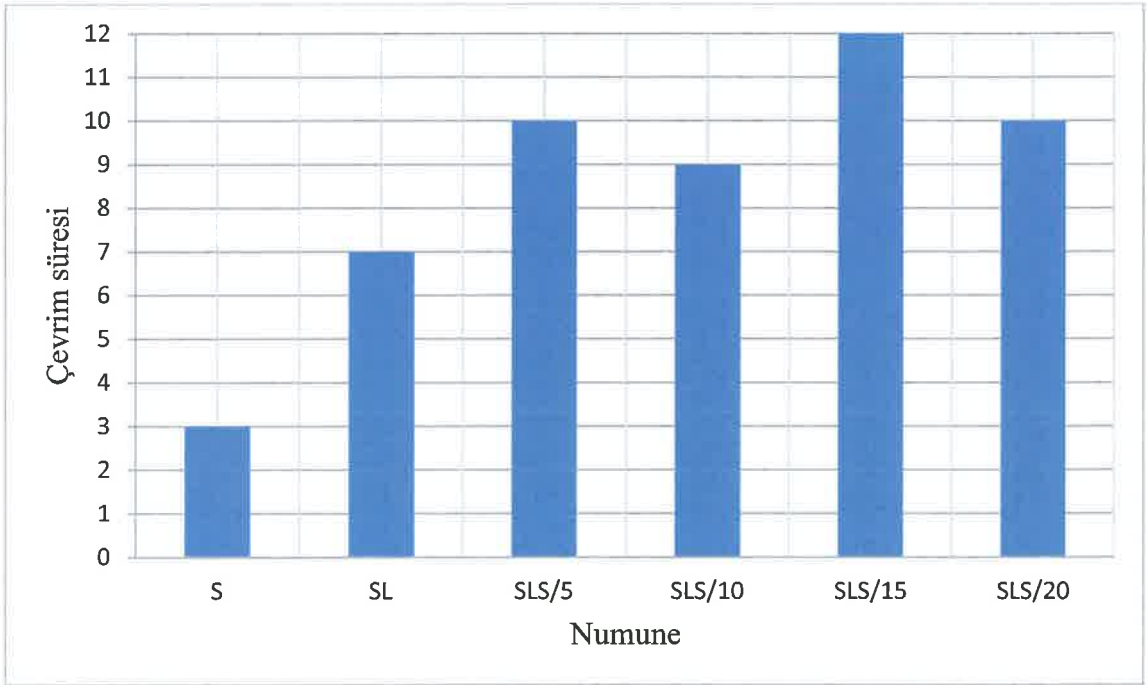
12 çevrim sonundaki numuneler

12 çevrim sonunda numunelerdeki kütle kaybı

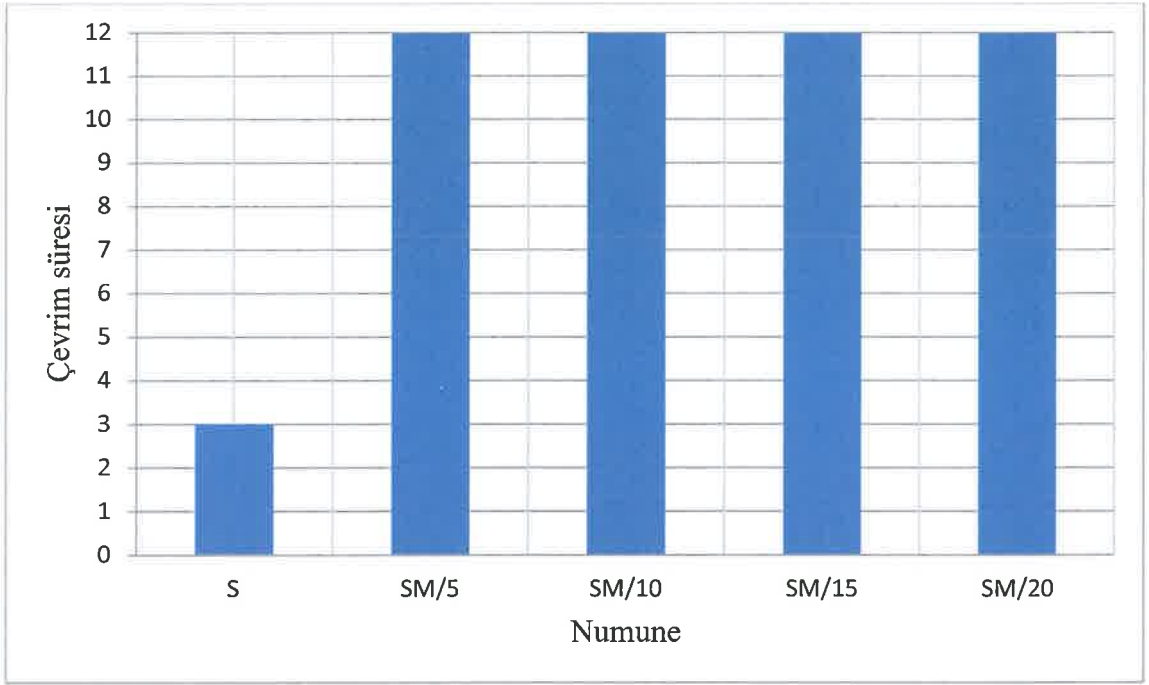
Şekil 50. Mermer tozu içeren numunelerin 12 gün çevriminin sonuna ait görüntüsü.



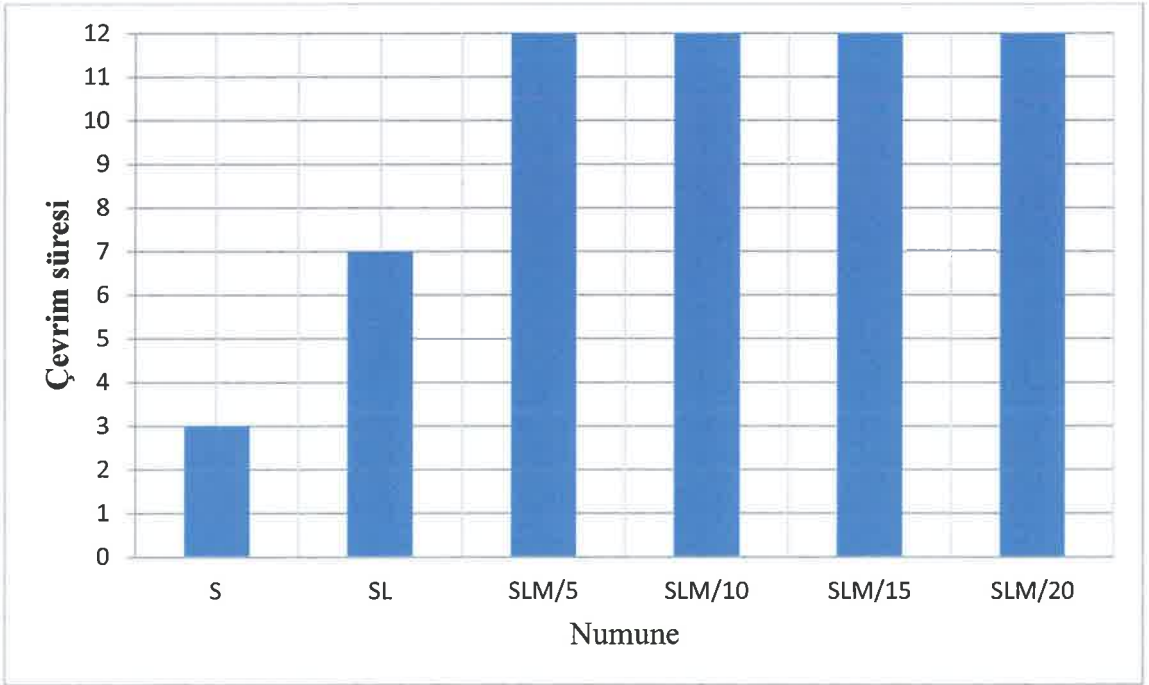
Şekil 51. S ve SS numunelerinin çevrim süresi grafiği.



Şekil 52. S, SL ve SLS numunelerinin çevrim süresi grafiği.



Şekil 53. S ve SM numunelerinin çevrim süresi grafiği.



Şekil 54. S, SL ve SLM numunelerinin çevrim süresi grafiği.

Donma-çözülme deneyi.

Yüksek lisans tez çalışması kapsamında hazırlanan numunelere 28 gün kür uygulandıktan sonra ASTM D 560 (1996) standardına göre 12 donma-çözülme çevrimi uygulanmıştır. Çevrimin tamamlanmasının ardından dayanımlarını belirlemek için numuneler üzerinde tek eksenli serbest basınç deneyi yapılmıştır. Şekil 55.'de numunelerin donma-çözülme deneyine ait görüntüye yer verilmektedir.

Bu deney için her bir karışımdan üçer adet toplamda 54 numune hazırlanmış 28 gün kür edildikten sonra 12 donma-çözülme çevrimine tabi tutulmuş daha sonra tek eksenli serbest basınç deneyi yapılarak ortalamaları hesaba katılmıştır. Tablo 23.'de kireç ilavesiz numunelerin, Tablo 24.'de kireç ilaveli numunelerin serbest basınç dayanım verileri verilmiştir.

Donma-çözülme sonrasındaki serbest basınç değerleri incelendiğinde genel olarak SS ve SM karışımlarının serbest basınç değerlerinde düşüş olduğu gözlemlenmiştir. SS karışımlarının dayanımlarında %15 oranına kadar artışlar olurken, sonraki yüzdelerde düşüş meydana gelmiştir. SM karışımlarında ise bu artışlar %10 oranına kadar olurken diğer yüzdelerde düşüşler tespit edilmiştir. SLS ve SLM karışımlarında SL karışımlarına nazaran serbest basınç değerlerinin yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. SLS karışımlarında %15 oranına kadar artışlar olurken sonraki yüzdelerde düşüşler, SLM karışımlarında ise %10 oranına kadar artışlar olurken diğer yüzdelerde düşüşler tespit edilmiştir. Silis dumanı ile yapılan karışımların mermer tozu karışımlarına göre donma-çözülme ve 28 günlük serbest basınç dayanımları arasındaki yüzde değişim farkının daha fazla olduğu belirlenmiştir. SLM numunelerinin SM numunelerine göre donma-çözülmede daha etkin olduğu tespit edilmiştir. Silis dumanı ve mermer tozu kireçle birlikte kullanıldığında benzer davranış gösterdiği ve silis dumanı ve kirecin daha güçlü dayanım verilerinin olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre silis dumanının mermer tozuna göre serbest basınç değerinde daha etkin olduğu, donma-çözülme çevriminde ise 28 günlük serbest basınç dayanımı ile donma-çözülme çevrimi sonundaki dayanım arasındaki fark mermer tozunda daha düşük olduğundan donma-çözülmede mermer tozu daha etkin diyebiliriz.

Şekil 56., Şekil 57., Şekil 58. ve Şekil 59.'da sırasıyla SS, SM, SLS ve SLM numunelerin donma-çözülme çevrimi sonrasındaki tek eksenli serbest basınç dayanımı değerleri grafiği verilmiştir.

Şekil 60., Şekil 61., Şekil 62. ve Şekil 63.'de sırasıyla SS, SM, SLS ve SLM numunelerin 28 günlük serbest basınç değerleri ile donma-çözülme çevrimi sonrası serbest basınç dayanımı değerleri arasındaki yüzde değişimleri grafiği verilmiştir.



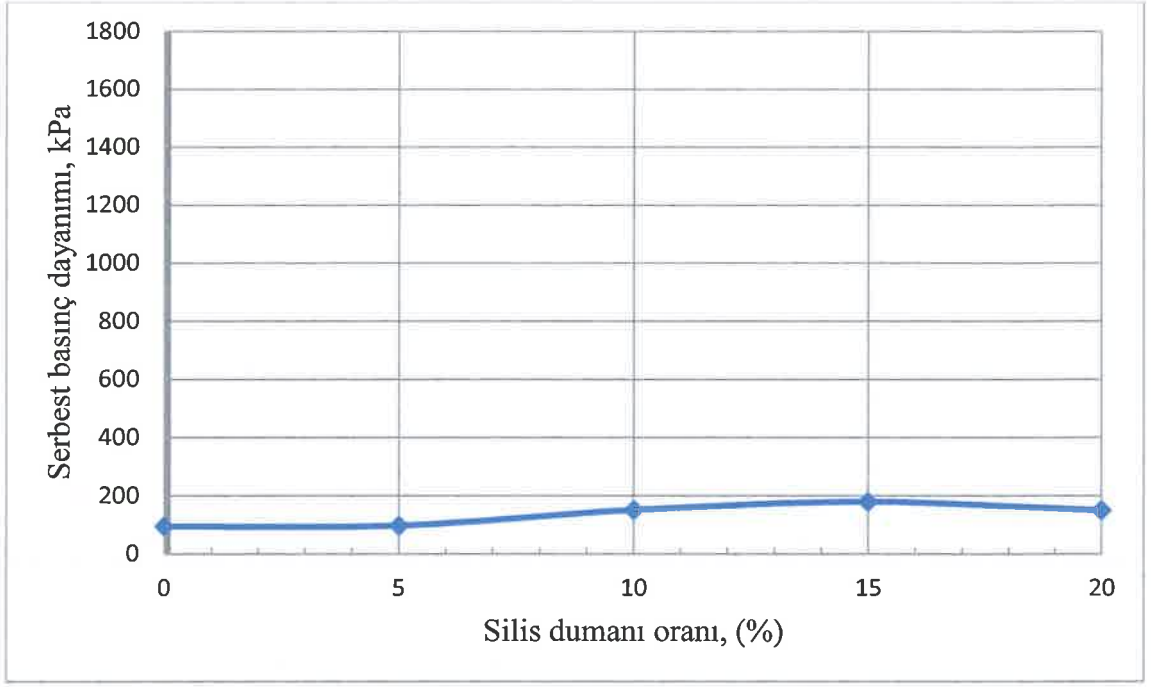
Şekil 55. Donma-çözülme çevrimine ait görüntü.

Tablo 23. Kireç İlavesiz Numunelerin Donma-Çözülme Periyodu Sonrası Tek Eksenli Basınç Dayanım Sonuçları

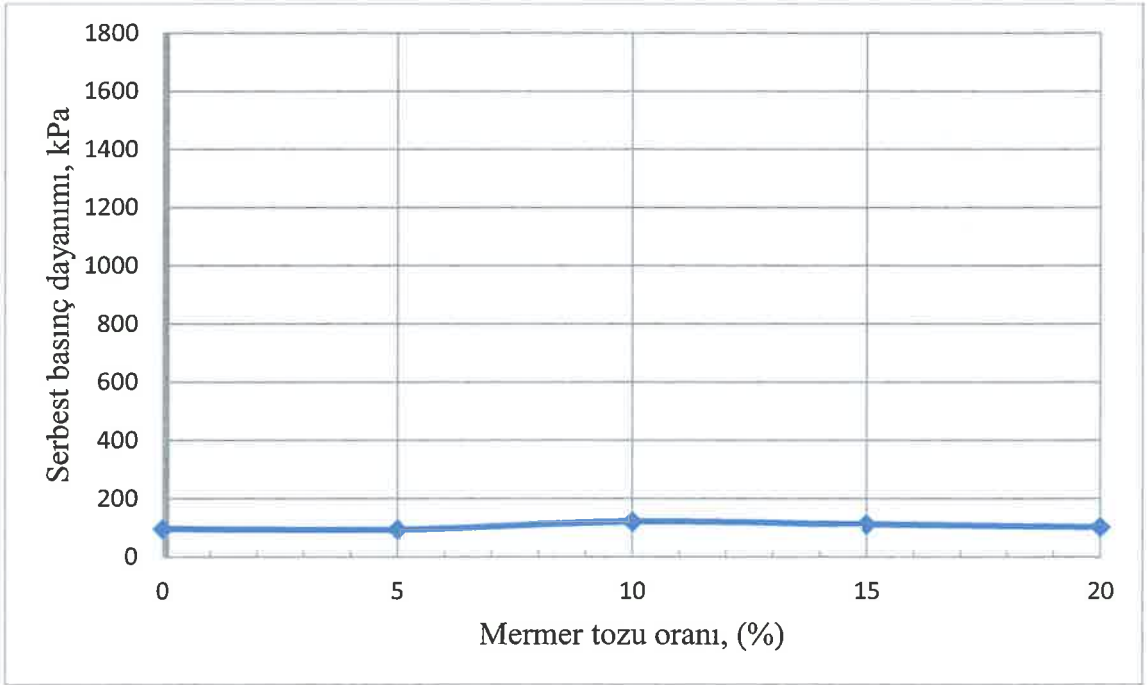
Numune	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kPa)
S	96,3
SS/5	99,2
SS/10	153,2
SS/15	181,0
SS/20	152,1
SM/5	94,2
SM/10	121,5
SM/15	112,3
SM/20	103,0

Tablo 24. Kireç İlaveli Numunelerin Donma-Çözülme Periyodu Sonrası Tek Eksenli Basınç Dayanım Sonuçları

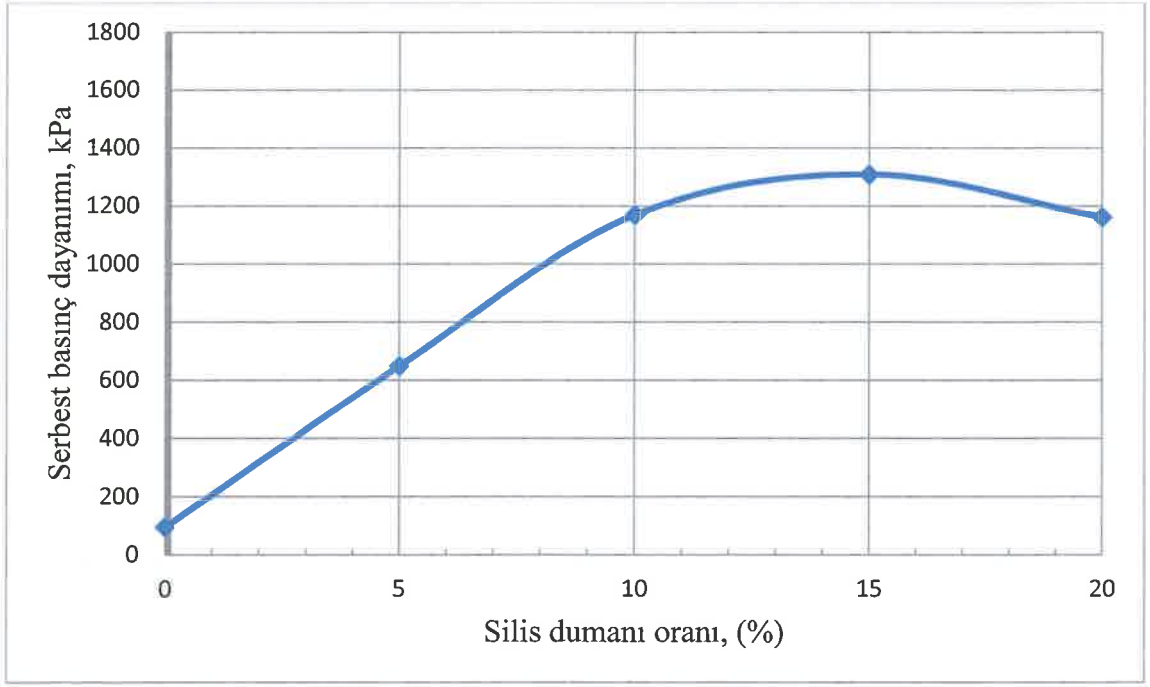
Numune	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kPa)
SL	640,2
SLS/5	650,0
SLS/10	1170,2
SLS/15	1310,2
SLS/20	1162,3
SLM/5	649,0
SLM/10	822,5
SLM/15	800,0
SLM/20	770,1



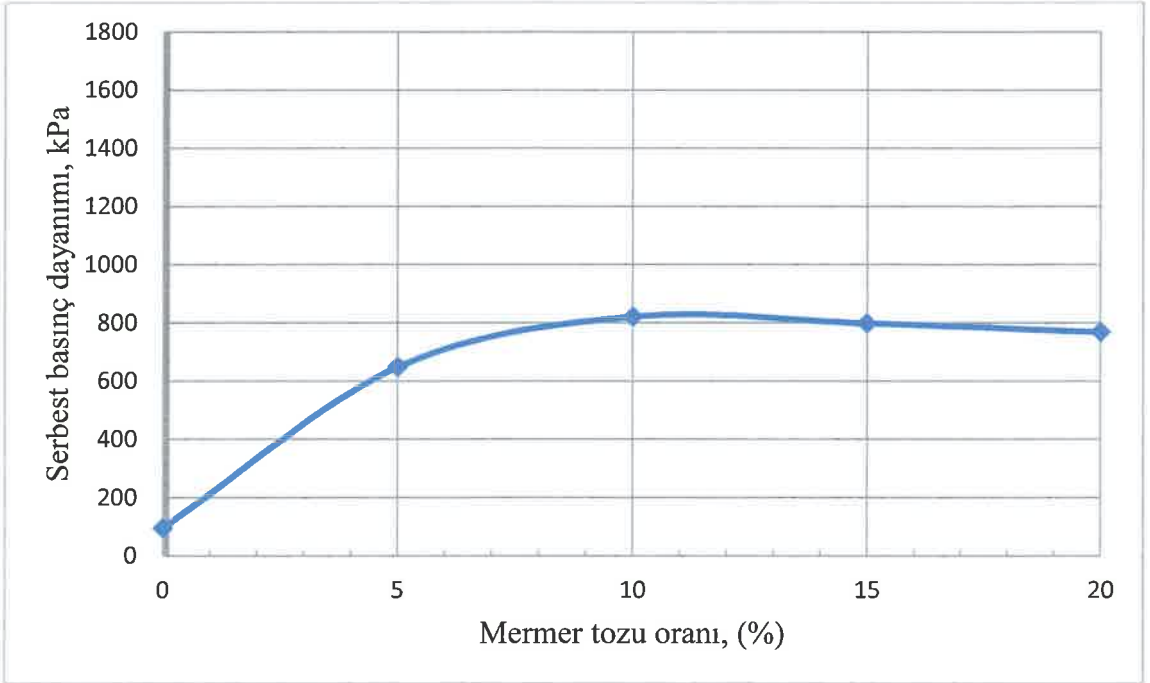
Şekil 56. SS karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımları.



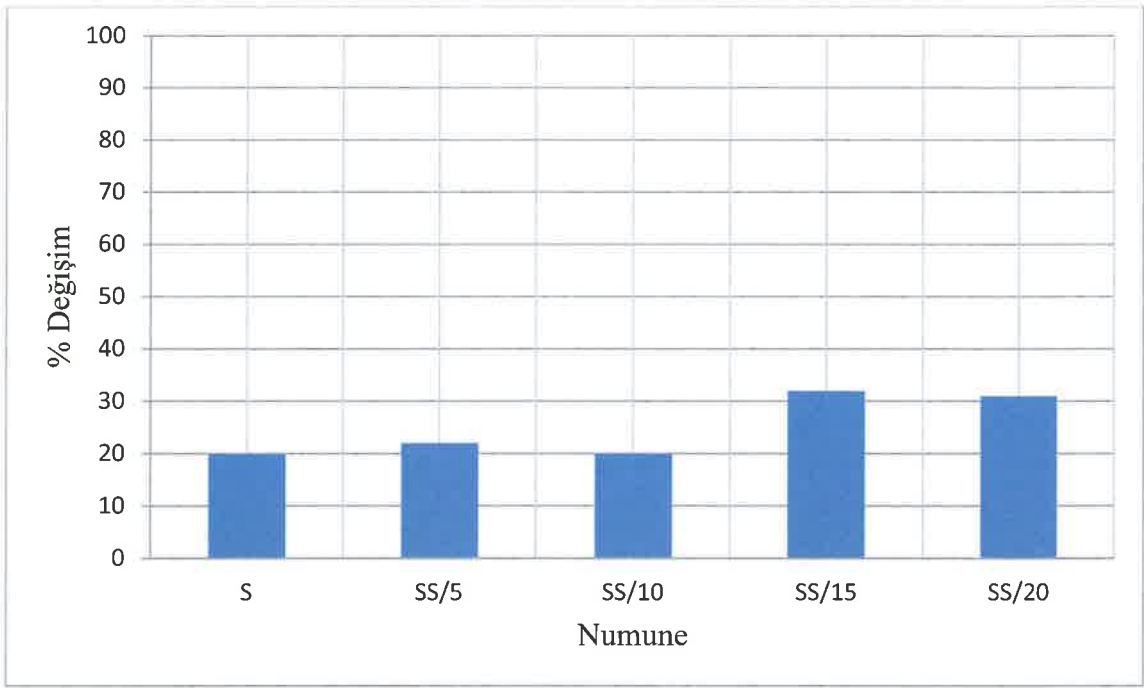
Şekil 57. SM karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımları.



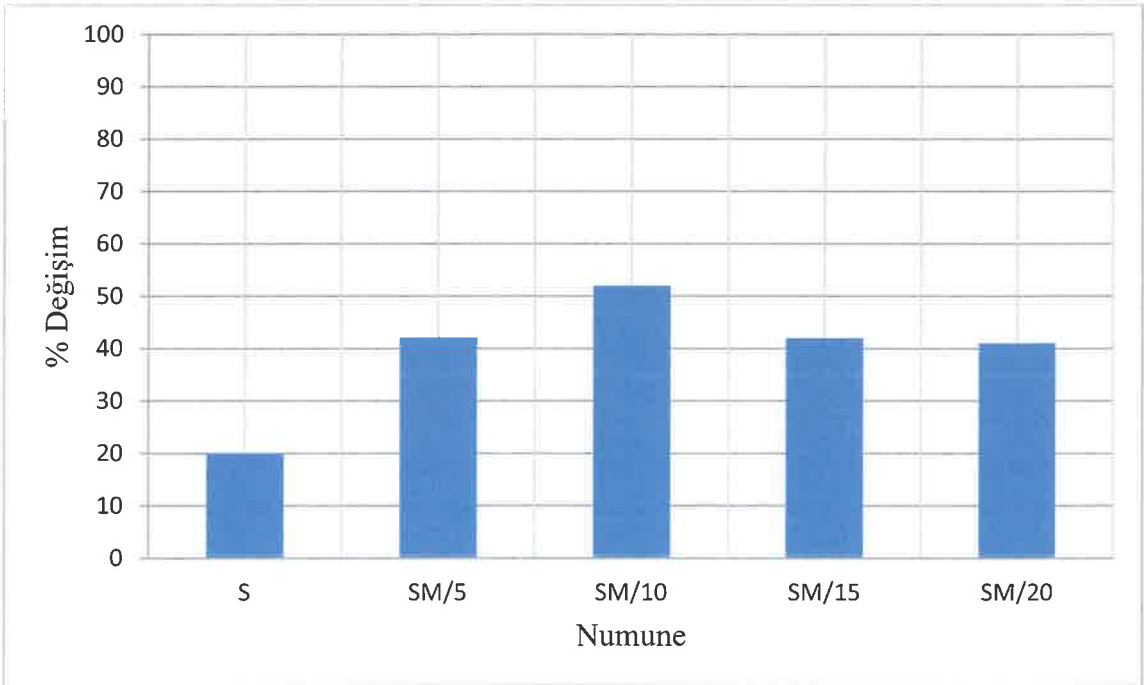
Şekil 58. SLS karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımları.



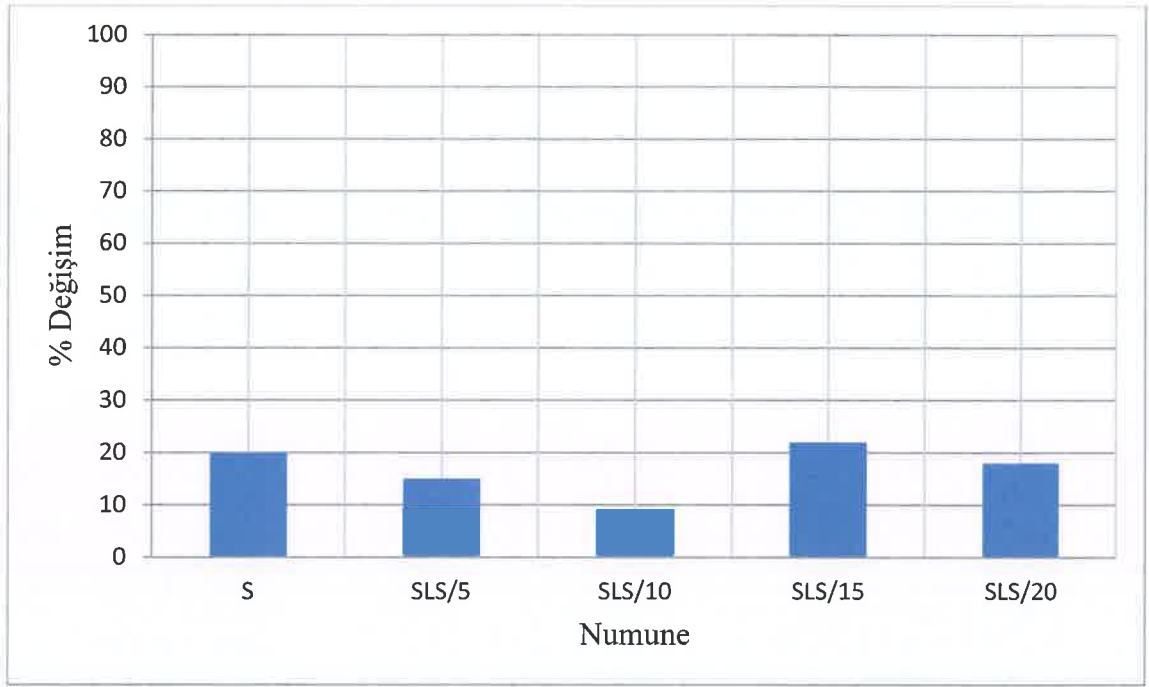
Şekil 59. SLM karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımları.



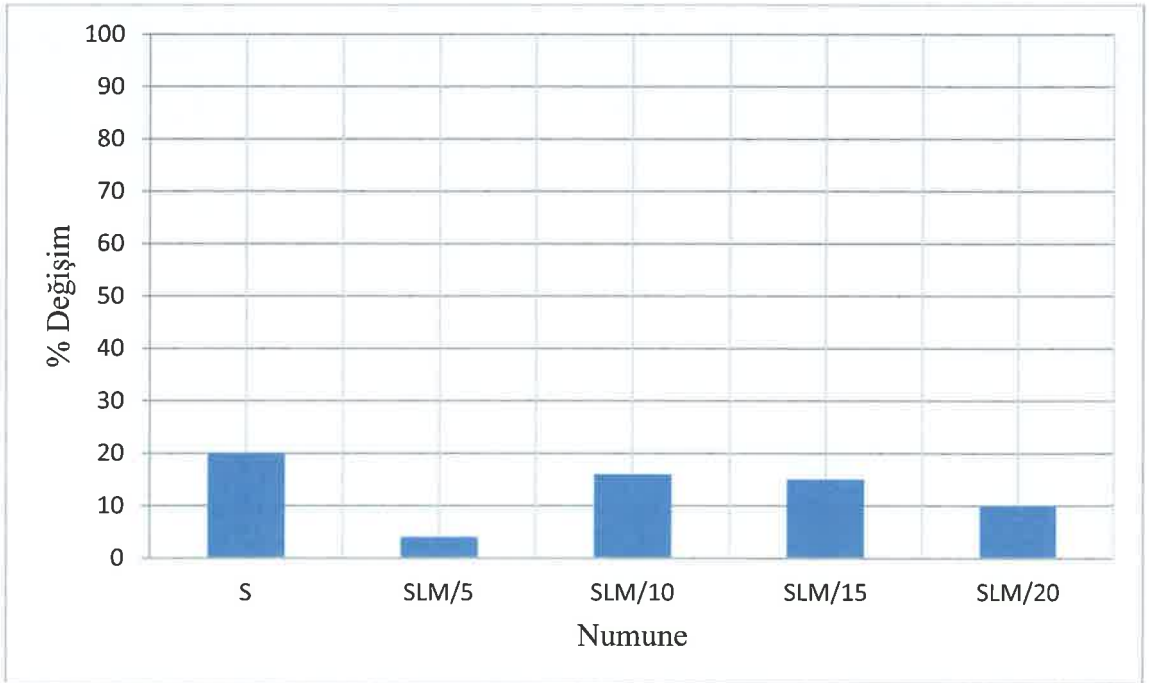
Şekil 60. SS karışımlarının 28 günlük serbest basınç ve donma-çözülme sonrası serbest basınç değişim yüzdesi.



Şekil 61. SM karışımlarının 28 günlük serbest basınç ve donma-çözülme sonrası serbest basınç değişim yüzdesi.



Şekil 62. SLS karışımlarının 28 günlük serbest basınç ve donma-çözülme sonrası serbest basınç değişim yüzdesi.



Şekil 63. SLM karışımlarının 28 günlük serbest basınç ve donma-çözülme sonrası serbest basınç değişim yüzdesi.

BEŞİNCİ BÖLÜM

Sonuç, Tartışma ve Öneriler

Mühendislik özellikleri bakımından zayıf olan zeminlerin stabilizasyonunda kimyasal stabilizasyon yöntemlerinin kullanılması etkili ve ekonomik bir çözümdür. Bu çalışma kapsamında yüksek plastisiteli kil (CH) olan doğal zeminin stabilizasyonunda, %6 (optimum oranda) kireç ve %0, %5, %10, %15, %20 oranlarında silis dumanı ve mermer tozu kullanılarak hazırlanan karışımlarla doğal malzemenin geoteknik özellikleri araştırılmıştır.

Yüksek lisans tez çalışması kapsamında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Kireç ilavesiz numunelerde elde edilen kıvam deneyi sonuçlarına göre silis dumanı ve mermer tozu içeren karışımların LL ve PI değerlerinde düşüşler meydana gelirken PL değerlerinde artışlar olduğu tespit edilmiştir.
- Doğal zemine optimum oranda kireç ilavesiyle elde edilen numunede doğal zemine göre LL ve PI değerlerinde düşüşler olurken, PL değerlerinde artışlar gözlemlenmiştir.
- SLS ve SLM karışımlarının LL ve PI değerlerinde doğal zemine göre düşüşler olurken, PL değerlerinde artışlar olduğu belirlenmiştir. En düşük LL ve PI değerlerine sırasıyla SLS/20 ve SLS/15 numunelerinde rastlanırken, en yüksek PL değeri ise SLS/15 elde edilmiştir.
- Kompaksiyon parametreleri incelendiğinde doğal zemine kireç ilavesi maksimum kuru yoğunluğu azaltırken, optimum su içeriğini artırmıştır.
- Yapılan karışımlardan en düşük maksimum kuru yoğunluk SLS/20 numunesinden, en yüksek optimum su içeriği ise SLS/15 ve SLS/20 numunelerinden elde edilmiştir.
- Serbest basınç dayanım sonuçları incelendiğinde doğal zemine kireç ilavesinin serbest basınç dayanımını yaklaşık 5 kat arttırdığı tespit edilmiştir.
- Doğal zemine sadece silis dumanı ve mermer tozu eklendiğinde, yapılan karışımların 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanım sonuçları doğal zemine göre artmıştır. SM karışımlarının dayanımları SS karışımlarına göre daha düşük çıkmıştır.
- SS karışımlarında %15 oranına kadar dayanım değerlerinde artışlar tespit edilmiştir. SM karışımlarında ise %10 oranına kadar artışlar, bundan sonraki yüzdelerde ise düşüşler meydana gelmiştir.
- Yapılan karışımlarda en yüksek serbest basınç dayanım sonucu SLS numunelerinden elde edilmiştir. SLS karışımlarında %15 oranına kadar dayanım değerlerinde

artışlar olurken diğer oranlarda düşüşler meydana gelmiştir. SLM karışımlarında ise %10 oranına kadar artışlar olurken daha yüksek oranlarda dayanım değerlerinin düşüğe geçtiği gözlemlenmiştir.

➤ 7 ve 28 günlük kürlerden sonraki dayanım değerleri karşılaştırıldığında, kür süresinin artmasının en çok SLS numunelerinde etkin olduğu tespit edilmiştir.

➤ Donma-çözülme çevrimi sonrasındaki dayanım değerleri incelendiğinde en yüksek dayanım sonucuna SLS/15 numunesinde rastlanmıştır.

➤ Donma-çözülme sonrasındaki dayanımlarının 28 günlük kür sonrasındaki dayanım değerlerinden daha düşük çıktığı belirlenmiştir.

➤ Islanma-kuruma periyodu incelendiğinde sadece silis dumanı içeren numuneler hacimsel bütünlüğünü 2. günün sonunda tamamen kaybetmişlerdir. Silis dumanı içeren karışımlardan 12 çevrimi yalnızca SLS/15 numunesi tamamlamıştır.

➤ Mermer tozu içeren tüm numuneler ıslanma-kuruma çevrimine karşı yapısal bütünlüklerini korumuştur.

➤ Yapılan araştırma neticesinde silis dumanı ve kireçli karışımların, mermer tozu ve kireçli karışımlara oranla dayanım yönünden daha yüksek sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Mermer tozu içeren numunelerin durabilite özelliklerinin daha etkin olduğu belirlenmiştir. Yüksek plastisiteli kil stabilizasyonunda mermer tozu ve silis dumanının kireçle beraber kullanılabilir puzolanik katkılar olduğu ve bu katkılarla hazırlanan karışımların doğal zeminin dayanım ve durabilite değerlerini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.

Bu konuda yapılabilecek yüksek lisans ve doktora çalışmalarına yol göstermesi amacıyla verilebilecek öneriler aşağıda yer almaktadır:

➤ Tez çalışması kapsamında kullanılan doğal malzeme USCS sistemine göre yüksek plastisiteli sınıfta yer almaktadır. Farklı tip malzemelerin kireçli ve kireçsiz iyileştirme davranışları incelenebilir.

➤ Farklı endüstriyel atıkların mühendislik özellikleri zayıf olan zeminlerin stabilizasyonunda etkisi incelenebilir.

➤ Yapılan stabilizasyon çalışmaları arazi koşullarında incelenebilir.

KAYNAKLAR

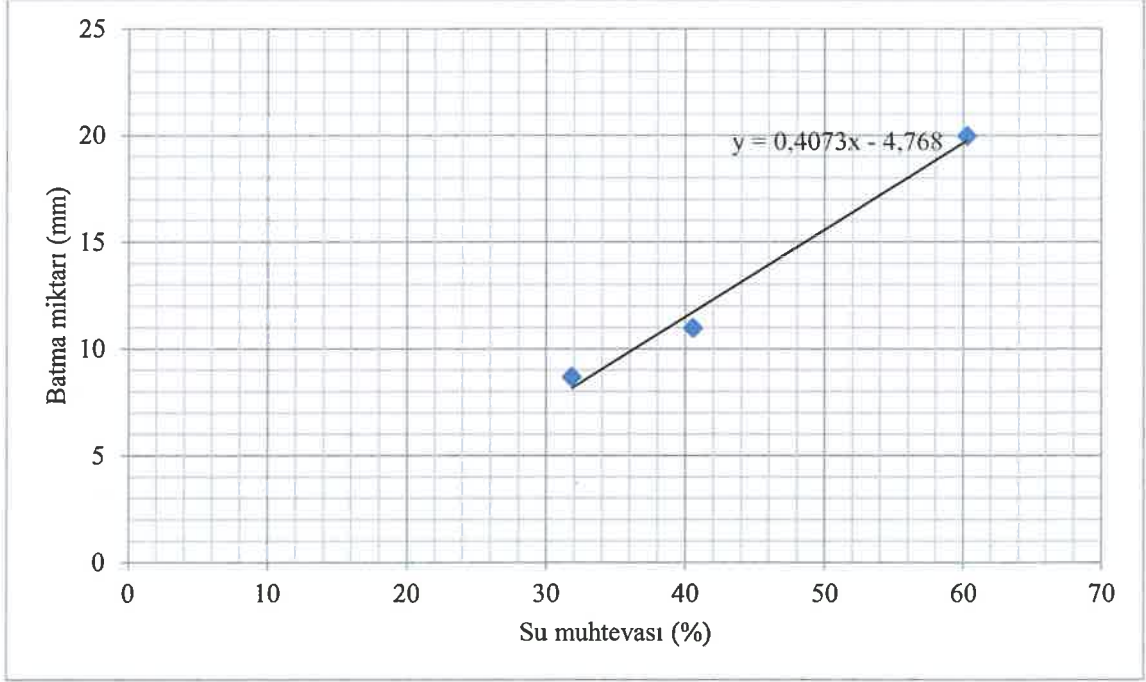
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (AASHTO). (1993). *Guide for design of pavement structures*. USA: AASHTO.
- Adailer, K. (1996). *Mitigation of earthquake-induced liquefaction hazards* (PhD Thesis) Rensselaer Polytechnic Institute, New York.
- Alataş, T. (1996). *Afşin-Elbistan Termik santrali uçucu külünün yol stabilizasyonunda çeşitli maddelerle kullanımı üzerine bir araştırma* (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No:50970)
- 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, biomaa and bioenergy. *Elsevier*, 35(3), 1227-1234. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953410004447>
- Arman, A., & Moonfish, G. A. (1972). Lime stabilization of organic soils, research record. *Highway Research Record*, 381, 37-45.
- American Society for Testing and Materials. (ASTM D 2166). (2006). *Standart test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. annual book of ASTM Standards, American Society for testing and materials*. Philadelphia: ASTM.
- American Society for Testing and Materials. (ASTM D 2487). (2011). *Standart practice for classification of soils for engineering purposes. unified soil classification system*. Philadelphia: ASTM.
- American Society for Testing and Materials. (ASTM D 2974). (2007). *Standart test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and organic soils*. Philadelphia: ASTM.
- American Society for Testing and Materials. (ASTM D 422). (2007). *Standart test method for particle-size analysis of soils*. Philadelphia: ASTM.
- American Society for Testing and Materials. (ASTM D 4318). (2010). *Standart test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils*. Philadelphia: ASTM.
- American Society for Testing and Materials. (ASTM D 559). (1996). *Standart test method for wetting and drying compacted soil-cement mixtures*. Philadelphia: ASTM.
- American Society for Testing and Materials. (ASTM D 560). (1996). *Standart test method for freezing and thawind compacted soil-cement mixtures*. Philadelphia: ASTM.
- American Society for Testing and Materials. (ASTM D 6276). (2006). *Standart test method for using pH to estimate the soil-lime proportion requirement for soil stabilization*. Philadelphia: ASTM.
- American Society for Testing and Materials. (ASTM D 698). (2007). *Standart test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort*. Philadelphia: ASTM.
- American Society for Testing and Materials. (ASTM D 854). (2010). *Standart test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer*. Philadelphia: ASTM.
- American Society for Testing and Materials. (ASTM D 934). (2003). *Standart practices for identification of cyrstalline compounds in water-formed deposits*. Philadelphia: ASTM.
- Atanur, A. (1973). *Kireç stabilizasyonu ve yol yapımındaki tahkikatı*, Ankara: Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası.

- Atterberg, A. (1911). The behaviour of clays with water, their limits of plasticity and their degrees of plasticity, *Kunliga Lantbruksakademiens Handlingar Och Tidskrift*, 50(2), 132-158.
- Aytekin, M. (2004). *Deneyisel zemin mekaniği*. Ankara: Teknik Yayınevi.
- Azevedo, C. S. (2001). *Contribuicao das adicoes minerais para a resistencia a corrosao da armadura do concreto. goiania disertation* (MSc thesis). *Goiás Federal University*. Brasilia, Brazil.
- Balta, İ. (1984). *Doğu Karadeniz Bölgesi topraklarının çimento ve kireçle stabilizasyonu* (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No: 378757)
- Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils, *Engineering Geology*, 42(4) 223-237. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0013795296000282>
- Cook, D. J. (1986). *Natural pozzolans, concrete technology and design, vol 3, cement replacement materials* (Doctoral dissertation). Surrey University Press, California.
- Çakılcıoğlu, İ. (2007). *Yüksek Plastisiteli Killerin Stabilizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No: 216270)
- Erdoğan, T. Y. (1997). *Admixtures for concrete*. Ankara: The Middle East Technical University Press.
- Erdoğan, T. Y. (2003). *Beton*. Ankara: The Middle East Technical University Press.
- Federal Highway Administration. (FHWA). (1998). *Ground Improvement Technical Summaries Final Draft*. USA: FHWA
- Hayward, B. (1996). *Ground Modification Seminar Notes*, Odenton.
- Hunt, R. E. (1984). *Geotechnical engineering investigation manual*. USA: McGraw Hill.
- Kayabalı, K. (2010). *Geoteknik mühendisliğine giriş*. Ankara: Gazi Kitabevi.
- Kukko, H. (2000). Stabilization of clay with inorganic by-products, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 12(4), 307-309. [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2000\)12:4\(307\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:4(307))
- Lambe, P. C., Khosla, N. P., & 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.
- Malhatra, V. M. (1997). *Mineral admixtures. concrete construction engineering handbook* (Nawy Edward G.CRC Press. 27-36). New York.
- Mathew, P. K., & Rao, S. N. (1997). Effect of lime on cation exchange capacity of marine clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(2), 183-185. [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1997\)123:2\(183\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:2(183))
- Mitchell, J. K., & Gallagher, P. M. (1993). *Fundamentals of soil behavior behaviour 2 nd edition*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Mitchell, J. K., & Gallagher, P. M. (1998). *Guidelines for ground improvement of civil works and military structures and facilities*. Washington: US. Army of Corps. of Engineers.
- Nelson, J. D., & Debra, J. M. (1992). *Expansive soils-problems and practice in foundation and pavement engineering*. London: John Wiley & Sons Inc.

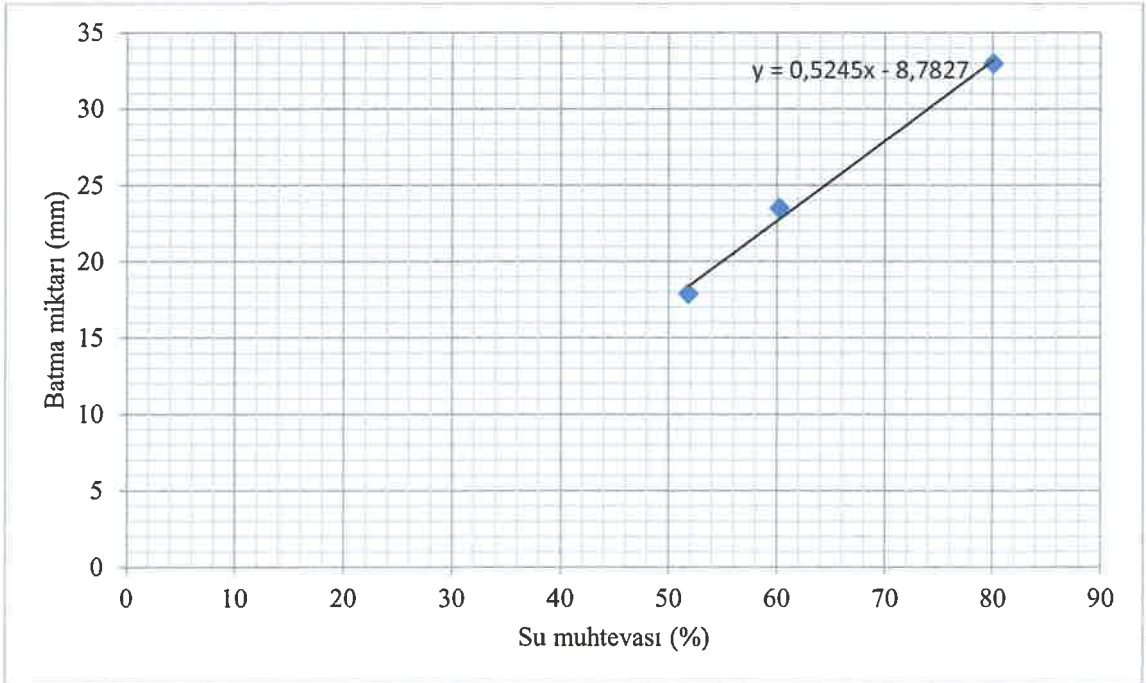
- Okucu, A. (1998). *Bigadiç ve turnatepe (balıkesir) yörelerindeki zeolitik ve perlitik tüflerin puzolanik özellikleri* (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No: 68999)
- Ola, S. A. (1978). The geology and geotechnical properties of the black cotton soils of northeastern nigeria. *Engineering Geology*, 12, 375-391. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0013795278900194>
- Tokuyay, M., & Erdoğan, K. (1988). Türkiye termik santrallerinden elde edilen uçucu küllerin karakterizasyonu, *TÇMB*, Ankara.
- Tunç, A. (2001). *Yol malzemeleri ve uygulamaları*. İstanbul: Atlas Yayın Dağıtım.
- Tunç, A. (2002). *Yol mühendisliğinde geoteknik ve uygulamaları*. İstanbul: Atlas Yayın Dağıtım.
- 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: Derya Kitabevi.
- Uzuner, B. A. (2013). *Temel mühendisliğine giriş*. Trabzon: Derya Kitabevi
- Ün, H. (2007). *İnşaat mühendisliği bölümü yapı malzemeleri ders notları*. Denizli: Pamukkale Üniversitesi.
- Winterkon, H. F., & Fang, H. Y. (1975). *Foundation engineering handbook*. London: Van Nostrand Reinhold Publication.
- Yılmaz, F. (2015). *Tüfit taşların zemin stabilizasyonunda kireçle birlikte kullanılabilirliğin standart deneyler ve bilgisayarlı tomografi tekniği ile araştırılması* (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No: 397321)
- Yorulmaz, A. (2018) *Mermer toz atıkları ile stabilize edilmiş kil zemin mukavemetinin, donma-çözülme etkisi ve zamana bağlı olarak değişiminin cbr (california taşıma oranı) deneyleri ile değerlendirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No: 527604)
- Zorluer, İ., & Usta, M. (2003, Aralık). *Zeminlerin atık mermer tozu ile iyileştirilmesi*, Türkiye IV. Mermer Sempozyumu, Afyonkarahisar.

EKLER

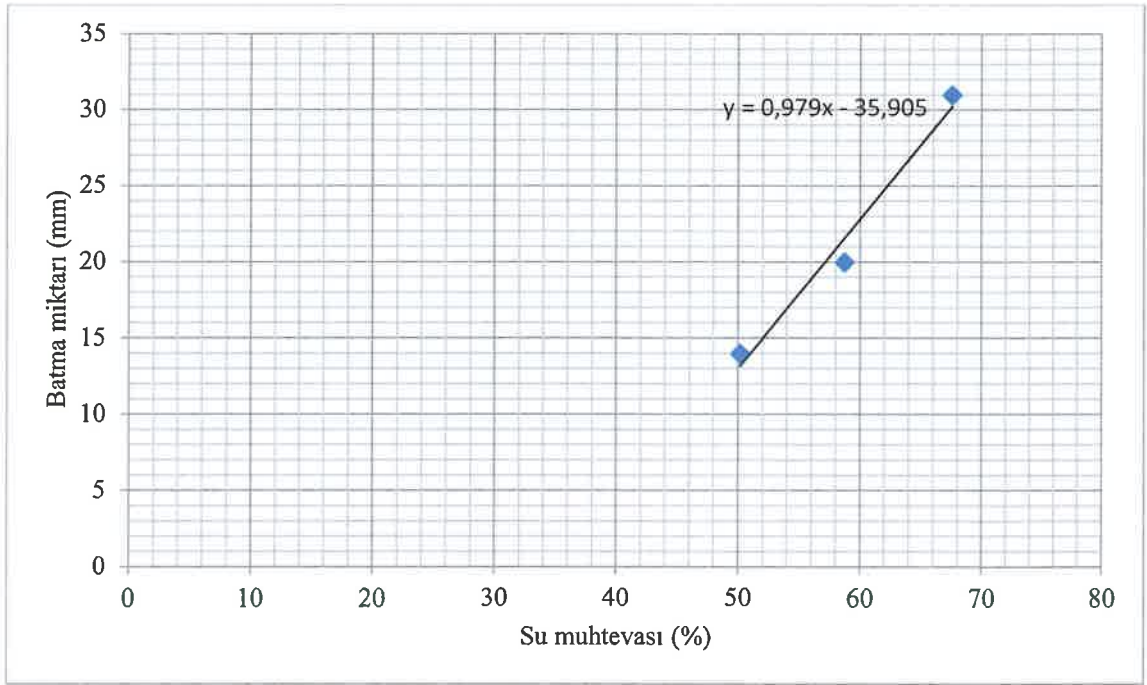
Ek-1. Düşen koni penetrasyon deneyi sonuçları



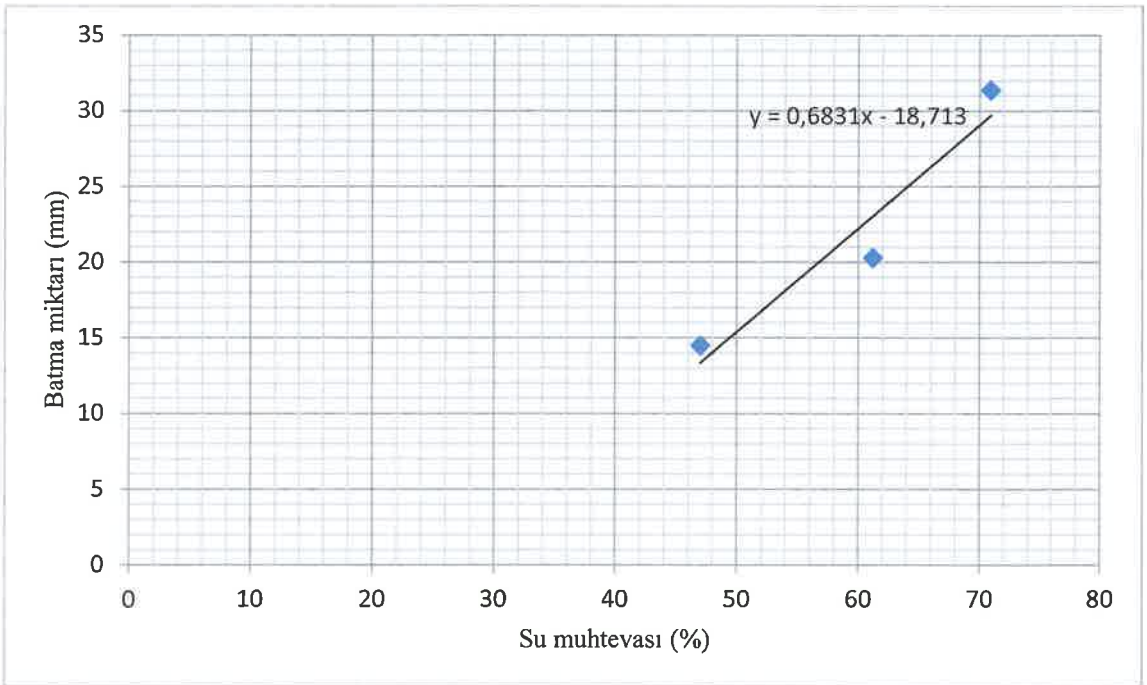
S numunesine ait düşen koni penetrasyon grafiği



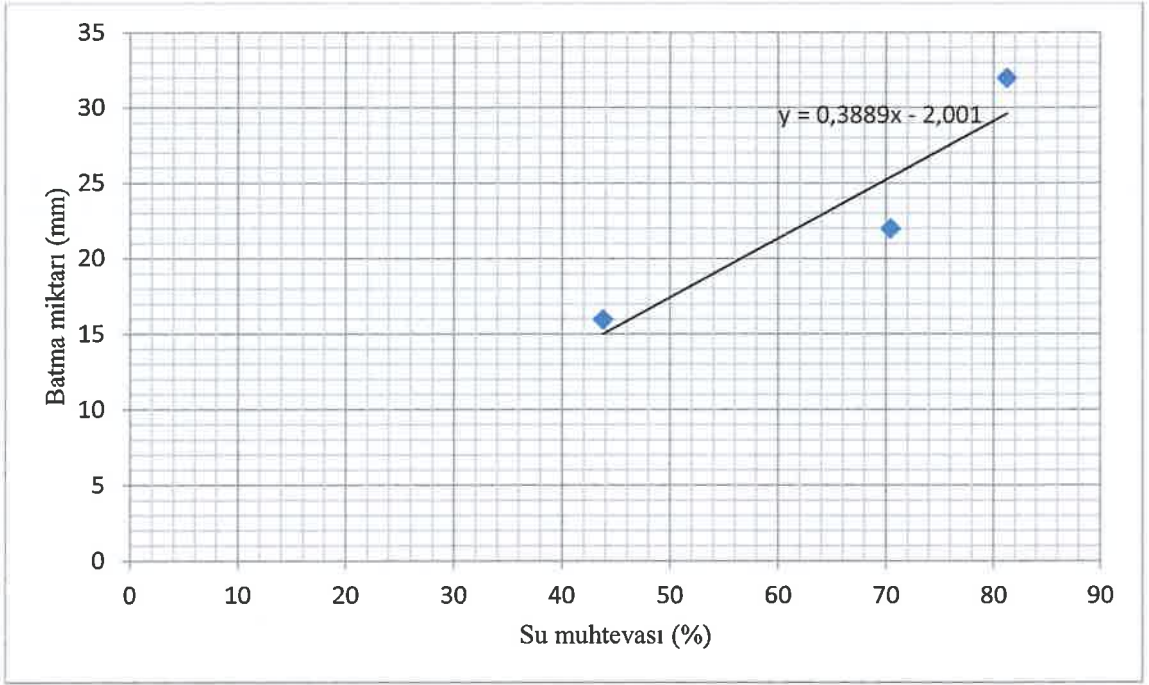
SL numunesine ait düşen koni penetrasyon grafiği



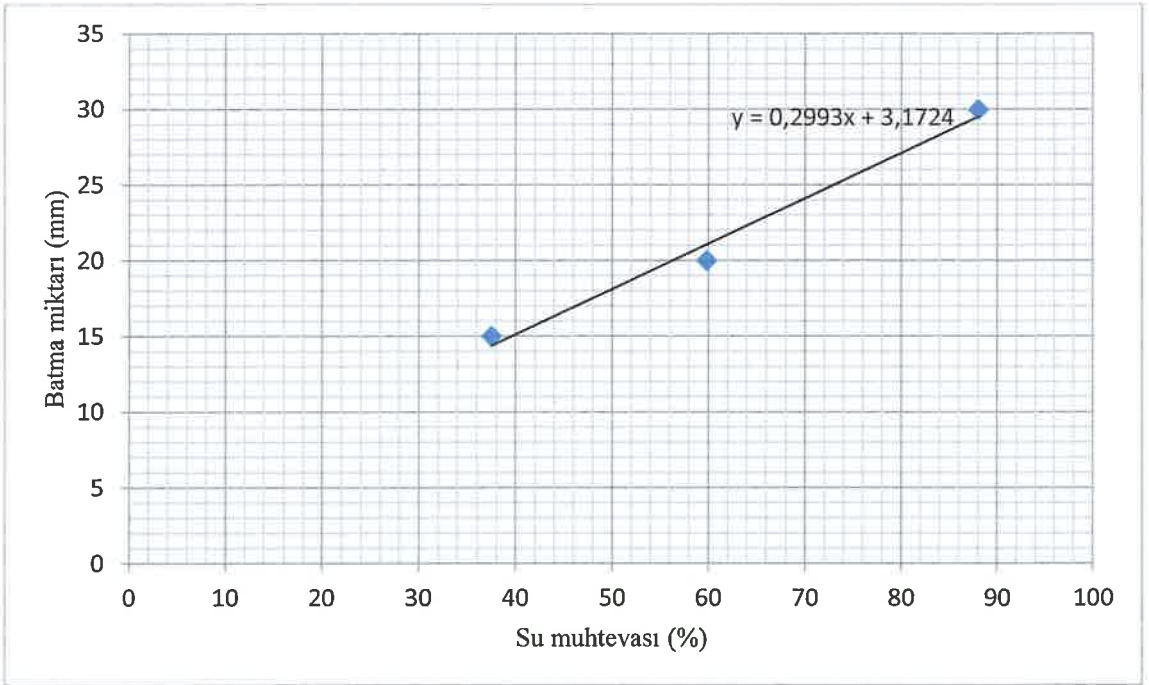
SS/5 numunesine ait düşen koni penetrasyon grafiği



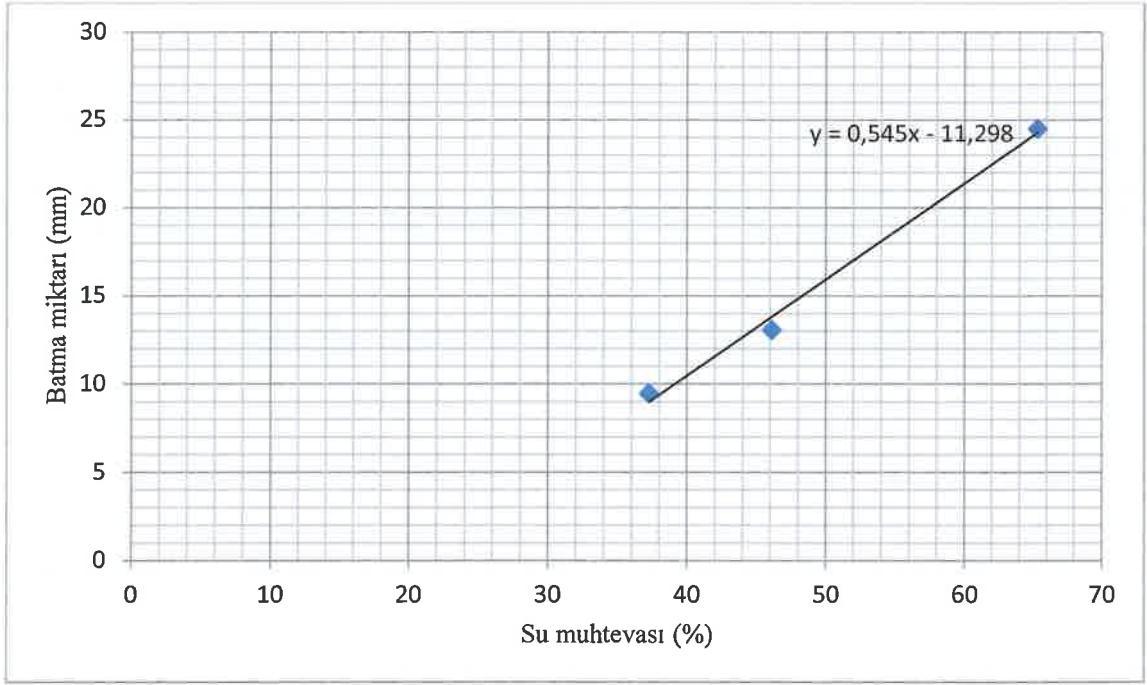
SS/10 numunesine ait düşen koni penetrasyon grafiği



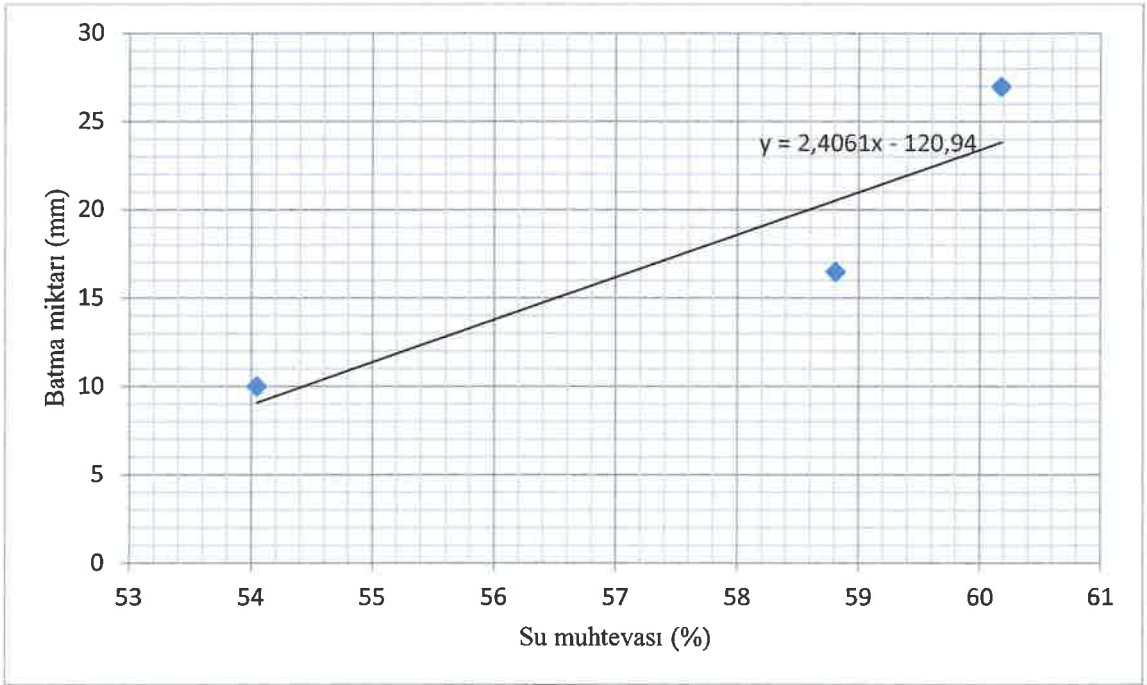
SS/15 numunesine ait düşen koni penetrasyon grafiği



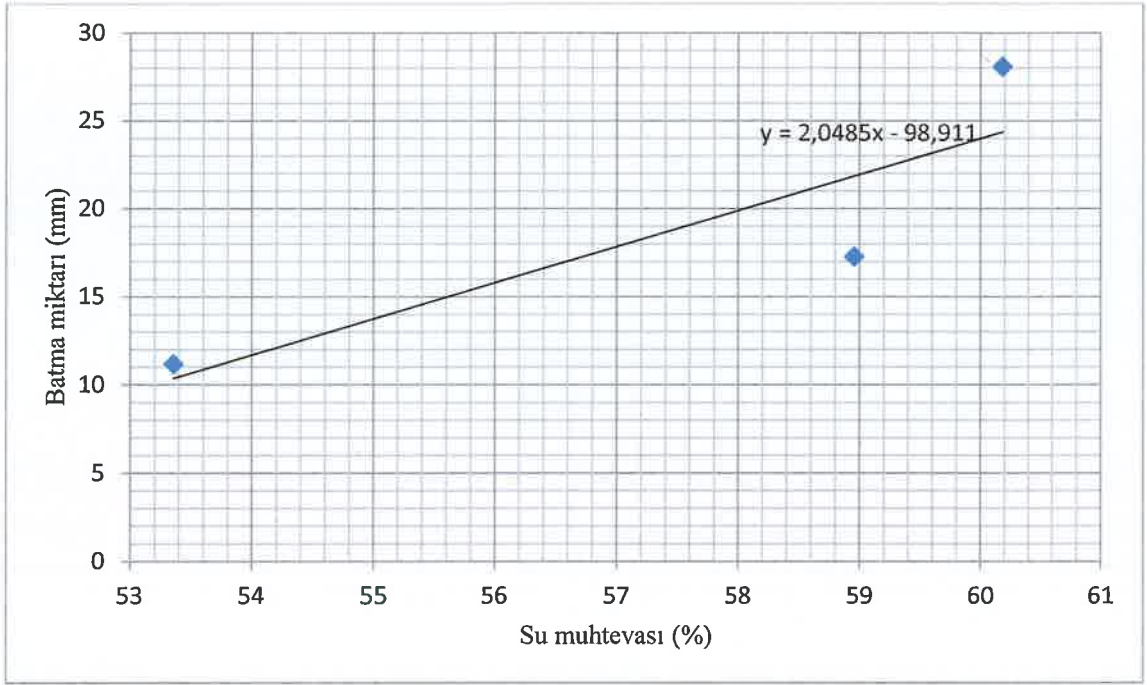
SS/20 numunesine ait düşen koni penetrasyon grafiği



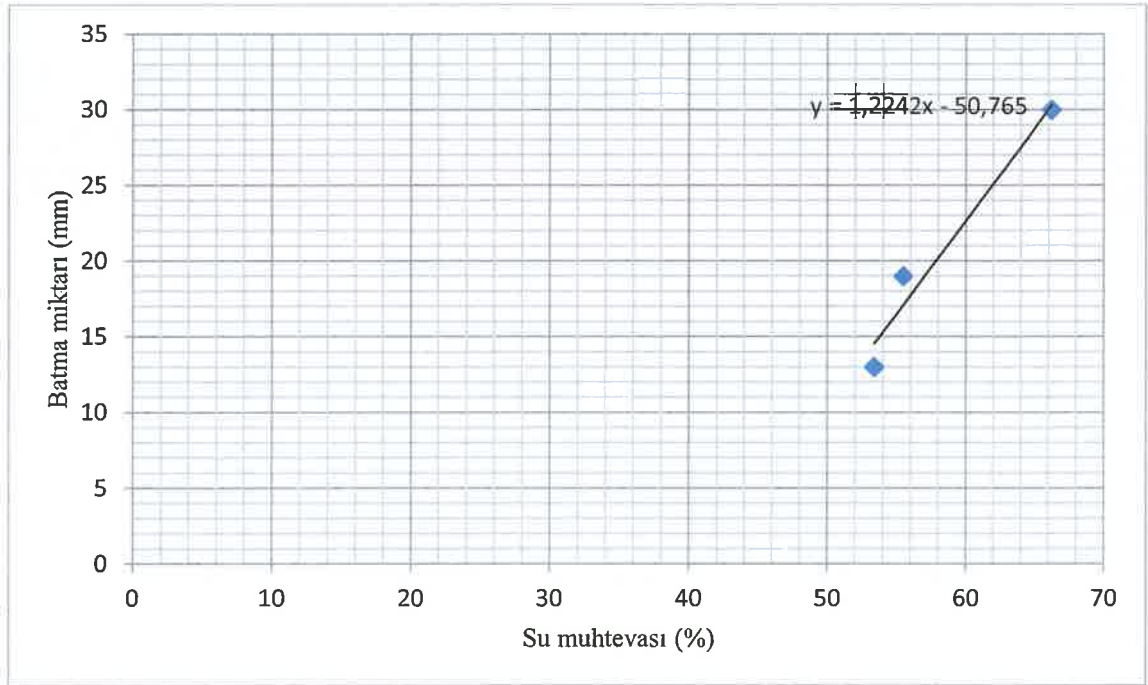
SM/5 numunesine ait düşen koni penetrasyon grafiği



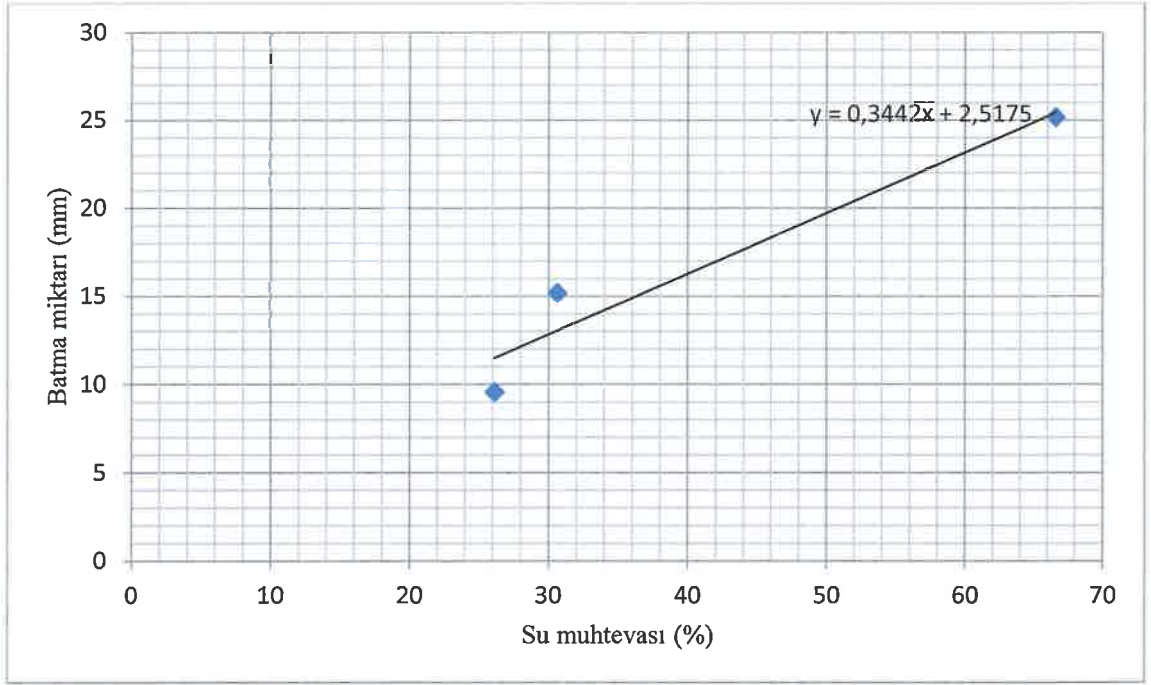
SM/10 numunesine ait düşen koni penetrasyon grafiği



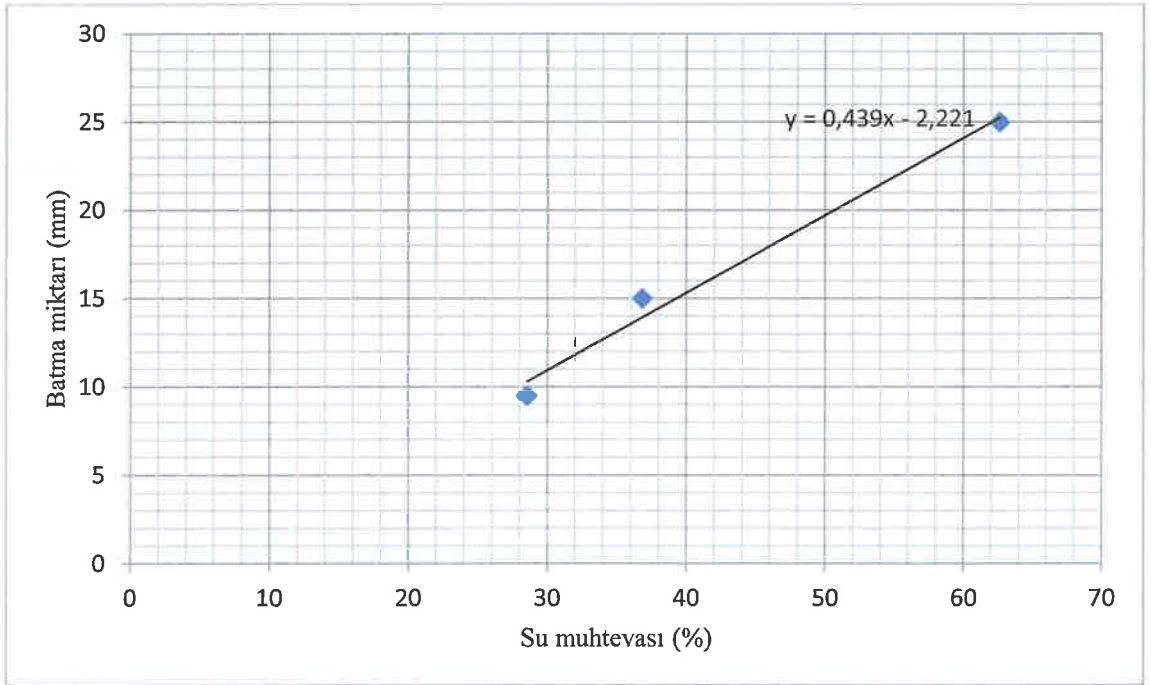
SM/15 numunesine ait düşen koni penetrasyon grafiği



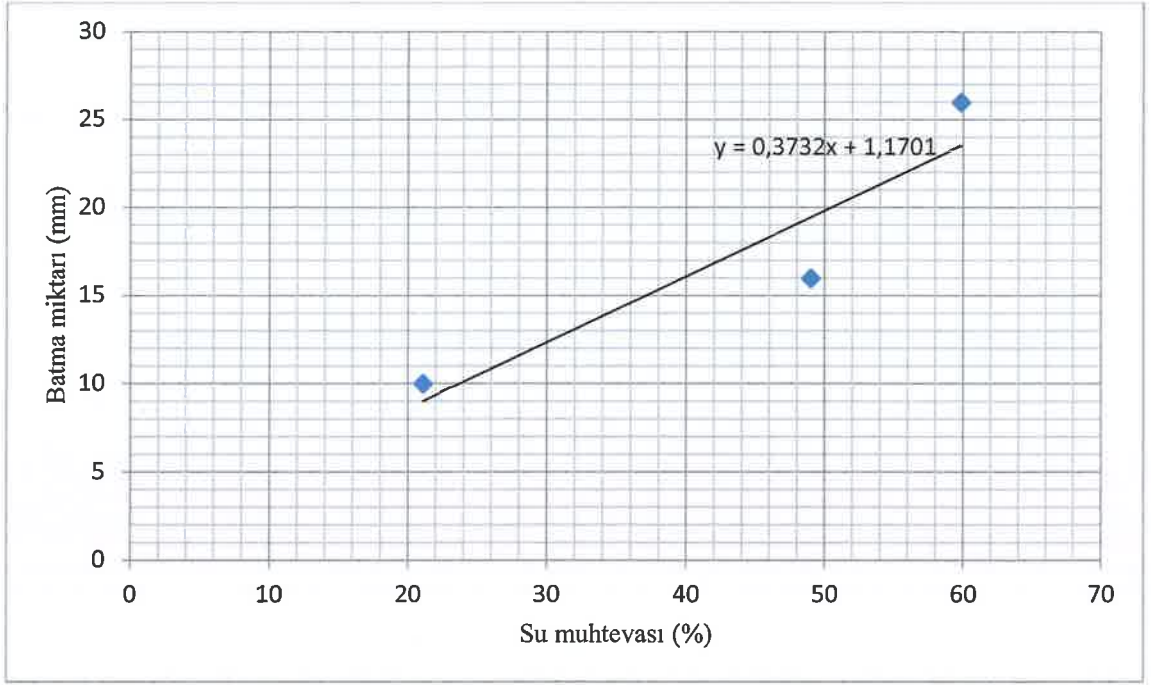
SM/20 numunesine ait düşen koni penetrasyon grafiği



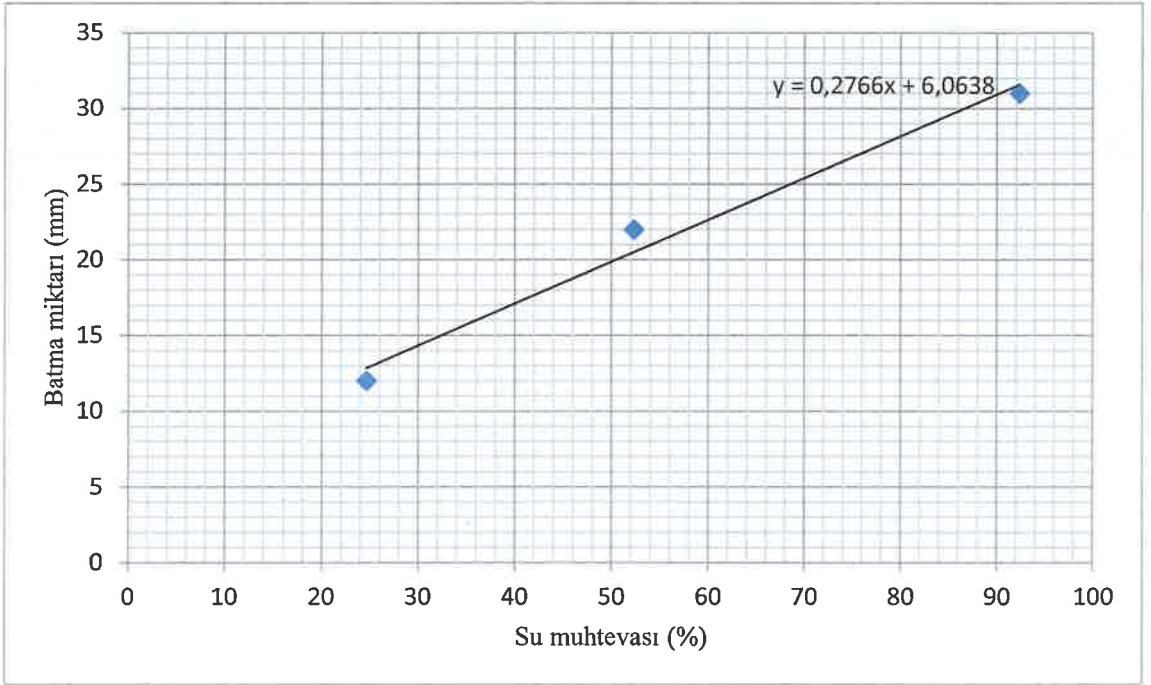
SLS/5 numunesine ait düşen koni penetrasyon grafiği



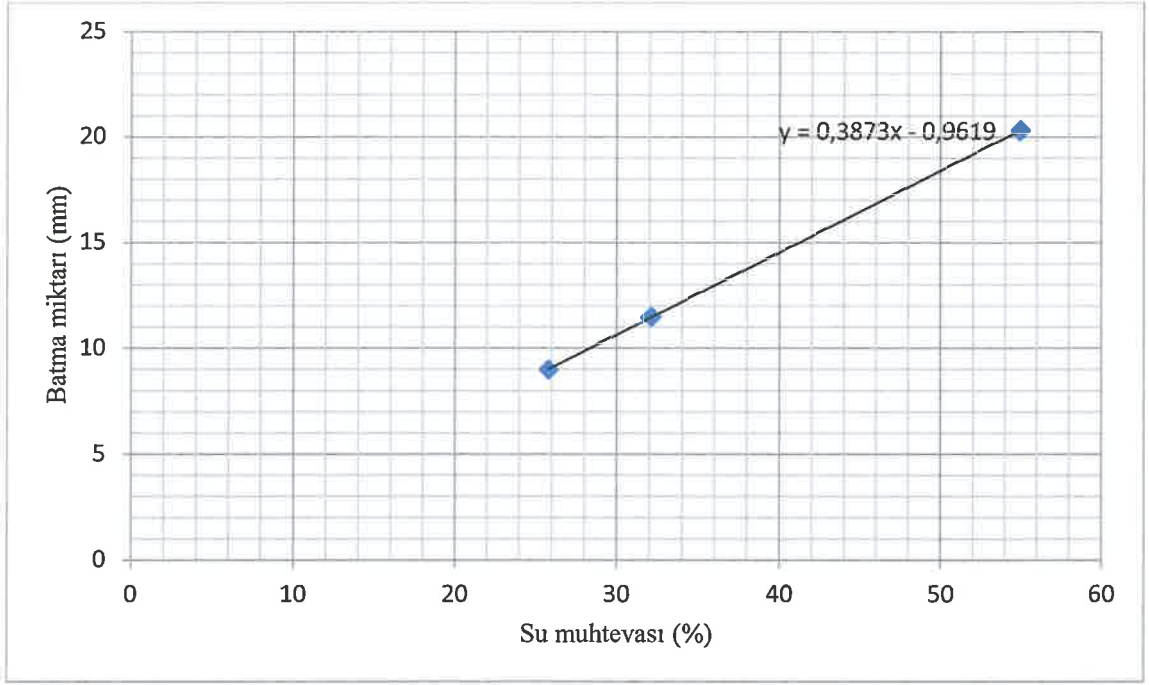
SLS/10 numunesine ait düşen koni penetrasyon grafiği



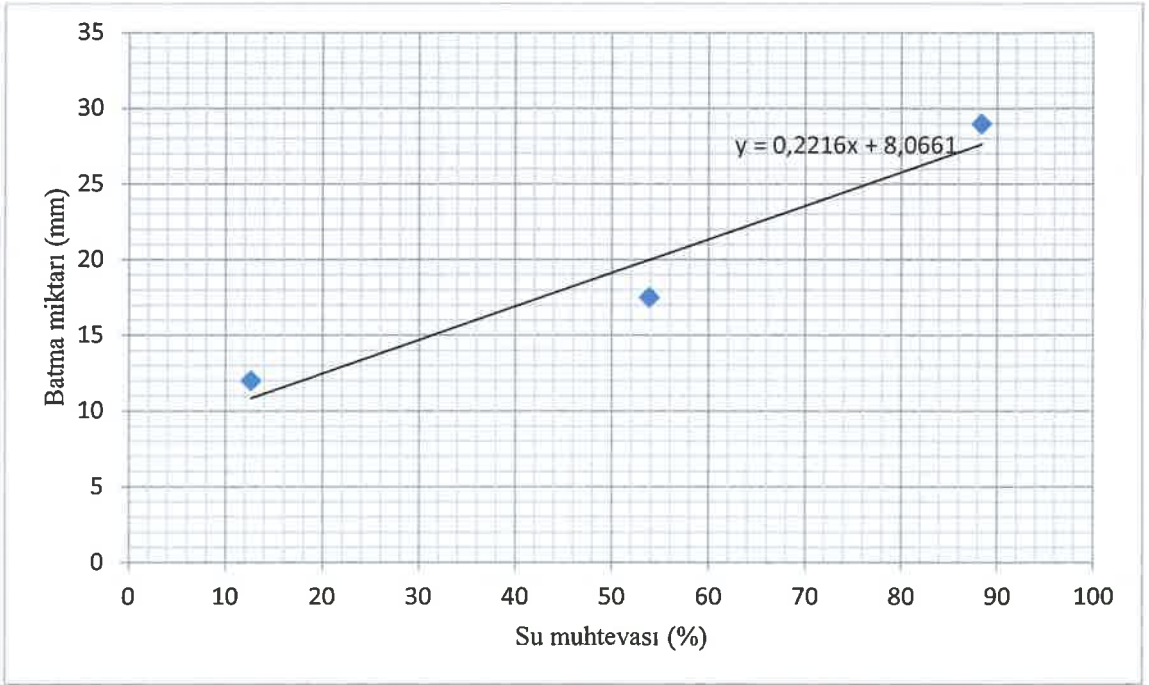
SLS/15 numunesine ait düşen koni penetrasyon grafiği



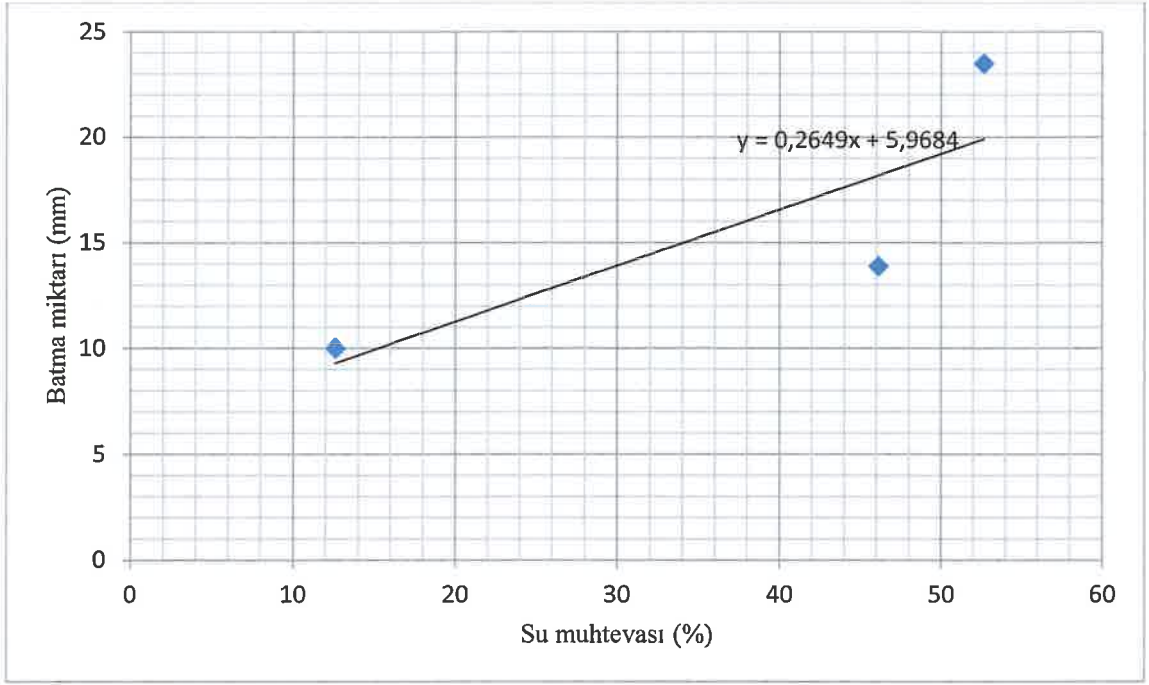
SLS/20 numunesine ait düşen koni penetrasyon grafiği



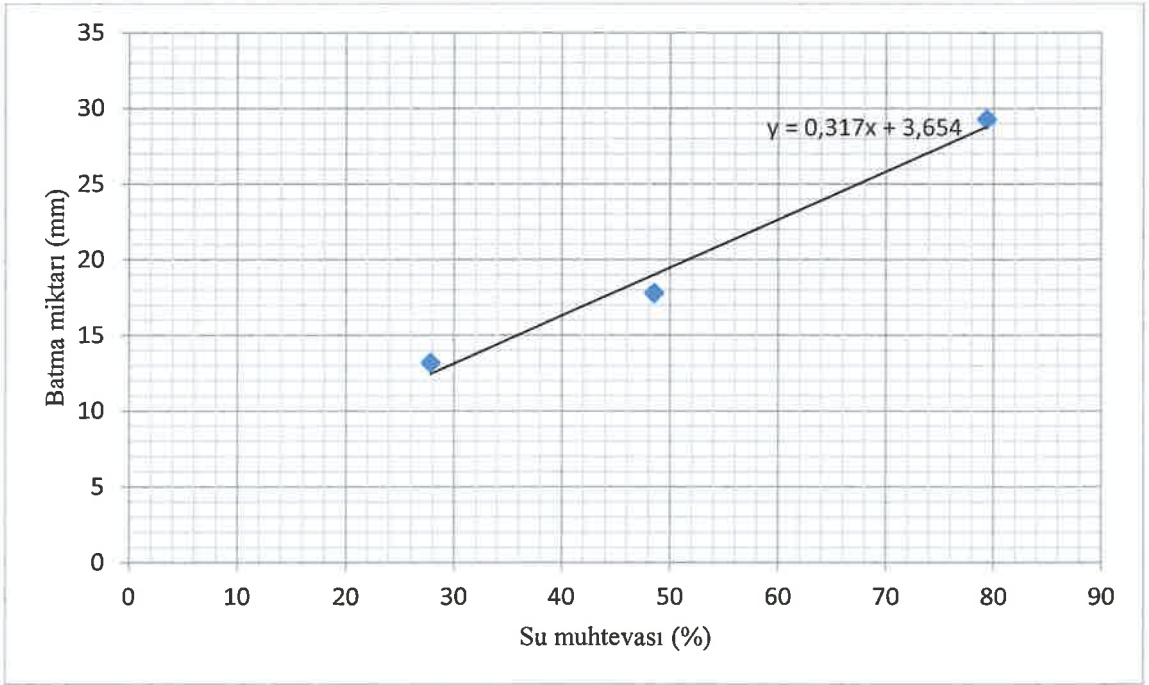
SLM/5 numunesine ait düşen koni penetrasyon grafiği



SLM/10 numunesine ait düşen koni penetrasyon grafiği

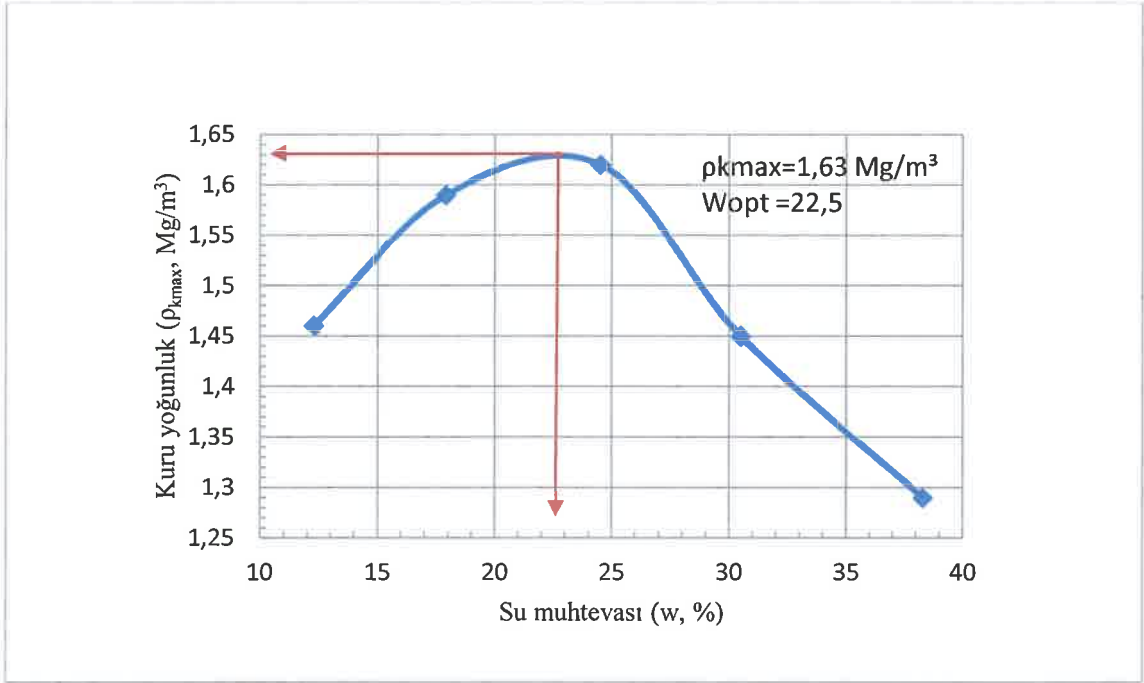


SLM/15 numunesine ait düşen koni penetrasyon grafiği

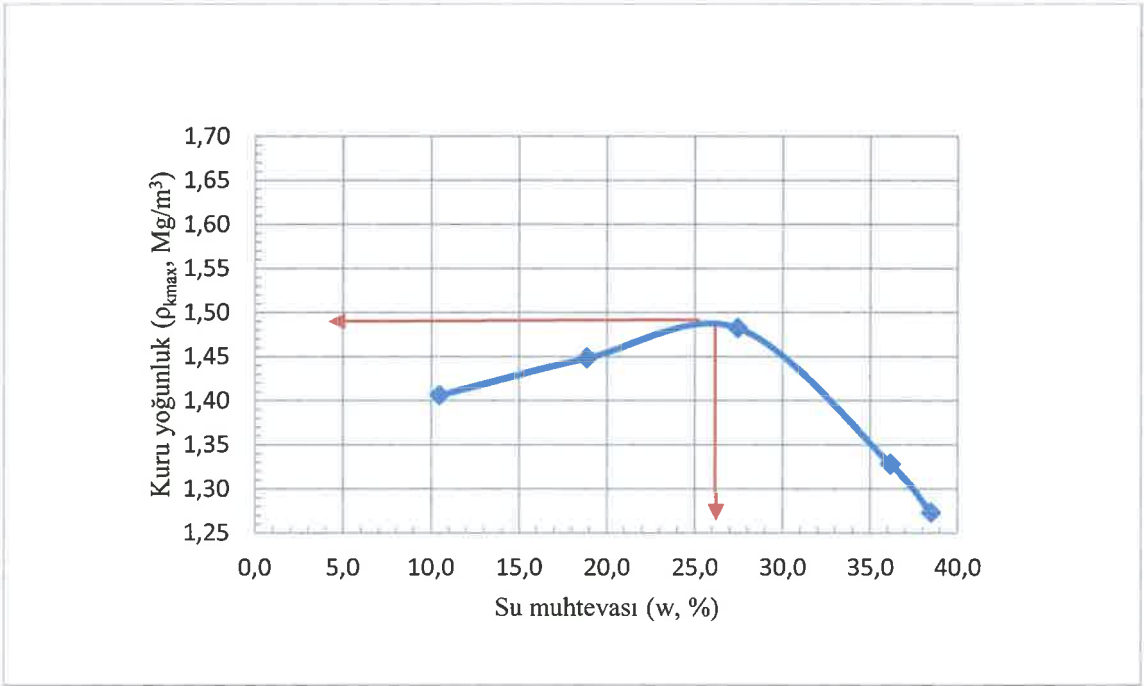


SLM/20 numunesine ait düşen koni penetrasyon grafiği

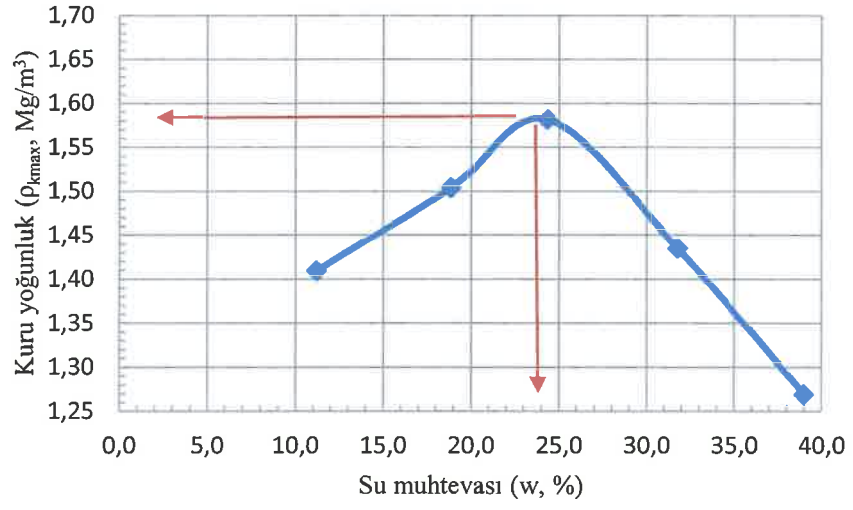
Ek-2. Kompaksiyon deneyi sonuçları



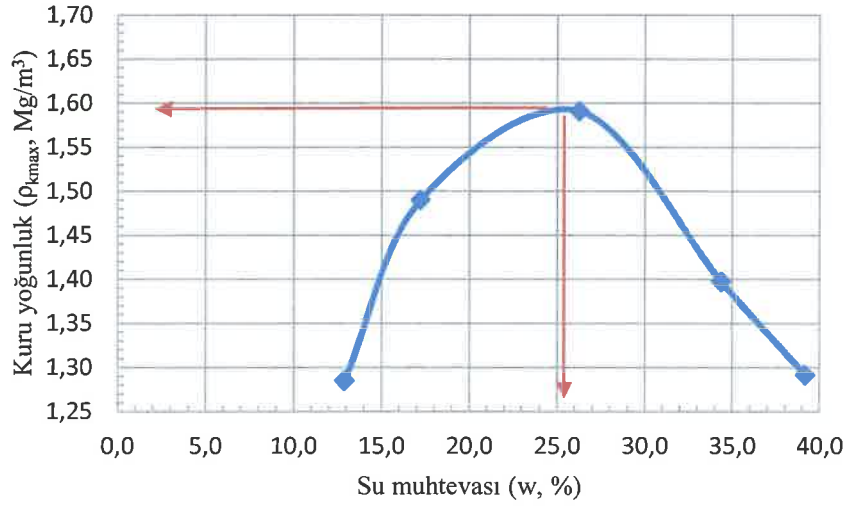
S numunesinin kompaksiyon eğrisi



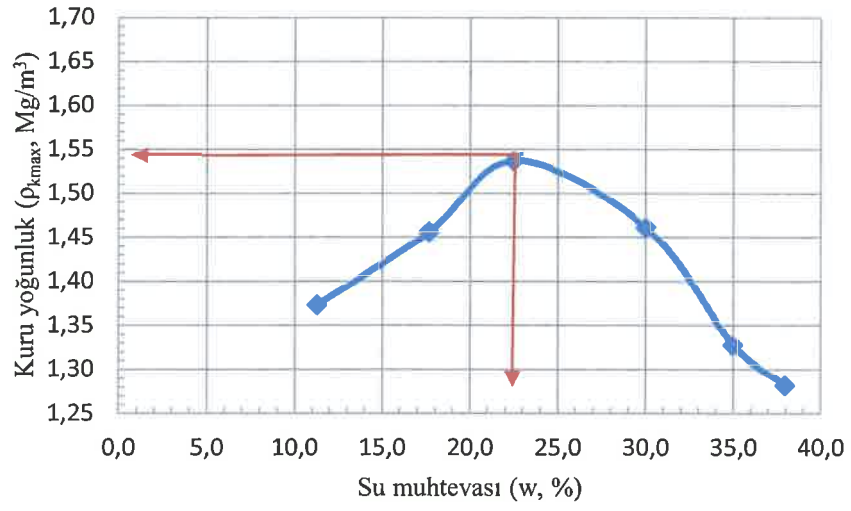
SL numunesinin kompaksiyon eğrisi



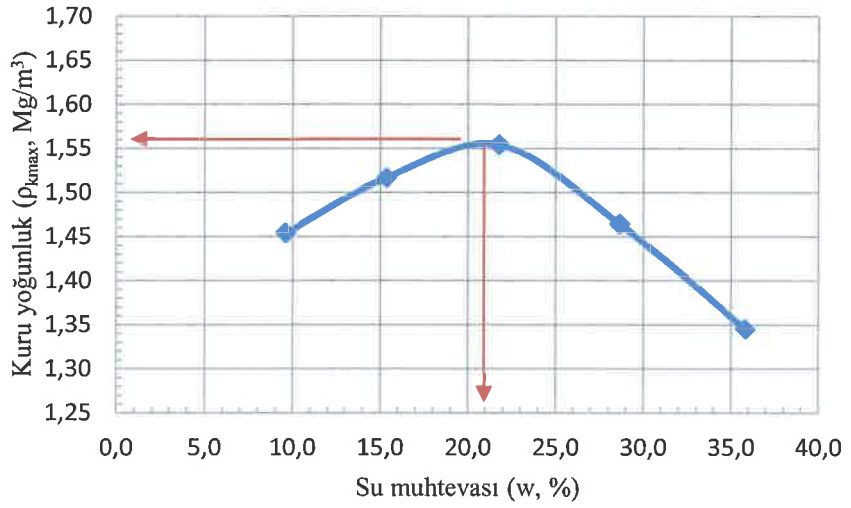
SS/5 numunesinin kompaksiyon eğrisi



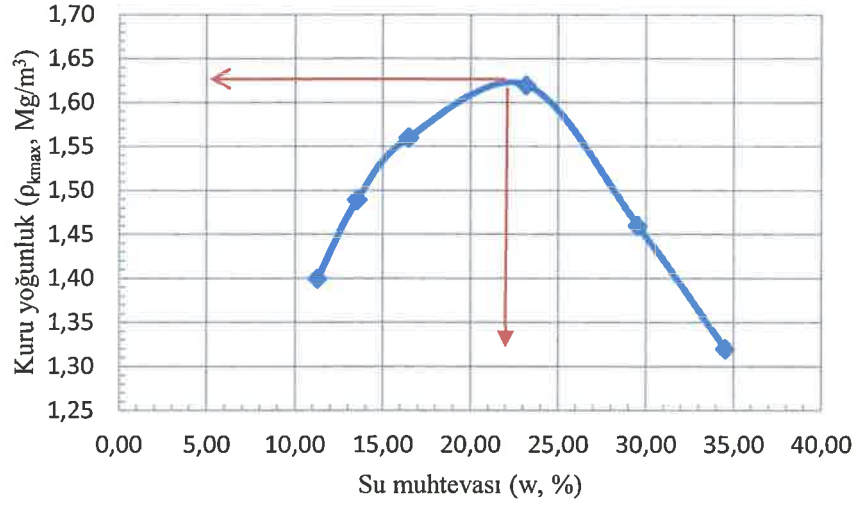
SS/10 numunesinin kompaksiyon eğrisi



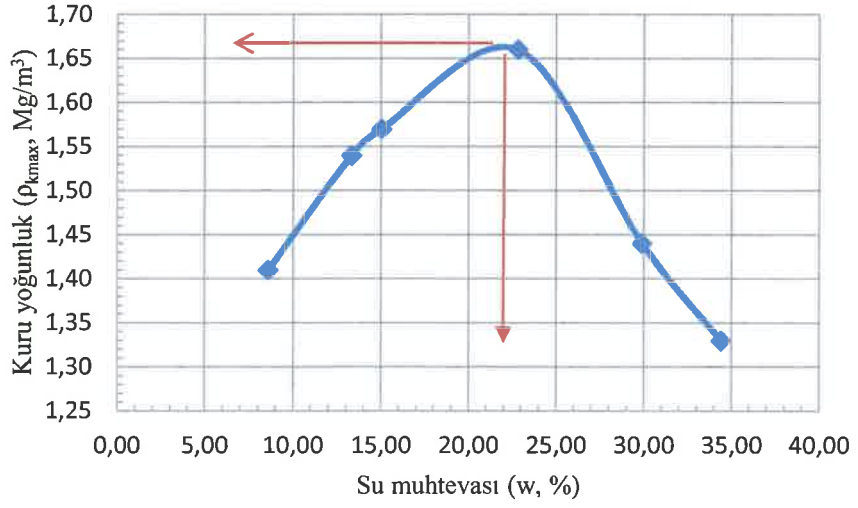
SS/15 numunesinin kompaksiyon eğrisi



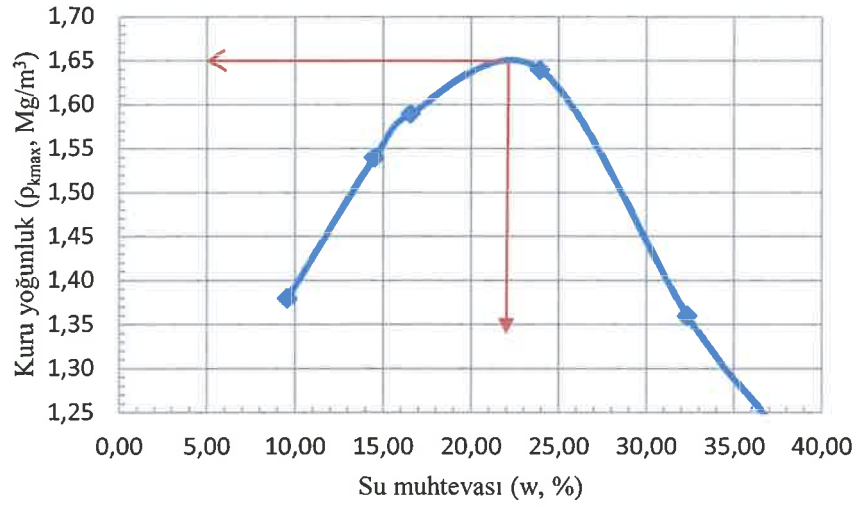
SS/20 numunesinin kompaksiyon eğrisi



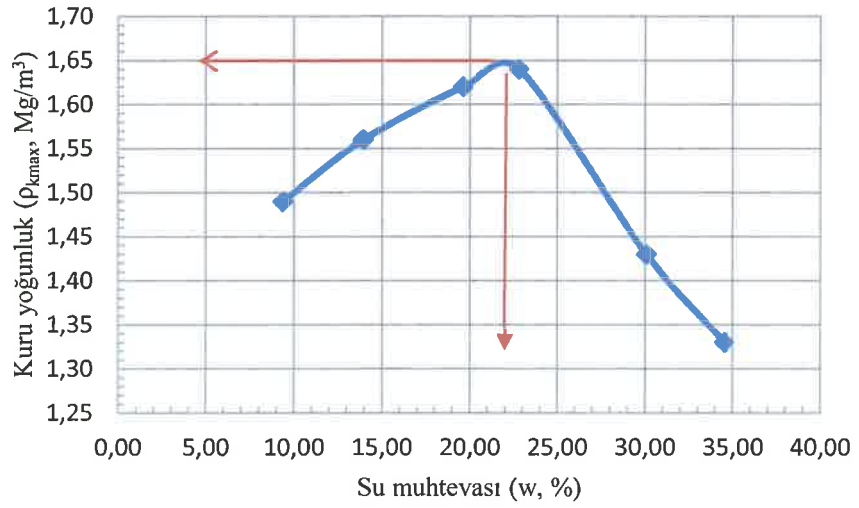
SM/5 numunesinin kompaksiyon eğrisi



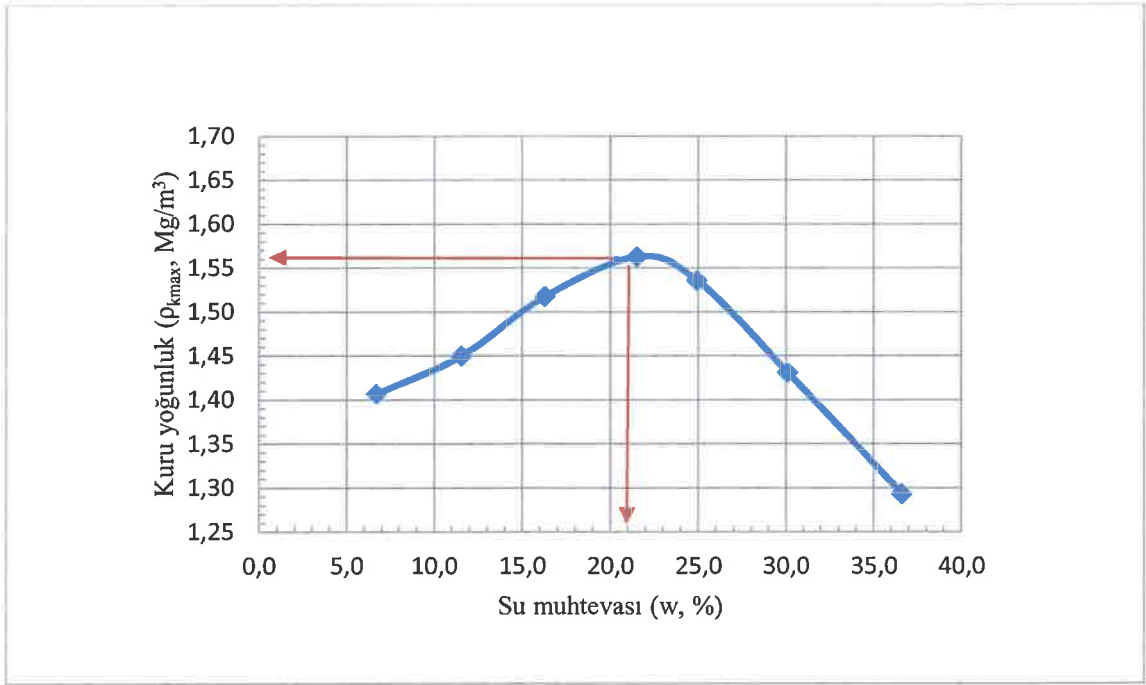
SM/10 numunesinin kompaksiyon eğrisi



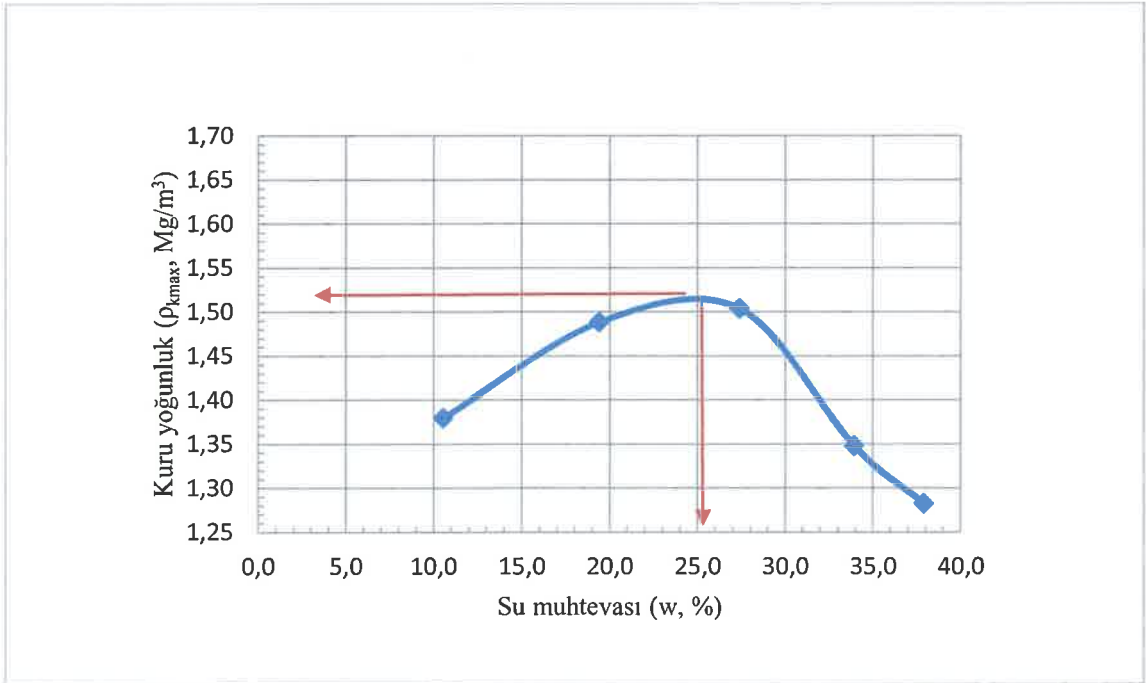
SM/15 numunesinin kompaksiyon eğrisi



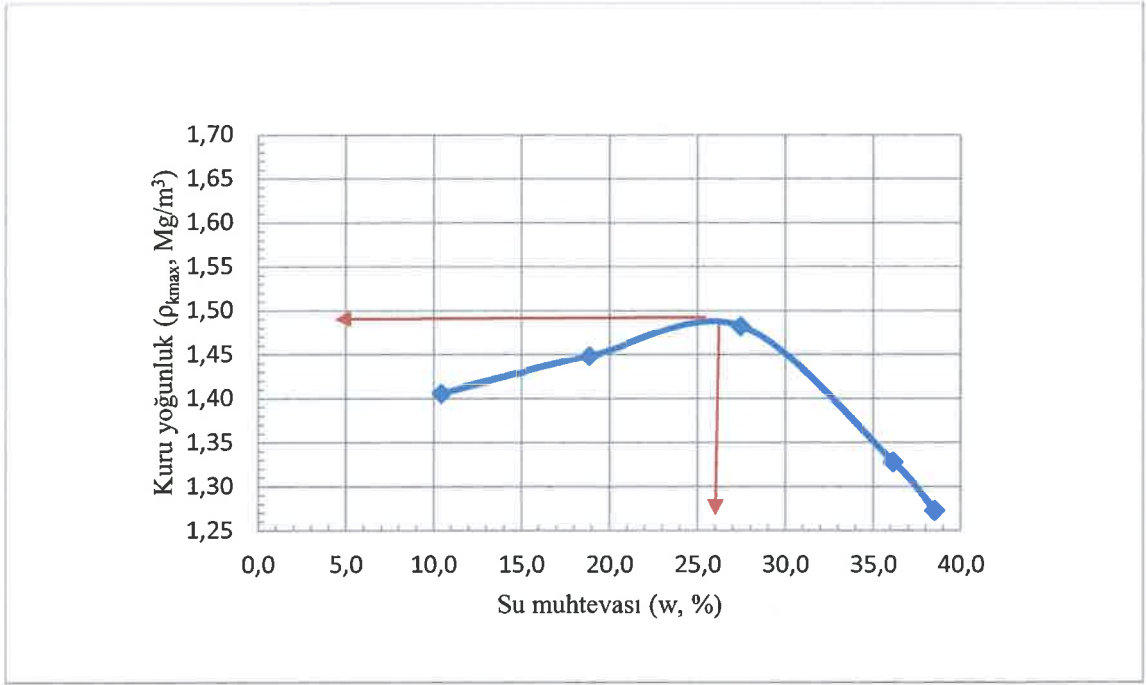
SM/20 numunesinin kompaksiyon eğrisi



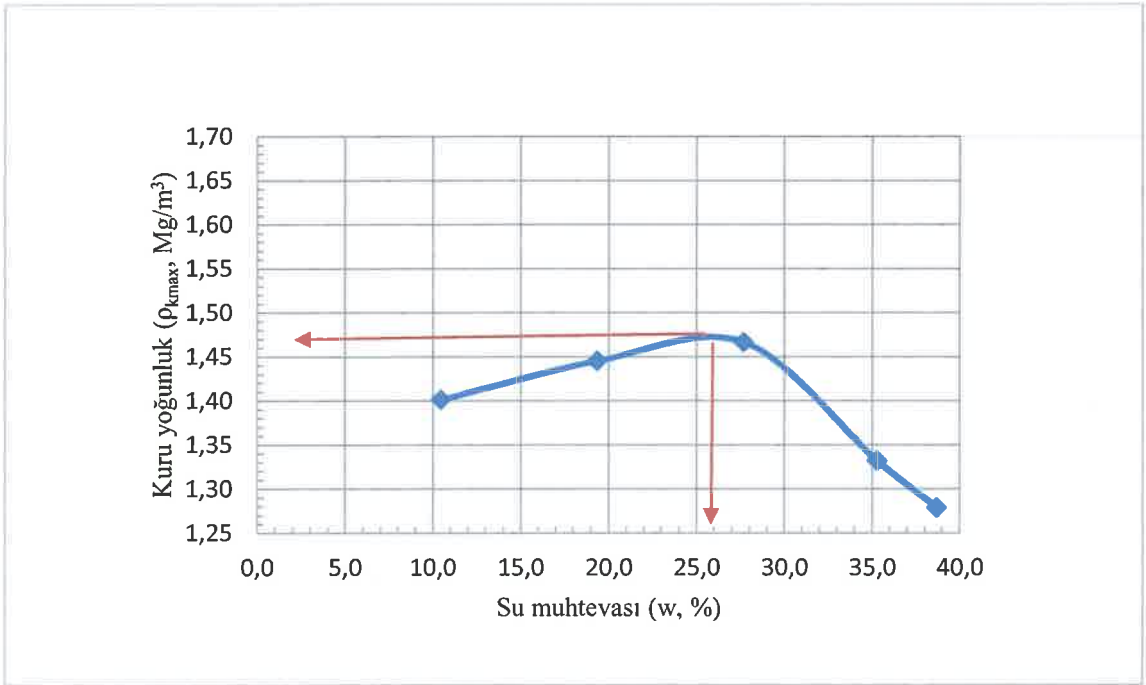
SLS/5 numunesinin kompaksiyon eğrisi



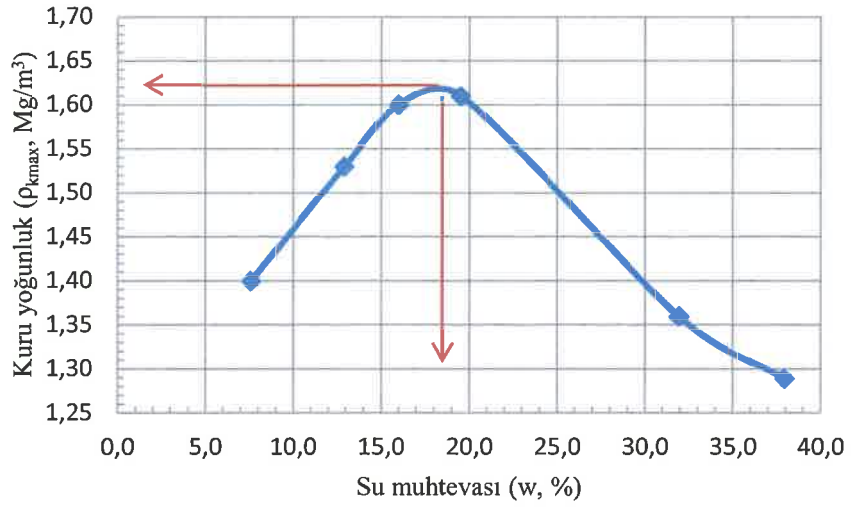
SLS/10 numunesinin kompaksiyon eğrisi



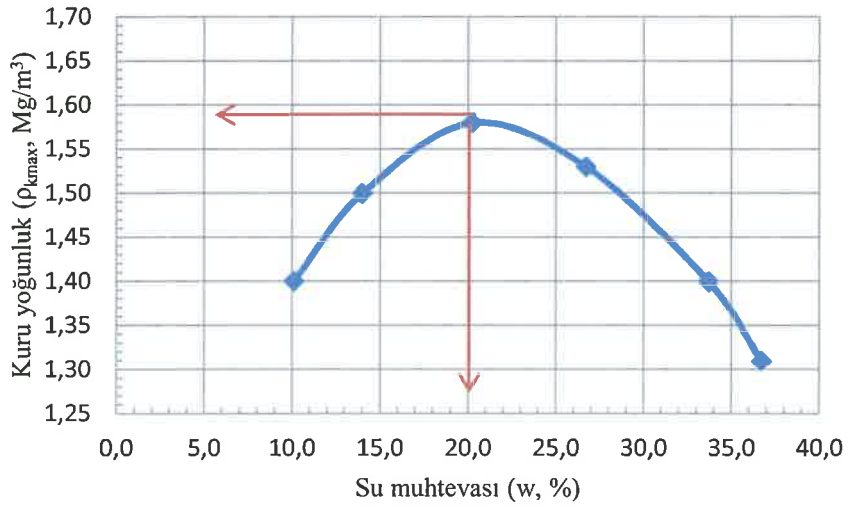
SLS/15 numunesinin kompaksiyon eğrisi



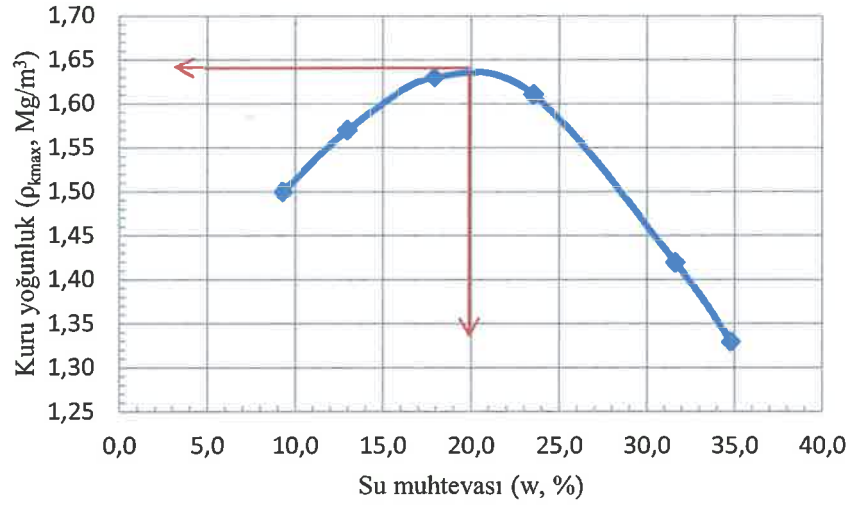
SLS/20 numunesinin kompaksiyon eğrisi



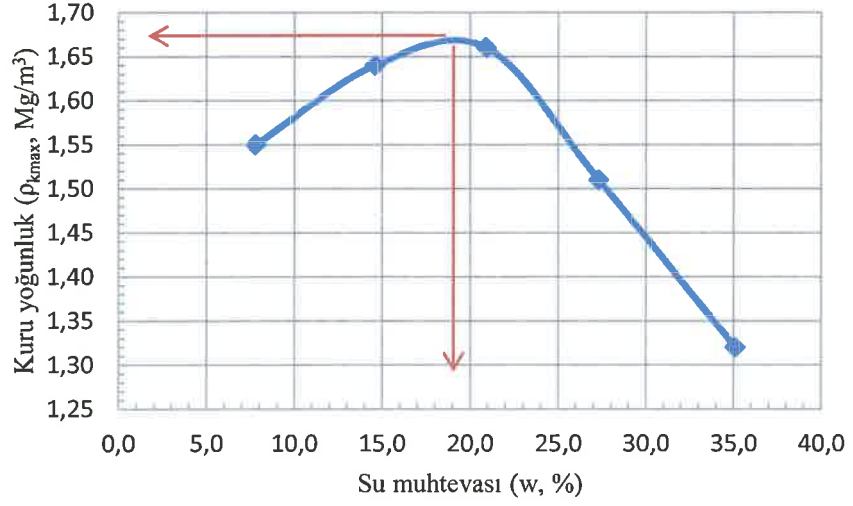
SLM/5 numunesinin kompaksiyon eğrisi



SLM/10 numunesinin kompaksiyon eğrisi



SLM/15 numunesinin kompaksiyon eğrisi



SLM/20 numunesinin kompaksiyon eğrisi

ÖZGEÇMİŞ

Ersin DEMİR

25.01.1988 yılında Erzurum’da doğdu. Lise eğitimini Mehmet Akif Ersoy Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi’nde tamamlayan DEMİR, lisans eğitimini Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde ön lisans eğitimini ise aynı üniversitede Adalet Bölümünü tamamlayarak mezun oldu.

2016 yılında Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. Birçok özel firmada kontrol mühendisi, saha mühendisi ve şantiye şefliği görevlerinde bulunan DEMİR en son Trans Anatolian Natural Gas Pipeline Project (TANAP) uluslararası ölçekli projede yer aldı. Aynı zamanda İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanı olan DEMİR, halen 2017 yılında kurucusu olduğu firmayla taahhüt ve mühendislik hizmetleri vermektedir.