



**UÇUCU KÜL, BAYBURT TAŞI VE MERMER TOZU
ENDÜSTRİYEL ATIKLARININ ZEMİN
STABİLİZASYONUNDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Mesut TAŞ

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ
2020**

(Her Hakkı Saklıdır)

T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**UÇUCU KÜL, BAYBURT TAŞI VE MERMER TOZU ENDÜSTRİYEL ATIKLARININ
ZEMİN STABİLİZASYONUNDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**
(Investigation of the Usability of Fly Ash, Bayburt Stone and Marble Powder Industrial
Wastes in Soil Stabilization)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mesut TAŞ

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ

BAYBURT
Ocak 2020

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ danışmanlığında, 162004021 numaralı Mesut TAŞ tarafından hazırlanan “ *Uçucu kül, Bayburt Taşı ve Mermer Tozu Endüstriyel Atıklarının Zemin Stabilizasyonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması*” adlı bu tez çalışması 03/01/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU

Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Hakan Alper KAMILOĞLU

Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ

İmza:

İmza:

İmza:

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

03/01/2020

Doç. Dr. Fatih GÜRBÜZ
Enstitü Müdürü

ETİK VE BİLDİRİM SAYFASI

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “*Uçucu kül, Bayburt Taşı ve Mermer Tozu Endüstriyel Atıklarının Zemin Stabilizasyonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması*” başlıklı çalışmanın tarafımdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını ve yararlandığım eserleri kaynakçada gösterdiğimi beyan ederim.

03/01/2020

Mesut TAŞ

TEŞEKKÜR

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

Çalışmam boyunca bana her türlü yardımlarını esirgmeden sunan ve çalışmamı tamamlamam için gerekli bilgi ve becerileri kazanmamda çok önemli bir paya sahip olan çok değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ'a ve öğrenimim süresince üzerimde emeği olan kıymetli hocalarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma sürecinde şahsıma maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen çok kıymetli arkadaşlarım, değerli abilerim Ekrem DEĞERMENCİ ve Rasim SOYTÜRK'e, dostlarım ve kardeşlerime ayrı ayrı teşekkür eder; bu zorlu ve bir o kadar da güzel yolda her zaman yanımda olan değerli arkadaşım Zekeriya Hayri ÇELİK'e sevgi ve saygılarımı sunarım.

İnşaat mühendisliği mesleğini seçmemde ve bu yolda kararlı ve doğru adımları atmamda her türlü desteğini benden esirgemeyen ve her fırsatta destek veren başta babam Abdulhalık TAŞ ve annem Sakine TAŞ olmak üzere; ablam Münevver TAŞ'a, abilerim Erkan ve Burhan TAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

UÇUCU KÜL, BAYBURT TAŞI VE MERMER TOZU ENDÜSTRİYEL ATIKLARININ
ZEMİN STABİLİZASYONUNDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Mesut TAŞ

Ocak 2020, 70 Sayfa

Bu çalışmada Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre düşük plastisiteli kil olan doğal zeminin, uçucu kül, Bayburt taşı atıkları ve mermer tozu ile birlikte iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında C sınıfı olan uçucu kül birincil bağlayıcı olarak değerlendirilmiştir. Düşük plastisiteli killi zemine, %25 uçucu kül katkısı ile birlikte %0, %5, %10, %15, %20 oranlarında mermer tozu ve Bayburt taşı ilave edilerek deney numuneleri hazırlanmıştır. Serbest basınç deneyi için kür süreleri 7, 28 ve 84 gün olarak belirlenmiştir. Hazırlanan karışımlarda indeks, dayanım ve durabilite tetkikleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmadan elde edilen veriler ışığında, Bayburt taşı atıkları ve mermer tozunun puzolanik katkı olarak uçucu küle birlikte zemin stabilizasyonunda kullanılabilir olduğu belirlenmiştir. Mermer tozunun uçucu küle birlikte kullanılmasının serbest basınç dayanımı açısından Bayburt taşı atıklarının uçucu küle birlikte kullanılmasına göre daha uygun olduğu tespit edilen bu çalışmada, Bayburt taşı atıklarının durabilite yönünden daha etkin olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Zemin stabilizasyonu, uçucu kül, bayburt taşı, mermer tozu, dayanım, durabilite.

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF THE USABILITY OF FLY ASH, BAYBURT STONE AND MARBLE POWDER INDUSTRIAL WASTES IN SOIL STABILIZATION

Mesut TAŞ

January 2020, 70 Pages

In this study, it is aimed to improve the natural soil, low plasticity clay according to Unified Soil Classification System, by using fly ash, Bayburt stone wastes and marble dust. Within the scope of the study, Class C fly ash was evaluated as the primary binder. The samples were prepared by adding 25% fly ash and 0%, 5%, 10%, 15%, 20% marble powder and Bayburt stone wastes to the low plasticity clayey soil. The curing durations for the unconfined compressive strength test were 7, 28 and 84 days and a freezing-thawing cycle test was also performed in this context. In the prepared mixtures index, strength and durability tests were performed.

In the light of the data obtained from the study, it was determined that Bayburt stone wastes and marble powder can be used as pozzolanic additives with fly ash in soil stabilization. It was concluded that the use of marble powder with fly ash is more appropriate than the use of Bayburt stone with fly ash in terms of unconfined compressive strength and Bayburt stone wastes are more effective in terms of durability.

Keywords: Soil sabilization, fly ash, bayburt stone, marble powder, strength, durability.

İÇİNDEKİLER

ETİK VE BİLDİRİM SAYFASI	i
TEŞEKKÜR	ii
ÖZ	iii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER	v
TABLolar DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
BİRİNCİ BÖLÜM	1
Giriş	1
İKİNCİ BÖLÜM	4
Kuramsal Çerçeve.....	4
Zemin İyileştirme Yöntemleri.....	4
Mekanik iyileştirme yöntemi.	7
Kimyasal stabilizasyon yöntemi.	8
Kireç ile zemin stabilizasyonu.	10
Çimento ile zemin stabilizasyonu.	13
Bitüm maddesi ile zemin stabilizasyonu.....	13
Uçucu kül katkısıyla zemin stabilizasyonu.	14
Mermer tozu ile zemin stabilizasyonu.	17
Bayburt taşı ile zemin stabilizasyonu.....	18
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM	20
Deneysel Çalışmalar	20
Materyal	20
Doğal malzeme.....	20
Uçucu kül katkı malzemesi.	22
Bayburt taşı.	24
Mermer tozu.	25
Yöntemler.....	26
Deneylerde referans alınan ASTM standartları.....	26
Zeminin sınıflandırılması.	26
Kıvam limitleri.	27
Kompaksiyon deneyi.....	28

Serbest basınç deneyi	28
Donma-çözülme çevrimi	29
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM.....	30
Araştırma Bulguları	30
Deneyleerde Alınan Veriler	30
Kıvam limitleri	30
Kompaksiyon parametreleri	35
Serbest basınç dayanımları	38
Durabilite tetkikleri	46
Donma-çözülme çevrimi	46
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	50
Kaynakça	52
EKLER	60
Ek-1. Düşen Koni Penetrasyon Deney Sonuçları	60
Ek-2. Kompaksiyon Deney Sonuçları.....	65
ÖZ GEÇMİŞ	70

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Zemin Cinslerine Göre Zemin Stabilizasyon Yöntemleri	5
Tablo 2. Zemin Stabilizasyon Yöntemlerinin Amacına Göre Kullanımı.....	6
Tablo 3. Zemin İyileştirmesinde Yaklaşık Maliyetler	7
Tablo 4. Mekanik Stabilizasyonda Gerekli Olan Gradasyon Sınır Değerleri.....	8
Tablo 5. Kimyasal Stabilizasyon Uygulamasında Katkı Maddesinin Seçim Tablosu ..	10
Tablo 6. Değişik Zemin Çeşitleri İçin Ortalama Kireç Miktarı	11
Tablo 7. Değişik Zemin Gruplarına Göre Çimento Miktarı	13
Tablo 8. Uçucu Küle Ait Fiziksel Özellikler	16
Tablo 9. Uçucu Küllerin Barındırması Zaruri Olan Fiziksel Ölçütler.....	16
Tablo 10. Ülkemizdeki Mermerlerin Genel Kimyasal Özellikleri	17
Tablo 11. Deneylerin Numunelerine Ait Notasyon Bilgileri.....	20
Tablo 12. Doğal Malzemenin Özellikleri.....	22
Tablo 13. Uçucu Küle Ait Fizikokimyasal Özellikler	23
Tablo 14. Bayburt Taşına Ait Kimyasal ve Fiziksel Özellikler.....	24
Tablo 15. Mermer Tozu Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	25
Tablo 16. Deneylerle İlgili ASTM Ölçütleri	26
Tablo 17. Deney Numunelerine Ait Kıvam Limiti Verileri	30
Tablo 18. SFABS Karışımları İçin Kompaksiyon Verileri.....	35
Tablo 19. SFAMP Karışımları İçin Kompaksiyon Verileri	35
Tablo 20. SFABS Karışımlarının Serbest Basınç Dayanımı Verileri	39
Tablo 21. SFAMP Karışımlarının Serbest Basınç Dayanımı Verileri.....	40
Tablo 22. SFABS Karışımlarının Donma-Çözülme Sonrası Basınç Dayanımları	47
Tablo 23. SFAMP Karışımlarının Donma-Çözülme Sonrası Basınç Dayanımları	47

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Zeminlerde kullanılacak iyileştirme yönteminin belirlenmesi.	2
Şekil 2. Zemin stabilizasyon yöntemleri.	2
Şekil 3. Zemin dane boyutlarına göre iyileştirme yöntemleri.	4
Şekil 4. Üçgen gradasyon nomogramı.	9
Şekil 5. Mastersizer 3000 lazer kırınım deney aleti.	21
Şekil 6. Doğal malzemeye ait dane boyutu dağılım grafiği.	22
Şekil 7. Uçucu külün granülometri eğrisi.	23
Şekil 8. Bayburt taşı atıklarının granülometri eğrisi.	25
Şekil 9. Mermer tozuna ait dane boyutu dağılım eğrisi.	26
Şekil 10. Koni penetrasyon deney düzeneği ile etüv içerisine bırakılan malzemeler. ...	27
Şekil 11. Standart proktor deneyi yapım aşamaları.	28
Şekil 12. Tek eksenli serbest basınç test düzeneği.	29
Şekil 13. Donma-çözülme çevrimi ve işlemleri.	29
Şekil 14. SFABS karışımlarına ait likit limit değerleri.	32
Şekil 15. SFAMP karışımlarına ait likit limit değerleri.	32
Şekil 16. SFABS karışımlarına ait plastik limit değerleri.	33
Şekil 17. SFAMP karışımlarına ait plastik limit değerleri.	33
Şekil 18. SFABS karışımlarına ait plastisite indisi değerleri.	34
Şekil 19. SFAMP karışımlarına ait plastisite indisi değerleri.	34
Şekil 20. SFABS karışımları için optimum su içerikleri.	36
Şekil 21. SFAMP karışımları için optimum su içerikleri.	37
Şekil 22. SFABS karışımlarının maksimum kuru yoğunluk değerleri.	37
Şekil 23. SFAMP karışımlarının maksimum kuru yoğunluk değerleri.	38
Şekil 24. Deney numunelerinin hazırlanışı.	38
Şekil 25. Numunelerin desikatörde kür edilmesi.	39
Şekil 26. Tek eksenli serbest basınç dayanımların test düzeneği.	39
Şekil 27. SFABS numunelerinin 7 günlük kür sonrası serbest basınç dayanımları.	42
Şekil 28. SFAMP numunelerinin 7 günlük kür sonrası serbest basınç dayanımları.	42
Şekil 29. SFABS numunelerinin 28 günlük kür sonrası serbest basınç dayanımları.	43
Şekil 30. SFAMP numunelerinin 28 günlük kür sonrası serbest basınç dayanımları. ...	43
Şekil 31. SFABS numunelerinin 84 günlük kür sonrası serbest basınç dayanımları.	44
Şekil 32. SFAMP numunelerinin 84 günlük kür sonrası serbest basınç dayanımları. ...	44

Şekil 33. SFABS ve SFAMP numunelerinin 7 günlük serbest basınç dayanımlarının karşılaştırılması.....	45
Şekil 34. SFABS ve SFAMP numunelerinin 28 günlük serbest basınç dayanımlarının karşılaştırılması.....	45
Şekil 35. SFABS ve SFAMP numunelerinin 84 günlük serbest basınç dayanımlarının karşılaştırılması.....	46
Şekil 36. SFABS karışımlarının donma-çözülme sonrası basınç dayanımları.....	48
Şekil 37. SFAMP karışımlarının donma-çözülme sonrası basınç dayanımları.....	48
Şekil 38. SFABS ve SFAMP karışımlarına ait donma-çözülme sonrası serbest basınç dayanımlarının karşılaştırılması.....	49
Şekil 39. Doğal zemine ait düşen koni penetrasyon grafiği.....	60
Şekil 40. SFA karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.....	60
Şekil 41. SFABS5 karışımına ait düşen koni penetrasyon grafiği.....	61
Şekil 42. SFABS10 karışımına ait düşen koni penetrasyon grafiği.....	61
Şekil 43. SFABS15 karışımına ait düşen koni penetrasyon grafiği.....	62
Şekil 44. SFABS20 karışımına ait düşen koni penetrasyon grafiği.....	62
Şekil 45. SFAMP5 karışımına ait düşen koni penetrasyon grafiği.....	63
Şekil 46. SFAMP10 karışımına ait düşen koni penetrasyon grafiği.....	63
Şekil 47. SFAMP15 karışımına ait düşen koni penetrasyon grafiği.....	64
Şekil 48. SFAMP20 karışımına ait düşen koni penetrasyon grafiği.....	64
Şekil 49. Doğal zemine ait kompaksiyon eğrisi.....	65
Şekil 50. SFA karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	65
Şekil 51. SFABS5 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	66
Şekil 52. SFABS10 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	66
Şekil 53. SFABS15 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	67
Şekil 54. SFABS20 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	67
Şekil 55. SFAMP5 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	68
Şekil 56. SFAMP10 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	68
Şekil 57. SFAMP15 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	69
Şekil 58. SFAMP20 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	69

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

%	: Yüzde
A	: Alan
Al	: Alüminyum
Ca	: Kalsiyum
Ca(OH)₂	: Kalsiyum Hidroksit
CaCO₃	: Kalsiyum Karbonat
CaO	: Kalsiyum Oksit (Sönmemiş Kireç)
CH	: Yüksek Plastisiteli İnorganik Kil
CL	: Düşük Plastisiteli İnorganik Kil
cm	: Santimetre
cm²	: Santimetrekare
cm³	: Santimetreküp
CO₂	: Karbondioksit
CS₂	: Karbondisülfür
dk	: Dakika
GC	: Killi Çakıl
GM	: Siltli Çakıl
GP	: Kötü Derecelenmiş Çakıl
gr	: Gram
GW	: İyi Derecelenmiş Çakıl
H₂O	: Su
JG	: Jet Grout
k	: Geçirgenlik Katsayısı
K	: Potasyum
kg	: Kilogram
km	: Kilometre
kPa	: Kilopaskal (kN/m ²)
LL	: Likit Limit
lt	: Litre
m	: Metre
m²	: Metrekare

m³	: Metreküp
Mg	: Magnezyum
MgO	: Magnezyum Oksit
MH	: Yüksek Plastisiteli İnorganik Silt
ML	: Düşük Plastisiteli İnorganik Silt
mm	: Milimetre
Na	: Sodyum
PI	: Plastisite İndisi
PL	: Plastik Limit
rpm	: Dakikadaki Devir Sayısı
s	: Saniye
SC	: Killi Kum
SM	: Siltli Kum
SP	: Kötü Derecelenmiş Kum
SW	: İyi Derecelenmiş Kum
w	: Su Muhtevası
w_{opt}	: Optimum Su Muhtevası
w_n	: Doğal Su Muhtevası (%)
°C	: Santigrad Derece
ρ_k	: Kuru Yoğunluk
ρ_{kmax}	: Maksimum Kuru Yoğunluk

Kısaltmalar

AASHTO	: Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği
ASCE	: Amerika İnşaat Mühendisleri Derneği
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
CBR	: Kaliforniya Taşıma Oranı
FHWA	: Federal Otoyol Yönetimi (Amerika)
TS	: Türk Standartları
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi

BİRİNCİ BÖLÜM

Giriş

Jeoloji, kayaçların ve zeminlerin oluşumlarını, davranış ve özelliklerini ortaya çıkaran bilim dalıdır. Zemin, kayaçların ayrışmasıyla ortaya çıkan katı danelerle içerisinde bulundurduğu sıvı ya da gazlardan doldurulmuş boşluklardan oluşan aynı zamanda içerisinde doğal madde besleyen malzemeler bütünüdür. Zemin mekaniği, hidrolik ve mekanik ile ilgili kurallar dahilinde zeminlerin davranışlarını inceleyen bilim dalıdır.

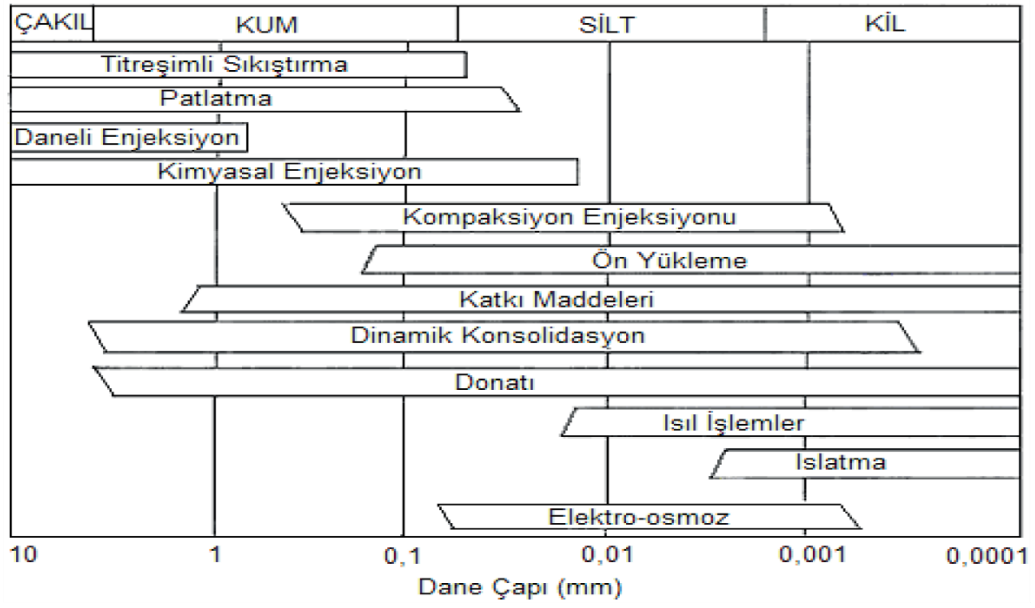
Stabilizasyon, zeminlerin yapılarında bulundurduğu özelliklerin istenilen özelliklere ulaştırma işlemine denir (Önalp, 1983). Zeminlerin mühendislik özelliklerinin zayıf olduğu durumlarda kullanılacak olan yöntemleri şu şekilde sıralayabiliriz:

- ✓ Zayıf özelliklere sahip zeminin kaldırılarak yerine daha güçlü mühendislik özellikleri olan zeminin ikame edilmesi,
- ✓ Üstyapı projesine ait kullanılan malzemenin kalitesinin artırılması ve yapısal elemanlarının boyutlarında değişime gidilmesi,
- ✓ Hali hazırda bulunan zeminin mühendislik özelliklerinin uygun stabilizasyon yöntemleri ile iyileştirilmesi (Balta, 1984).

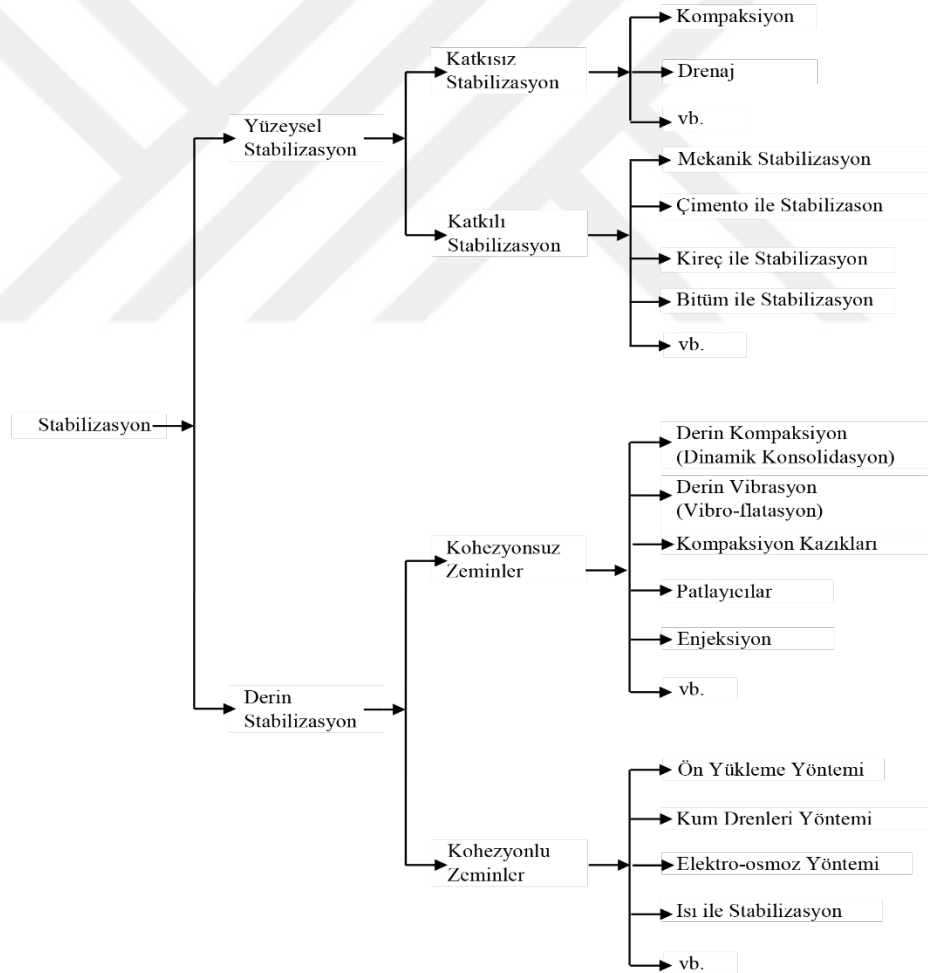
Zemin iyileştirme yöntemlerinin ana gayesi zeminin üzerine gelebilecek yüklere karşı zemin mühendislik özelliklerini yeterli seviyeye çıkarmaktır. Zemine ait iyileştirme yöntemleri iki kategoride değerlendirilebilir:

- ✓ Herhangi bir katkı maddesi yardımı olmadan stabilizasyon (Dinamik konsolidasyon metodu, Vibro-kompaksiyon, Yüzeysel kompaksiyon vb.)
- ✓ Her hangi bir katkı maddesi kullanılarak zemini kalıcı olarak iyileştirme (Uçucu kül, çimento, kireç, silis dumanı gibi katkıları ile zeminin uniform olarak karıştırılması, kireç kazıkları, enjeksiyon ile iyileştirme vb.)

Zemin iyileştirme yöntemleri iyileştirilecek zeminlerin sınıfına göre farklılık göstermektedir. Zeminlerde kullanılacak iyileştirme yöntemlerinin farklı zeminlere göre belirlenmesi Şekil 1'de gösterilmiştir. Yüzeysel ve derin stabilizasyon olmak üzere ikiye ayrılan zemin iyileştirme yöntemleri Şekil 2 vasıtasıyla sunulmuştur.



Şekil 1. Zeminlerde kullanılacak iyileştirme yönteminin belirlenmesi (Yıldırım, 2002).



Şekil 2. Zemin stabilizasyon yöntemleri (Uzuner, 2013).

Yapılan yüksek lisans tez çalışmasının ana gayesi, Bayburt Taşı ve mermer tozu atıklarının uçucu kütle birlikte zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır. Uçucu külün birincil bağlayıcı olarak değerlendirildiği çalışma kapsamında Bayburt taşı ve mermer tozu atıkları farklı oranlarda zemine karıştırılmış ve hazırlanan tüm numunelerin geoteknik özellikleri irdelenmiştir. Deneyde kullanılan zemin numuneleri için kür süreleri 7, 28 ve 84 gündür. Bu sürelerin ardından serbest basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Durabilite tetkikleri açısından 28 günlük süresi sonunda donma çözülme deneyleri yapılmıştır.



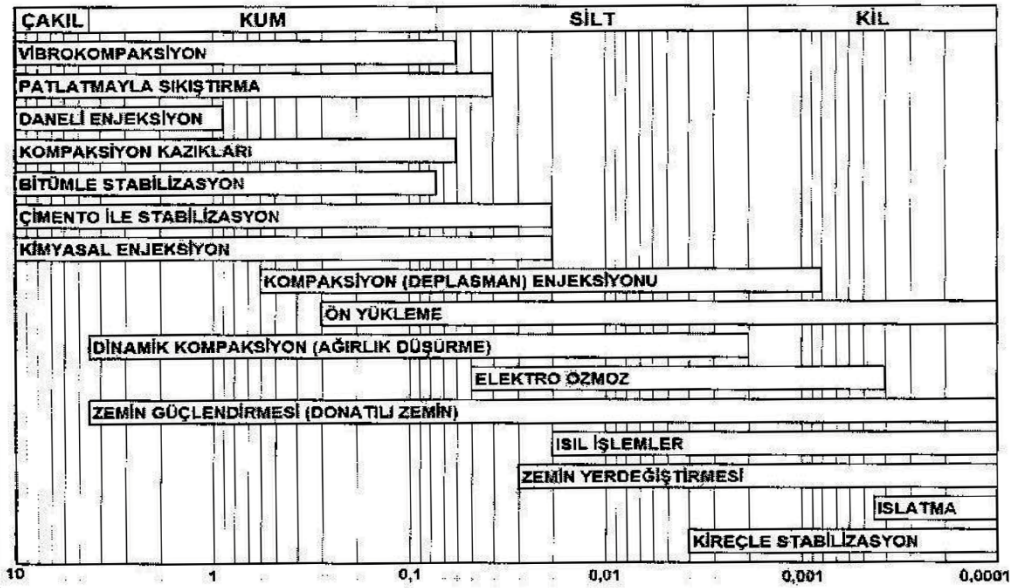
İKİNCİ BÖLÜM

Kuramsal Çerçeve

Zemin stabilizasyon uygulamalarıyla ilgili açıklamalar, örneklemeler ve yapılmış araştırmalara ait bilgilere bu kısımda yer verilmiştir.

Zemin İyileştirme Yöntemleri

Zemin iyileştirilmesi işlemlerindeki amaç, zemin içinde yer edinmiş boşluk hacimlerini minimum seviyesine getirmek, çeşitli ilave maddelerle bu boşlukları kapatmak ve zemine ait özelliklerin daha güçlü duruma getirmektir (Sağlamer, 1985). Zemin dane boyutlarına göre iyileştirme yöntemleri Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Zemin dane boyutlarına göre iyileştirme yöntemleri (Sağlamer, 1985).

Zeminin taşıma gücünün ve mukavemetinin uygun olmayışı zeminde meydana gelebilecek olan oturmaların yüksek olması, yanal ve/veya dikey yüklerin etkisinde taşıma gücünde kayıpların olması, temel kazılarında meydana gelebilecek aksilikler, şevlerin duraysızlığı, sıvılaşma ve borulanma gibi problemler zeminin iyileştirme ihtiyacını ortaya çıkaran temel sebeplerdendir.

Zemin stabilizasyonunda kimyasal veya mekanik stabilizasyon sıklıkla tercih edilen yöntemlerdendir. Zemine genellikle farklı bir zemin katarak gerçekleştirilen ve fiziksel ve

mekanik özelliklerde iyileştirme meydana getiren yöntem mekanik stabilizasyon adı verilmektedir (Edil, Benson, Bin-Shafique, Kim, Tanyu, & Senol, 2002). Çalışmada yerinde iyileştirme veya hareketli bir şekilde karıştırma yapılır. Ardından hazırlanan bu karışım yere serilip dikkatlice sıkıştırma işlemi yapılır (Çalık, 2012). Uygulamadaki öncelik gradasyonu ayarlayıp, likit limit değerinin ya da plastisite indis değerlerinin azaltılması, permeabilite düşürülmesi, dayanımla durabilitenin artırılmasıdır (Winterkorn, & Fang, 1975). Kimyasal stabilizasyon zemine eklenen katkı maddelerinin zeminle reaksiyona girmesi sonucu gerçekleşir (Lambe, Khosla, & Jayaratne, 1990).

İyileştirme yöntemleri zeminin cinsine ve amacına göre farklılıklar meydana getirir. Tablo 1’de zemin türleri için zemin iyileştirme yöntemleri verilmiş olup Tablo 2’de ise zemin iyileştirme yöntemlerinin stabilizasyon amacına göre kullanımı sunulmuştur. Stabilizasyon yöntemlerinin uygulanması aşamasında ortaya çıkan harcamaların kontrolü gerekmektedir. Tablo 3’te zeminlerin iyileştirilmesi için yaklaşık maliyetler verilmektedir (U.S. Army Corps. of Eng., 2003).

Tablo 1. *Zemin Cinslerine Göre Zemin Stabilizasyon Yöntemleri (Hunt 1986; 1994)*

Zemin cinsi	Stabilizasyon yöntemi	
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	Vibroflasyon, vibrokompaksiyon, dinamik kompaksiyon, enjeksiyon, taş kolonlar, drenaj kuyuları, termal (dondurma)
Sıvılaştırılabilir 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. Zemin Stabilizasyon Yöntemlerinin Amacına Göre Kullanımı

Amaçlar	Stabilizasyon Yöntemleri
Sıvılaşma direncini artırmak, Deplasmanları azaltmak.	Vibrokompaksiyon Taş kolonlar Derin dinamik kompaksiyon Patlayıcı teknîği ile kompaksiyon Çakıl kolonlar Jet grout Kompaksiyon enjeksiyonu Granüler kolonlar (kum ve çakıl)
Farklı oturmaya maruz kalabilecek yapıların zeminlerini ıslah etmek. Farklı oturma, deformasyon ve kırılma direncini artırmak.	Kompaksiyon enjeksiyonu Mini kazıklar Jet grout
Ani oturmaları azaltmak.	Vibrokompaksiyon Derin dinamik kompaksiyon Patlayıcı teknîği ile kompaksiyon Jet grout Kompaksiyon enjeksiyonu Granüler kolonlar (kum ve çakıl)
Şişen zeminleri ıslah etmek.	Çimento stabilizasyonu Kireç stabilizasyonu Drenaj Mekanik stabilizasyon
Şev stabilitesini artırmak.	Çakıl drenler Payanda dolgusu Granüler kolonlar (kum ve çakıl) Kompaksiyon enjeksiyonu Zemin çivi ve vidaları Jet grout
Konsolidasyon oturması oranını artırmak.	Sürsarj dolgulu veya dolgusuz yüzey drenler Granüler kolonlar (kum ve çakıl)
Konsolidasyon oturmalarını azaltmak.	Sürsarj (Ön yükleme) Jetgrout Taş kolonlar Kompaksiyon enjeksiyonu Elektro- osmoz
Sızıntı yollarını kapamak ve / veya su akımı doğrultusundaki borulanmayı azaltmak.	Penetrasyon enjeksiyonu Kompaksiyon enjeksiyonu
Erozyon direncini artırmak. Çatlaklardan ve bileşim yerlerinden su kaçaklarını engellemek.	Mekanik stabilizasyon Bioteknik stabilizasyon Kompaksiyon Kompaksiyon enjeksiyonu
Göçen zeminleri ıslah etmek.	Derin dinamik kompaksiyon Enjeksiyon Vibrokompaksiyon

Tablo 3. Zemin İyileştirmesinde Yaklaşık Maliyetler (U.S. Army Corps. of Eng., 2003)

Metodlar	Göreceli maliyet	\$/m	\$/m ²	\$/m ³	Referans
Derin dinamik kompaksiyon	Düşük	-	8-32	5	FHWA (1998)
Vibrokompaksiyon	Düşük-Orta	Arka dolgusuz 15, granüler arka dolgulu 25	-	1-4	Ledbetter (1985)
Taş kolonlar	Orta	45-60	-	-	Adailer (1996)
Çakıl direnler	Orta	11-22	-	-	
Patlatma tekniği ile kompaksiyon	Düşük	-	-	2-4	
Jet grout	Yüksek-Çok yüksek	Sızma kontrolü 30-200 Kazı sahasının desteklenmesi 95-650	-	-	FHWA (1998)
Zemin çivileri	Orta-Yüksek	-	Geçici 165-775, Sürekli 160-400	-	
Kompaksiyon 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 şeklinde saran bitkilendirme 275-550	-	ASCE (1997)
Zeminin değiştirilmesi	Orta	-	-	10-20	Hayward (1996)
Düşey drenler	Düşük	1.2-4	-	-	FHWA (1998)
Taneli enjeksiyon	Orta	-	-	3-30	Adailer (1996)

Mekanik iyileştirme yöntemi.

Bu iyileştirme yöntemi, çeşitli zeminlerin belirlenen miktarlarda karıştırılmasıyla amaçlanan özellikleri elde edebilmek için yapılır (Aytekin, 2004). Mekanik stabilizasyon uygulamasında, ince taneli (kohezyonlu) zeminlere iri daneli zemin ilave edilerek zemin iyileştirilmesi yapılmaktadır. Bu sebeple genellikle mekanik stabilizasyona granüler stabilizasyon denilmektedir (Çalık, 2012).

Mekanik iyileştirme yönteminde amaç, gradasyonun düzeltilmesi, likit limitin veya plastisite indisinin azaltılması, dren kapasitesinin artırılması, uzun dönemdeki zemin oturmalarının ve don duyarlılığının azaltılması, kapilaritenin azaltılması, dayanım ve durabilite gibi özelliklerin artırılmasıdır (Winterkorn, & Fang, 1975). Uygulanan bu stabilizasyon yöntemi için herhangi bir metot yoktur. Farklı tür zeminlerden çeşitli oranlarda deneme yoluyla

karışımlar hazırlanmakta ve özellikleri incelendikten sonra karar verilmektedir. Bu yöntem, 200 No'lu elek altında kalan miktarın daha fazla olduğu ince daneli zeminlerde ve iri daneli zeminlerde uygun miktarlarda harmanlanarak zayıf özelliklerin iyileştirilmesi yapılmaktadır. Çalışma sonucunda elde edilen karışımın dane dağılımı (gradasyon) sonucunda kohezyonsuz zeminlerin plastisitede ortaya çıkan özellikleri mekanik iyileştirmenin başarısında en etkili rolü oynamaktadır. Bilindiği üzere gradasyon; zemin yoğunluğu, geçirimsizliği, stabilitesi ve su tutma kapasitesi gibi özellikler üzerinde direkt olarak etkilidir. Genellikle iyi derecelendirilmiş zeminlerde segregasyonun azaldığı söylenebilir (Jewell, 1968). Maksimum dane boyutunun zeminde oldukça iri olması, zeminin işlenebilir olmasını azalttığı gibi fazla miktarda bulunması da ayrışmaya sebebiyet vermektedir (Rodriquer, Castillo, & Sowers, 1973). Tablo 4'te mekanik stabilizasyonda gerekli olan gradasyon sınır değerleri sunulmuştur. Verilen tabloda Tip I iri gradasyona sahip zeminler, Tip II ise ince zeminlere ait sınır değerlerdir.

Tablo 4. *Mekanik Stabilizasyonda Gerekli Olan Gradasyon Sınır Değerleri (AASHTO, 1993).*

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

Kimyasal stabilizasyon yöntemi.

Zemin iyileştirme yönteminde kullanılan katkı maddeleri ilk zamanlarda ulaşım yapılarının temel tabakalarında kullanılmıştır. Aynı zamanda su yapılarında da bu uygulamadan faydalanılmıştır. Kimyasal stabilizasyon bir başka uygulaması da hafif olan yapıların temellerinde de kullanılmasıdır. Böylelikle mühendislik özellikleri zayıf olan zeminlerin stabilizasyonu sağlanmıştır (Önalp, 1983). Kimyasal stabilizasyon metodu, zemin özelliklerinin iyileştirilebilmesi bakımından oldukça ekonomik yöntemdir (Kukko, 2000).

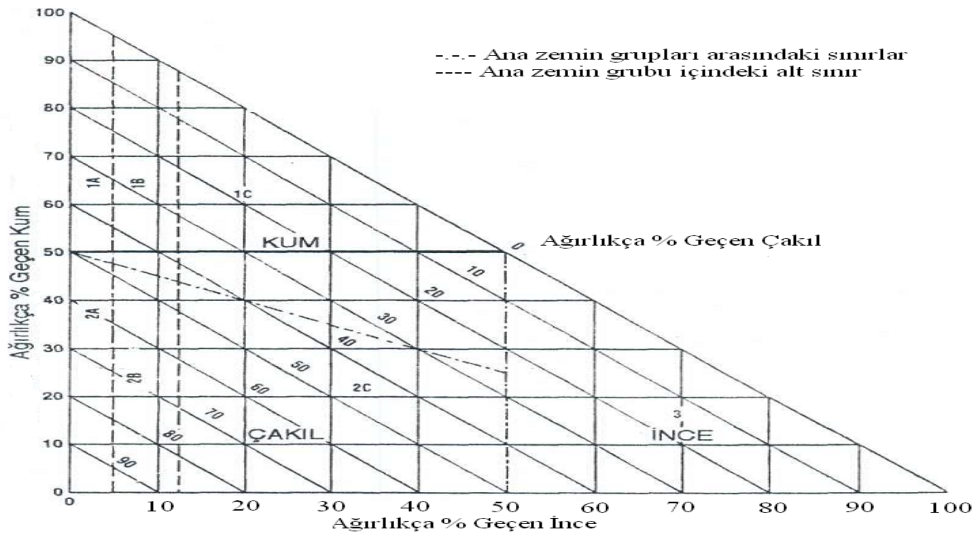
Kimyasal iyileştirme uygulamasının ana hedefleri şu şekilde özetlenebilir:

- ✓ Hacim sabitliğinin sağlanması,
- ✓ Dayanımın artırılması,

- ✓ Oluşacak deformasyonları azaltmak,
- ✓ Durabiliteyi artırmak,
- ✓ Aşınabilirliğini azaltmak,
- ✓ Taşıma gücünde artış sağlamak,
- ✓ Oturmaların azaltılmasını,
- ✓ Değişkenlik özelliklerini kontrol etmek,
- ✓ Şişme ve büzülme azaltmak,
- ✓ Şev kaymalarının engellenmesi (Pektaş, 2012).

Katkı maddelerinin kullanılmasıyla zeminde bulunan zayıf özelliklerin emniyetli, ekonomik ve doğal bir malzemeyle iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Uygulamalarda sık sık kullanılan katkı maddeleri bitüm katkı maddesi, çimento katkısı, kireç katkı maddesinin yanı sıra farklı özel kimyasal bileşiklerdir (Hausmann, 1990).

Zeminde oluşan ufalanma karakteristikleri baz alınarak hazırlanmış olan üçgen gradasyon nomogramı Şekil 4'te sunulmuştur. Hazırlanan şekilde zeminin yapısı tespit edilir ve belirlenen stabilizatörün türü seçilir (Tunç, 2001). Bu stabilizasyon yöntemi için katkı seçiminde farklı bir yol ise U.S. Army Corps. of Eng. (2003) bulmuş olduğu tablo, Tablo 5'te sunulmaktadır.



Şekil 4. Üçgen gradasyon nomogramı (Tunç, 2001).

Tablo 5. Kimyasal Stabilizasyon Uygulamasında Katkı Maddesinin Seçim Tablosu (U.S. Army Corps. of Eng., 2003)

Alan no	Zemin sınıfı	Önerilen katkı	Kısıtlamalar	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	-	-	
	GP	Çimento	-		Çimento katkısı sadece iyi gradasyonlu zeminlerde ve 4 No.lu elekten geçen en az %45 olduğu durumlarda
		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	Kireç	PI<20	-	
	ML		PI>12		
	ML-CL				

Kireç ile zemin stabilizasyonu.

Kireçle zemin stabilizasyonu, dolgu malzemesi kriterlerini sağlayamayan, basınç dayanımları ve Kaliforniya taşıma oranı değerlerinin düşük olduğu ve şişme potansiyellerinin yüksek olan zeminlerin kullanabilmek için özelliklerini arttırarak belirli özelliklere sahip olan toz şeklinde bulunan sönmüş ya da sönmemiş kirecin ilave edilmesi ve birlikte kullanılmasıyla yapılan bir yöntemdir (Kavak, Güngör, Avşar, & Atbaş, 2008).

Kireç ile stabilizasyon çalışmalarında kil içerisinde sülfat iyonu bulunduran çimentolaşma özelliği kazanan etrenjitin oluşması nedeniyle zemin içerisinde şişmeler oluşabilir (Mitchell, 1986; Hunter, 1988). Petry ve Little (1992) yapmış oldukları çalışma neticesinde %0,2 oranlarına dek sülfat oranlarında şişme probleminin görülebileceğini belirtmişlerdir. Mitchell (1986) tarafından yapılmış çalışma sonucunda %0,5 oranından daha fazla sülfat içeriği olan zeminlerde kireç stabilizasyonu çalışmalarında kullanılmaması gerektiğini vurgulamıştır.

Genel anlamda bakıldığında organik madde bulunduran zeminler için kireç stabilizasyonu etkili bir uygulama değildir. Zemin yapısında bulunan %5 oranından daha fazla organik madde, kireç stabilizasyonu yönteminde meydana gelen reaksiyonları durdurucu bir etkiye sahiptir (Arman, & Moonfish, 1972). Aynı zamanda kireç stabilizasyonunda da olumsuz etki gösterebilmektedir. Başlangıçta organik maddeler ile sülfat iyonlarının olması stabilizasyonu kötü durumda etkilediğini göstermeyebilir, ancak sonralarda kuruma ve ıslanma periyotlarında zemini parçalayarak ayrıştırmaktadır (Nelson, & Debora, 1992).

Kireçle zemin stabilizasyonu uygulaması kumlu zeminde pek etkili olmamasına karşın killi zeminlerde oldukça etkilidir. Nedeni kirecin reaksiyona gireceği ince taneli zeminlerde silikaların alanlarının az ve reaksiyon potansiyellerinin yetersiz olmasıdır. Ancak kum-kireç karışımlarında kirecin etkin olması kumların yapısındaki bu mineralleri etkileyecek etkileşim sağlayacak bir katkıyla yükseltilebilir bir durumdur (El-Rawi, & Abdul-Hasan, 1986).

Ingles ve Metcalf (1973) ve de Kedzi (1979) yaptıkları çalışmada zemin stabilizasyonu için zeminin kuru ağırlığının %2 ile %3 oranında sönmüş kireç miktarının yeterli olacağını belirtirken, Yoder ve Witczak (1975) ise minimum %4 oranında sönmüş olan kirecin kullanımının gerekli olacağını ifade etmişlerdir. Eades ve Grim (1960) yaptıkları çalışmada optimum kireç miktarı için kil cinslerine bağlı olarak kaolin cinsi killi zeminlerde %4 ile %8, ilit ve montmorilonit cinsi killi zeminler için ise %8 oranı olarak verilmektedir. Nelson ve Debora (1992) zeminlerin cinslerine bağlı olarak tavsiye ettikleri kireç oranları Tablo 6'da belirtilmiştir.

Tablo 6. *Değişik Zemin Çeşitleri İçin Ortalama Kireç Miktarı (Nelson ve Debora, 1992)*

Zemin Çeşitleri	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

Zeminde iyileştirme adına yapılan araştırmalarda katkı maddesi olarak en sık rastlanan çimento katkısı, kireç katkısı ve bitüm maddesidir. Kireçle yapılan stabilizasyonda zeminin az süre içerisinde optimum düzeyde olan su içeriği artırdığı, proktor yoğunluklarını düşürdüğü, plastisite indisi değerlerinin azaldığı, proktor eğrisinin düzleştiği ve Kaliforniya taşıma oranında ise artış meydana gelmektedir (Kavak, 1996).

Eren ve Filiz (2009) yaptıkları çalışmanın neticesinde %8 oranı ile kireç maddesinin kullanarak, zemine ait şişmenin bittiği gözlenmiştir. Kireçle beraber polipropilen liflerin kullanıldığı farklı bir çalışmada ise, %5 kireç ve %0.25 lifin bir arada karıştırılarak kullanılması

sonucunda basınç dayanımı değerlerinin oldukça yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiştir (Cai, Shi, Charles, & Tang, 2006).

Al-Muhktar, Lasledj ve Alcover (2010) tarafından yapılan araştırmada yüksek plastisiteye sahip killi bir zeminin kireç ile iyileştirilmesinde kürdeki sıcaklığın 20 °C’de tutulmasından 50 °C’de tutulmasına kıyasla puzolanik özelliklerin ve zemine ait özelliklerde olumlu sonuçlar ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Rajasekaran ve Rao (2002) tarafından yapılan araştırmada kireç ile stabilizasyon çalışmasının ardından oldukça plastik özellikte olan zeminin kireç katkısının etkisiyle birlikte permeabilite katsayısında zamanla 15 ile 18 kat artış olduğu gözlenmiştir.

Kirecin zeminde kullanılması neticesinde kation değişimi, topaklaşma, ayrıştırma ve çimentolaşma gibi reaksiyonlar oluşmaktadır (Fang, 1991). Kireç katkısıyla stabilizasyon için gerekli reaksiyonların oluşması suyun varlığı önemli unsurdur (Little, 1987).

Kireç ile iyileştirme çalışmalarının reaksiyon düzeneğinde, kirecin zemin daneleri aralarında bulunan boşluklarda ortaya çıkan Ca^{+} iyonu konsantrasyonu artırırken, OH^{-} iyonları da ortamda ki pH oranını artırır. Ortama ait pH değerindeki artışla zeminin kation değişim kapasitesi artar. Genel olarak kısa sürede tamamlanan ve zeminin plastisite, işlenebilirlik gibi özelliklerinde önemli derecede değişimin meydana geldiği olaylar bütününe kation değişim reaksiyonu denmektedir (Bell, 1996).

Yumaklaşma ve agregasyon, kation değişimi reaksiyonlarının sonucunda meydana gelir. Birbirine komşu kil daneleri arasındaki Van der Waals bağlarının güçlenmesi sonucu killerin tanecikleri ayırgan yapıdan, oval bir yapı şekline geçer. Bu oluşan olaya yumaklaşma adı verilmektedir. Yumaklaşmanın devamında, kil tanecikleri içerisinde bağlar yardımıyla birbirlerine kenetlenme ile beraber temas meydana gelir. Bu olaya da agregasyon denmektedir (Çalık, 2012).

Çoğunlukla killerin bileşiminde var olan SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 bileşikleriyle kirecin suda iyonlaşması sonucu oluşan Ca^{+2} iyonu ile bu kimyasal olan reaksiyonlar ortaya çıkmaktadır. Killerin içerisinde yeterli oranlarda SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 bileşikleri bulunmadıkları takdirde puzolan takviyesiyle kirecin etkinliği artırılır (Atanur, 1973). Oluşan bu tepkimeler sonunda CSH, CAH ve CASH tarzında dayanımı yüksek ürünlerin oluşmasına çimentolaşma denir. Çimentolaşma maddeleri, zeminin mukavemet ve durabilitesinin artmasını sağlarlar.

Çimento ile zemin stabilizasyonu.

Çimento doğal kalker taşları ve killerin yüksek sıcaklıkla beraber pişirilmesi ve sonrasında inceltmesiyle oluşan tek başına bağlayıcı özelliği olan bir maddedir. Çimentonun su ile birleştiği an sağlam bir kütle hacmi kazanır ve dayanımda olumsuz etki yaratmayan ya da arttıran bağlayıcı maddelerdir.

Çimento içerisinde bulunan silika, puzolanik aktiviteyi oluşturan maddedir. Bu nedenle stabilizasyonda kil minerali bulundurmaması zeminde daha iyi sonuç verir. Zemin dayanımlarında sonuçların artması adına kullanılan madde miktarına bağlı olmakla beraber betondaki artan çimento katkı maddesiyle beraber dayanım artışı gözlenmiştir (Özaydın, 1995).

Çimento katkısı ile stabilizasyon çalışmaları gevşek ve akışkan olmayan zeminlerde kullanılıp ve yeterli düzeyde etkili olmaktadır. Zemine çimento ilavesiyle zeminin likit limit değerlerinde azalma meydana gelirken, plastik limit ve işlenebilirliği artmaktadır. Bilhassa killi yapıya sahip zeminin LL değeri %50 oranından, PI değeri de %25 miktarından düşük ise bu uygulama oldukça elverişlidir. Çimento maddesi aynı kireç maddesi gibi kür süresinin artmasıyla zemindeki dayanımı da artırır. Değişik zemin gruplarına göre çimento miktarı Tablo 7’de sunulmuştur.

Tablo 7. *Değişik Zemin Gruplarına Göre Çimento Miktarı (Tunç, 2002)*

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

Bitüm maddesi ile zemin stabilizasyonu.

Bitüm maddesi genellikle karayollarının stabilizasyonunda kullanılmaktadır. Kireç ve/veya çimento ile zemin iyileştirme uygulamalarında genel olarak zemin dayanımlarında arttırım sonucunu verirken bitüm ise madde ile birleşerek suyun neden olduğu etkilerin önüne geçilmesi için oldukça etkindir. Bitüm katkı maddesinin zeminin dane yüzeylerini kaplamasıyla beraber ince taneciklide suyun etkileşimi ile birlikte yumuşaması engellenirken, iri daneli zeminlerde ise zeminlerin kohezyon kazanması sağlanır. Zemindeki danelerin bitümle birlikte

birbirine kenetlenmesiyle beraber su ve rüzgar erozyonu sonucu oluşabilecek kayıpların da önüne geçilir (Özaydın, 1995). Bitümlü iyileştirme çalışmalarında katkı maddesi olarak bilhassa asfalt ya da katran gibi malzemeler kullanılır. Kullanılacak katkı maddesi oranı %5-10 seviyesindedir. Bitüm ile stabilizasyon uygulaması esasen yollarda, yüzey kaplamalarında seçilen bir uygulamadır (Uzuner, 2013).

Bitüm ile yapılan stabilizasyonda, killi zeminler dışında daneli ve esnekliği olmayan zemin için uygulanır. Bu katkı maddesi, kohezyonsuz granüler zeminde daneleri birbirlerine kenetleyerek boşluksuz bir yapı ve taşıma gücünü artıran bir etki yapar. İnce taneli zeminler için ise amaç boşluklu yapının minimize edilmesidir (Hausmann, 1990; Çakıroğlu, 2007).

Uçucu kül katkısıyla zemin stabilizasyonu.

Güç santrallerinin yan ürünü olarak ortaya çıkan bu maddeler, kimyasal özellikleri bakımından farklı şekillerde sınıflandırılır. Uçucu kül katkı maddeleri, içerisinde bulunan Karbon monoksit miktarına göre; %10 oranından azsa düşük kireçli-kalsiyumlu, daha yüksek olanlara ise yüksek kireçli-kalsiyumlu uçucu kül şeklinde 2'ye ayrılır (Erdoğan, 1995).

Zemin stabilizasyonu çalışmalarından, Kumar ve Sharma (2004) yapmış oldukları çalışmada uçucu kül atık maddesinin miktarında artış olmasıyla maksimum kuru yoğunluklarında ve plastik limitlerinde artışlar, likit limit değerlerinde ve optimum su içeriklerinde düşüşler, ayrıca uçucu kül katkısı ile birlikte zeminin geçirimsizlik değerlerinin azaldığı, CBR ve elastisite modülü değerlerinin arttığı (Edil, Acosta, & Benson, 2006), lineer büzülme değerlerinin azaldığı (Buhler, & Cerato, 2007), durabilitenin arttığı (Yarbaşı, Kalkan, & Akbulut, 2007), görünür kohezyon değerlerinin artış eğilimi gösterdiği ve içsel sürtünme açısı değerlerinin azaldığı (Lin, Lin, & Luo, 2007), serbest şişme yüzdesi değerlerinin azaldığı belirlenmiştir (Seco, Ramires, Miqueleiz, & Garcia, 2011). Uçucu kül atık maddesinin oranını artırarak hazırlanmış numunelerde serbest basınç dayanım sonuçlarında artışlar gözlenmiştir (Kumar, Walia, & Bajaj, 2007).

Brooks (2009) yaptığı çalışmada, uçucu kül katkısı ve pirinç kabuğu külünün şişen zemin üzerindeki dayanım özelliklerini araştırmıştır. %25 oranında uçucu kül katkı maddesi ve %12 pirinç kabuğu külü kullanarak şişmiş zeminde bihayli yüksek dayanım elde edilmiştir.

Uçucu kül atık maddesiyle yapılan çalışmada yüksek şişme potansiyelindeki kil bulunduran zeminin fiziksel ve kimyasal gibi özellikleri için belirli oranlarda C sınıfı kül atık maddesi ile stabilizasyonun ne gibi sonuçlar meydana getireceğine bakılmıştır. Elde edilen

verilere göre en uygun uçucu kül katkı oranı %35 olarak belirlenmiştir (Mollamahmutoğlu, Yılmaz, & Güngör, 2009).

Yılmaz (2016) yapmış olduğu çalışma kapsamında düşük plastisiteli killi bir zeminde %0-5-10-15-20-25-30 oranlarında uçucu kül atığı kullanarak hazırlanmış karışımların basınç dayanımları araştırılmıştır. Çalışma neticesinde tek eksenli serbest basınç dayanımlarında en yüksek sonuçların %25 oranında kullanılan uçucu kül atık maddeleriyle yapılan karışımdan elde edildiği tespit edilmiş ve tez kapsamında da elde edilen bu veriler ışığında uçucu kül oranı kabul edilmiştir. Uçucu külün zemin stabilizasyonu çalışmalarında katkı maddesi olarak tek başına kullanılmasının yanı sıra; fosfojips (Değirmenci, Okucu, & Turabi, 2007), kireç (Ghosh, & Subbarao, 2007; Zha, Liu, Du, & Cui, 2008), çimento gibi katkılarla beraber kullanıldığı çalışmalar literatürde mevcuttur.

Uçucu kül, desülfocips ve kireç kullanımıyla şişen zeminlerde, plastisite indisi, PL, LL gibi limitler ile ilgili zemin parametreleri üzerine oluşan etkilere dair çalışmalar bulunmaktadır (Çetiner, 2004). Uçucu kül miktarlarında kütlece artış yapıldığında dayanım değerlerinde düşüşler olduğu kanaatine varılmıştır. Değişik araştırma konularında bu konuya bakılmış ve benzer sonuçlar tespit edilmiştir (Özaydın, 1995). Uçucu kül ve kireç ile yapılan stabilizasyon yönteminin güvenilirliğini artıran en önemli unsurun zeminde amorf durumda bulunan silikat miktarı alüminat içeriği olduğunu tespit etmiştir (Alkaya, 2002).

Afşin-Elbistan santralinden alınan uçucu kül katkı maddesinin yolların stabilizasyonunda değişik malzemeler ile bir arada kullanılması şeklinde bir çalışma yapmıştır (Alataş, 1996).Yine benzer bir çalışmada Afşin-Elbistan termik santralinin uçucu külünün zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini ve bununla beraber dünya ekonomisi ve ekolojinin kontrol altına alındığını tespit etmişlerdir (Aytekin, 2009).

İyileştirmede Kemberburgaz kiline (LL=%40, w=%19.3, Ip=21.6) %20 uçucu kül katkı maddesi ilavesiyle, mukavemetleri üzerindeki etkiler araştırılmış ve üç eksenli serbest basınç dayanımlarında ilk günden itibaren kayma mukavemeti dirençlerinde kayda değer artışların meydana geldiği gözlemlenmiştir (Tan, & İyisan, 1996).

Zemin-çimento ve zemin-kireç karışımı kullanılarak yol temel tabakasında F sınıfı uçucu kül ile stabilizasyonu araştırılmış, zemin-katkı karışımları üzerine serbest basınç, Kaliforniya taşıma oranı ve MR uygulamaları yapılmıştır (Arora, & Aydilek, 2005). Uçucu kül katkı çeşitlerinden olan F sınıfı uçucu küle çimentonun birlikte kullanılan stabilizasyonda zeminlere ait Kaliforniya taşıma oranları üzerinde, yeni ve 28 günlük kür sürelerinin etkileşimleri üzerinde incelemeler yapmışlardır (Cömert, Fırat, Yılmaz, & Sümer, 2005).

Kireç ve F sınıfı uçucu kütle hazırlanan karışımın elastik modülünün, katkısız uçucu kül değerine göre daha yüksek olması ve plastik deformasyonunda oldukça düşüşler olduğu gözlenmiştir (Lee, & Fishman, 1993). C sınıfı uçucu kül ile farklı oranlarda değişik iki tip kille karıştırmış ve bu karışım oranlarının, killerin mühendislik özellikleri üzerine bir çalışma yapmışlardır (Yılmaz, Özsoy, & Çetin, 2008).

Uçucu küle ait fiziksel özellikleri Tablo 8’de, reaksiyonlar için barındırması gereken fiziksel değerler Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 8. Uçucu Küle Ait Fiziksel Özellikler (Gücek, 2011)

Çap (Mikron)	Renk	Şekil	Yoğunluk(g/cm ³)	İncelik
1 – 200	Gri	Yuvarlak	2.2 - 2.7	Yaklaşık çimento inceliğinde

Tablo 9. Uçucu Küllerin Barındırması Zaruri Olan Fiziksel Ölçütler (Çalık, 2012)

	ASTM C 618 (2002)		TS 639
	F sınıfı	C sınıfı	(1975)
İncelik:			
45 mikron göz açıklıklı kalan miktar, maks. %	34	34	-
Özgül yüzey, min. mm ² /g	-	-	300000
Dayanım aktivite indeksi:			
28. gün, min. %	75	75	70
Su ihtiyacı:			
Kontrol numunesine kıyasla, maks. %	105	105	-

Zemin stabilizasyonu uygulamasında kullanılan uçucu küllerin niteliğini barındırdığı maddelerin miktarları, incelikleri ve kimyasal özellikleri etkilemektedir. Zeminin yüzeyinde yapılan iyileştirme çalışmaları kapsamında çimento ve kireç katkı maddeleri dışında bu farklı uygulamalarda kullanmak için seçim olarak iyi bir katkı maddesi olduğu söylenebilir. Genel anlamda şişme ve taşıma gücü problemi bulunan zeminler için uygulanır. Zemin iyileştirme yöntemi çerçevesinde dayanımda artış sağlar, ekstra olarak kazıların ve dolguların oluşturduğu maliyetleri düşürür ve kapasite gücünü de artırdığından dolayı yapılacak dolgu kalınlığını azaltır. Ayrıca zemin iyileştirme yöntemlerinde zeminin durumuna göre çimento ya da kireçle beraber de kullanılması mümkündür (Çetin, 2011).

Mermer tozu ile zemin stabilizasyonu.

Mermer tozu atıkları, mermerlerin işlenmesi neticesinde ortaya çıkmış küçük boyutlu atıklardır. Blokların mermerlerin işlendiği tesislerde kesimleri sonrasında meydana gelen, genellikle boyutları 1mm'nin altında olan taneciklerdir. Mermer fabrikalarında mermerlerin işlenmesi ile hemen hemen %30 oranının toz şeklinde çıktığı görülmüştür (Yıldız, & Eskikaya, 1995). Mermerin çamurunun kullanılan mermerin %20'si civarındadır (Vijayalakshmi, Singh, & Bhatnagar, 2001). Dünya genelinde işlenen mermerlerden meydana gelen atık miktarı %41'dir Mermer işletmelerinde işlenen bu doğal taşların %30 civarlarında endüstriyel katı atık olarak meydana çıkması çevreye zarar vermekte ve ekonomik anlamda da kayıp olara ortaya çıkmaktadır (Onargan, & Köse, 1999). Aynı zamanda bu mermerler su ile kesilmesine rağmen çok fazla miktarda katı atık ortaya çıkmaktadır. Üretim süresince, genel olarak hammaddenin %25'i oranında katı atık meydana gelmektedir (Akdag, & Kırımhan, 1999).

Türkiye'de bulunan doğal taşların büyük oranda ve aynı zamanda farklı minerallere sahip yatakları olan doğal taşların görünür, bilinen ve kapasite açısından yaklaşık miktarı 5 milyon m³ civarındadır. Ülkemizde bulunan mermer madeni yaklaşık olarak 700 civarında olan maden sahasından çıkartılmakta ve bu işletmeler 120 civarında bulunan fabrikalar ile 1600 civarında ki atölyelerde işlenmektedir. Bu ocakların yaklaşık olarak %90 oranı batıda; başta Marmara, Ege taraflarında ve Afyon ilimizde bulunmaktadır. TMİB'nin yaptıkları araştırma sonucunda bölgelerimizde bulunan mermerlerin değişik renklerde ve dokulardaki şekillerine bakılmış, kimyasal özellikleri arasında tablo 10'da ifade edilen bileşiklerin bulunduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen bu veriler ışığında mermer yataklarında çeşitliliklerine göre, min. ve max. olduğu değerler Tablo 10'da sunulmuştur.

Tablo 10. *Ülkemizdeki Mermerlerin Genel Kimyasal Özellikleri*

Oksitler	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	CaCO ₃	MgCO ₃
(% min-max)	0,010-28,35	0,02-9,70	13,75-55,6	Eser-26,25	88,16	6,23

Gücek (2011) tarafından yapılan çalışmada killi bir zemine mermer atıkları ve uçucu kül atıklarının kullanımı araştırılmış ve serbest basınç dayanımını yükseltici etkisinin olduğu ve şişmesini azalttığı gözlenmiştir. Çalışmasının sonuçlarına bakıldığında optimum karışım oranının %10 olan mermerli ve %20 olan uçucu küllü atıkları ile yapılan numunelere ait olanlarda olduğu tespit edilmiştir.

Zorluer ve Usta (2003) taraflarınca deneylerinde 2 çeşit karışım için standart kompaksiyon ve 5 farklı katkı miktarları ile (% 0, 1, 3, 5, 7) hazırlatılan numunelere şişme deneyi yapılmış ve her katkı oranına 1 günün sonunda ölçülen şişme yüzdesi sonuçlarının

ortalama değerleri alınmıştır. Mermer atıklarının katkı oranının arttırarak şişme yüzdesi verilerinde azalmalar olduğu tespit edilmiştir (Başer, & Çokca, 2010).

Yıldız (2008) tarafından yapılan çalışmada kullanılan %20 katkı oranında plastisite indisi değerlerinde azaltıcı ve kuru birim hacim ağırlıklarında ise artırıcı bir etki olarak kullanılabilirliği görölmüştür.

Taşpolat, Zorluer ve Koyuncu (2006) tarafından yapılan çalışmada numunelerdeki mermer tozu atıklarının miktarının arttırılması ile hazırlanan karışımlara ait numunelerde donma ve özölme mukavemetleri de artmıştır. Bu bağlamda %5 oranında kullanılan mermer atıkları malzemesi donma/özölme testlerinde bir sonuç vermemetedir. %15 mermer tozu katkısı ile donma ve özölme sonucunda %12,5 ve %10 oranında kullanılan mermer tozu atıklarının eklenmesinde ise %13,5 dane kaybı olmuştur.

Usta (2004) tarafından yapılan çalışmada 4 farklı oranlarda mermer atıkları kullanılmıştır. Çalışma sonucunda kompaksiyon değerlerine göre katkı miktarında artış olması ile maksimum kuru yoğunluk değerinde de artışlar görölmüştür.

Huat, Mail ve Mohamed (2005) yapmış oldukları araştırmada farklı oranlarda karıştırılan katkılarla hazırlanmış numunelerde artan katkı oranlarında olumlu verilere ulaşılmıştır.

Terzi ve Karaşahin (2007) tarafından yapılan çalışmada yollarda asfaltla beraber mermerin bir arada kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Cömert *vd.* (2010) yapmış oldukları faaliyetlerde malzeme olarak mermer, kum ve uçucu külleri kullanmış olup mukavemet değerleri açısından en iyi değerlerin kum için %5 katkılı, uçucu küller için %20 oranını ve mermer için %10 oranının en ideal olduğunu görölmüştür.

Bayburt taşı ile zemin stabilizasyonu.

Bayburt Taşı genel olarak Bayburt bölgesinde bulunan ve genellikle tüf veya tüfit taş sınıfında yer almaktadır. Kimyevi özellikleri bakımından büyük oranlarda Silisyum içermektedir. Burada silissi yapıyı oluşturan zeolit mineralleridir. Bayburt Taşı, kullanım alanı olarak genellikle dış duvarların kaplanmasında, denizliklerde ve yüzeylerin kaplamaları dışında restorasyonlarda, köprü yapılarında, camilerin ve çeşmeler gibi sanat yapılarında kullanılmaktadır.

Bayburt ilindeki Bayburt taşı rezervinin yaklaşık olarak 2,5 milyon ton görünür rezerv olduğu MTA'nın araştırması sonucunda ifade edilmiştir. Bayburt taşı, yeşil, sarı ve beyaz renk olarak 3 çeşidi bulunmaktadır. Bayburt taşının işlenmesi aşamalarının teknolojik yöntemlere geçilememesi nedeniyle %70 oranlarda verim kayıpları meydana gelmektedir. Meydana gelen verim kaybı atık oranını arttırarak tarım yapılan arazileri ve havanın kirlenmesiyle çevrede olumsuzluklara sebebiyet vermektedir. Bayburt taşı işlenmesi sonucunda miktarı artan bu atıkların alansal olarak sığmama problemlerini de meydana getirecektir (Öksüzer, 2016).

Yurdagül, Kamiloğlu ve Tekin (2012) tarafından yapılan çalışmada, toz haldeki Bayburt taşının sönmüş kireçle beraber yolun altına serilecek iyileştirme malzemeleri şeklinde kullanılabilirliğini çalışmışlardır. Çalışma kapsamında belirli oranlarda Bayburt taşı yol altı temel malzemesi olarak kullanılan kil-kireç karışımlarına ek olarak karıştırmışlardır. Deney kapsamında malzemelerin optimum su muhtevalarını belirleyerek standart zemin deneyleri ile analiz işlemleri yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda kesme dayanımı ve serbest basınç dayanım testleri de yapılmıştır. Elde edilen verilere göre Bayburt Taşının değişik oranlarında yapılan karışımlarda %10 oranına dek kesme kutusu ve tek eksenli basınç dayanımlarında artışlar meydana gelmiştir.

Yüksek plastisiteye sahip olan zeminin iyileştirme çalışmalarına konu olan yeşil, beyaz ve sarı renkte olan Bayburt Taşları yüzde yirmi oranlarına kadar zemin ile birlikte kullanılmış ve bu karışımlara kireç katkısız ve %6 kireç katkısı kullanarak numuneler yapılmıştır. Yapılan bu karışımların davranış ve dayanım gibi özellikleri üzerinde çalışılmıştır. Kireç ile birlikte Bayburt yeşil taşının zemin stabilizasyonunda kullanılması durumunda mukavemet değerlerinde yaklaşık 13 kat artırdığı görülmüştür (Yılmaz, 2015).

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

Deneyel Çalışmalar

Tez çalışmasının kapsamında, Bayburt Taşı ve mermer tozu atıklarının uçucu külle birlikte zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Hazırlanan karışımların geoteknik özelliklerinin belirlenmesi, numunelerin yapım aşamaları, notasyonları ve yapılan deneylere ait bilgiler bu bölümde verilecektir.

Materyal

Yüksek lisans çalışmasında yapılan deneylerde kullanılan materyaller; doğal zemin, uçucu kül, Bayburt taşı atıkları ve mermer tozudur. Doğal zemin, Bayburt il merkezinden temin edilmiş olup zemin yüzeyinden ortalama 2 m derinliklerinden alınmıştır. Doğal zemin, Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'nda muhafaza edilmiştir. Deney çalışmalarına başlamadan doğal zemin 1 gün etüv içerisinde kurutulmaya bırakılmış ve kurutma sonrasında deney numuneleri hazırlanmaya başlanmıştır. Bayburt Taşı, Bayburt Doğal Taş Fabrikasından ve mermer tozu katkısı Elazığ ilinde bulunan Elmersan firmasından temin edilmiştir. Deney numuneleri, doğal zemin, uçucu kül, Bayburt Taşı ve mermer tozu katkıları kullanılarak hazırlanmıştır. Deney numunelerine ait notasyonlar Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11. *Deneylerin Numunelerine Ait Notasyon Bilgileri*

Deneylere ait numunelerinin karışım oranları	Notasyonlar
Doğal zemin	S
Zemin ve %25 uçucu kül	SFA
Zemin, %25 uçucu kül ve Bayburt taşı	SFABS
Zemin, %25 uçucu kül ve mermer tozu	SFAMP
Zemin, %25 uçucu kül ve %5 Bayburt taşı	SFABS5
Zemin, %25 uçucu kül ve %10 Bayburt taşı	SFABS10
Zemin, %25 uçucu kül ve %15 Bayburt taşı	SFABS15
Zemin, %25 uçucu kül ve %20 Bayburt taşı	SFABS20
Zemin, %25 uçucu kül ve %5 mermer tozu	SFAMP5
Zemin, %25 uçucu kül ve %10 mermer tozu	SFAMP10
Zemin, %25 uçucu kül ve %15 mermer tozu	SFAMP15
Zemin, %25 uçucu kül ve %20 mermer tozu	SFAMP20

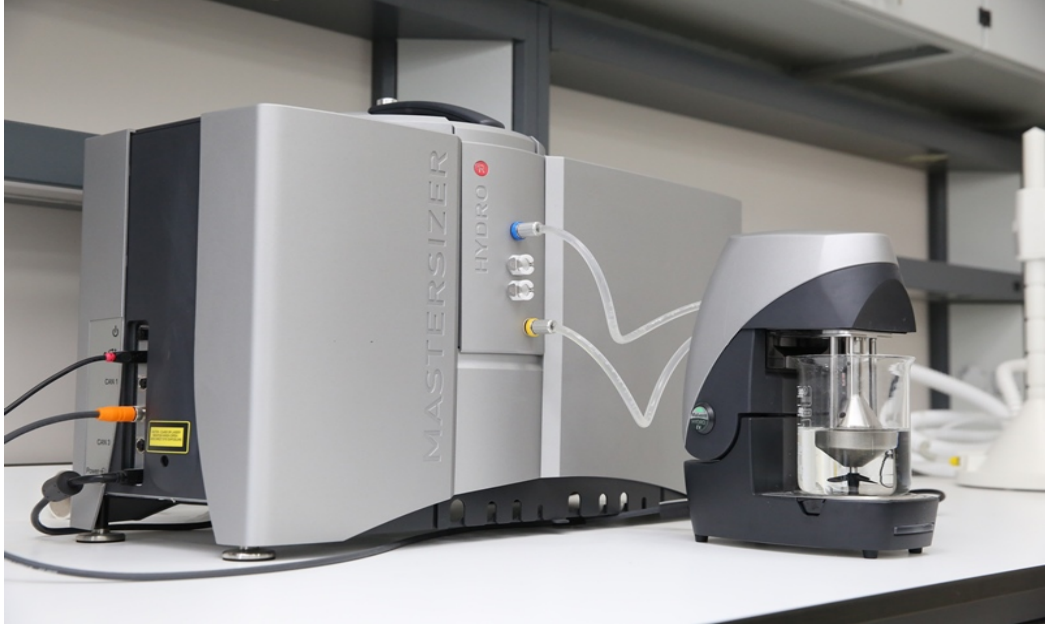
Doğal malzeme.

Deney kapsamında kullanılan doğal zemin, Bayburt il merkezindeki 2 m derinliğe sahip bir araştırma çukurundan temin edilmiş olup geoteknik laboratuvarına getirilmiştir. Laboratuvarda tamamı kurutulmuş olup 4 No'lu elekten geçirilmiş ve stabilizasyon çalışması kapsamında kullanılmıştır.

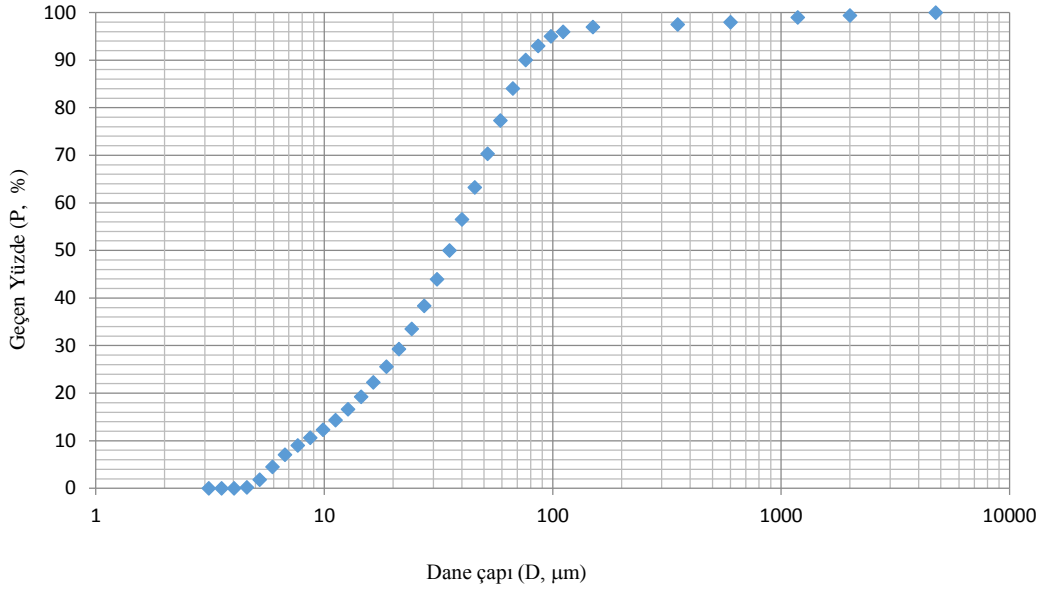
Çalışma kapsamında ilk olarak zeminin hangi sınıf zemin türü olduğunun belirlenmesi gereklidir. ASTM D 2487 standardına göre gerçekleştirilen deney sonuçlarına ve Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre zemin düşük plastisiteli kil (CL) şeklinde belirlenmiştir.

Doğal zemine ilk olarak ıslak elek analizi yapılmış ve aynı zamanda lazer kırınım yöntemi uygulanmıştır. Lazer kırınım yönteminde 200 nolu elek altında kalan malzemelerin dane büyüklüğün dağılımı ve kil yüzdeleri belirlenir. Bu yöntem diğer uygulamalara göre oldukça güvenilir sonuçlar verir. Killer genellikle levhamsı ve yapraksı şeklinde olup suyun içinde ağır ağır batarlar. Bu yöntemde örnek miktarının az olması, ölçüm süresinin kısa tutulması, deney sonuçlarının depolanabilmesi lazer kırınım yönteminin avantajları arasında yer alır (Özer, & Orhan, 2007).

Bayburt Üniversitesi Baberti Kampüsünde yer alan araştırma laboratuvarında ve araştırma merkezinde doğal zemine lazer kırınım deneyi yapılmıştır. Testin uygulandığı cihaz Lazer kırınım cihazı Şekil 5'te sunulmuş olup, doğal zeminin granülometri eğrisi Şekil 6'da yer almaktadır. Zemin mekaniği deneyleri sonucunda doğal malzemeye ait mühendislik özellikleri Tablo 12'de verilmiştir.



Şekil 5. Mastersizer 3000 lazer kırınım deney aleti.



Şekil 6. Doğal malzemeye ait dane boyutu dağılım grafiği.

Tablo 12. Doğal Malzemenin Özellikleri

Birleştirilmiş USCS sınıflandırması	CL
LL (%)	48,7
PL (%)	26,5
PI (%)	22,3
G_s	2,60
w_{opt} (%)	23,0
ρ_{kmaks} (Mg/m ³)	1,63
Rengi	Sarımttrak

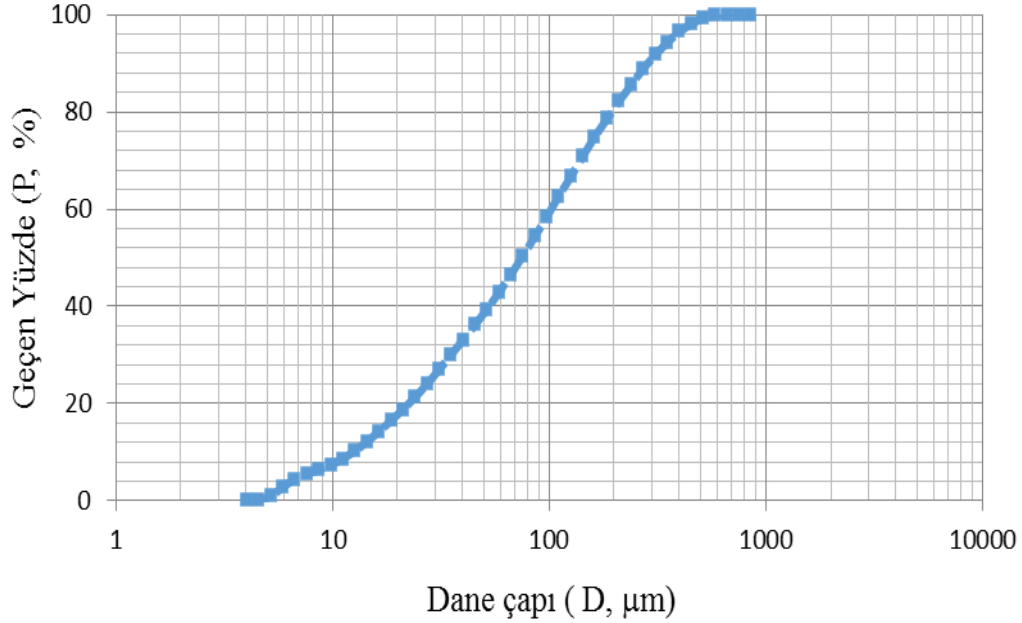
Yapılan araştırmalar sonucunda, organik malzeme miktarı %5'den çok olan zeminlerin kireçle iyileştirilmesi durumunda zeminde bulunan organik malzemelerin kimyasal tepkimeler üzerinde azaltıcı bir etki gösterdiği, ıslanma ve kuruma periyotlarında zeminin ufalandığı tespit edilmiştir (Arman, & Moonfish, 1972; Nelson, & Debora, 1992). Doğal zemine ait özellikleri Tablo 13'te verilmiş olan doğal zemine ASTM D 2974 standartlarına uygun şekilde Karadeniz Teknik Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Kimya Laboratuvarı'nda doğal malzeme analizi yapılmıştır. Alınan veriler incelendiğinde, doğal malzeme içerisinde bulunan organik malzeme oranının %4,7 seviyelerinde olduğu saptanmıştır.

Uçucu kül katkı malzemesi.

Deneyleerde kullanılan uçucu kül katkı maddesi Afşin-Elbistan termik santrali atıkları olarak elde edilen C sınıfı grubu uçucu küldür. Kullanılan uçucu küle ait yapısal özellikler Tablo 13'te, uçucu külün tane dağılımı Şekil 7'de sunulmuştur.

Tablo 13. Uçucu Külle Ait Fizikokimyasal Özellikler

Kimyasal Özellikler	
SiO ₂ (%)	23,08
Al ₂ O ₃ (%)	6,25
Fe ₂ O ₃ (%)	2,58
CaO (%)	47,03
MgO (%)	1,60
SO ₃ (%)	14,61
K ₂ O (%)	0,47
Na ₂ O (%)	0,32
Kızdırma Kaybı (%)	3,95
Cl (%)	0,0334
Fiziksel Özellikler	
45 µ elek üzeri (%)	4,0
Özgül Ağırlık(g/cm ³)	2,44
Blaine (cm ² /g)	2496
Puzolanik Aktivite	15,8



Şekil 7. Uçucu külün granulometri eğrisi.

Uçucu külün yapısında bulunan SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ miktarlarının ASTM C 618 standardına uygun olduğu görülmektedir. Yılmaz (2016) yapmış olduğu çalışma kapsamında düşük plastisiteli killi bir zeminde %0-5-10-15-20-25-30 oranlarında uçucu kül atığı kullanarak hazırlanmış karışımların basınç dayanımları araştırılmıştır. Çalışma neticesinde tek eksenli serbest basınç dayanımlarında en yüksek sonuçların %25 oranında kullanılan uçucu kül atık maddeleriyle yapılan karışımdan elde edildiği tespit edilmiş ve tez kapsamında da elde edilen bu veriler ışığında uçucu kül oranı kabul edilmiştir.

Bayburt taşı.

Deneyleer kapsamında kullanılacak olan Bayburt Taşı, bölge ekonomisi için oldukça önemlidir.

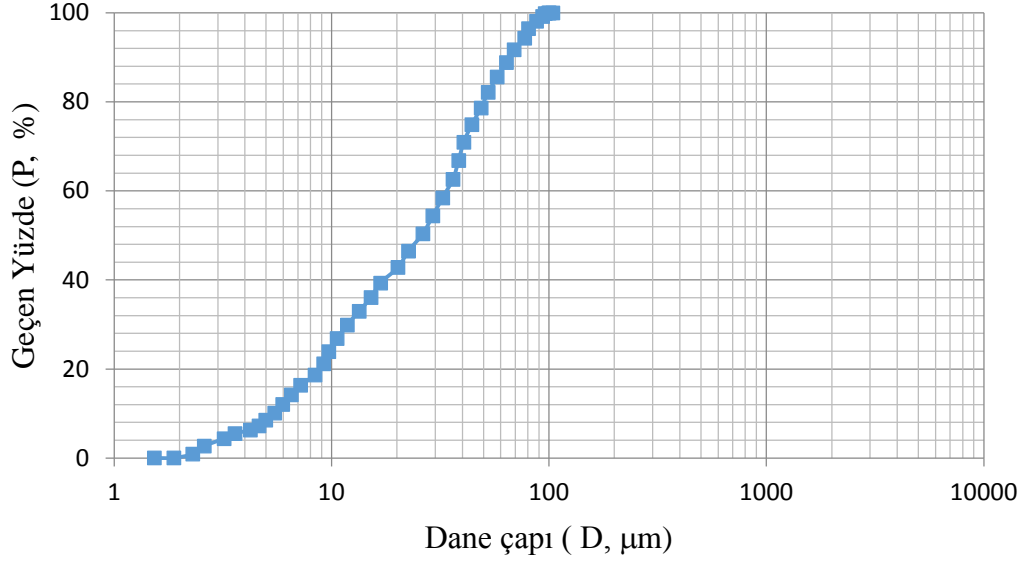
Maden aramaları üç farklı tipi bulunan Bayburt taşının bu bölgede yaklaşık 180 milyon m³ rezervinin bulunduğunu göstermiştir (Yılmaz, 2015). Bu taşlar çeşitli endüstriyel sektörlerde kullanılmakta ve taşların kesilmesi esnasında katı atıklar meydana gelmektedir. Stabilizasyon çalışmasında kullanılan katkının katı atık olması çevre geotekniği ve katı atık bertarafı açısından önem teşkil etmektedir.

Bayburt Taşı yapısal olarak tuf ve tüfit taşlar grubunda bulunmaktadır. Kimyasal bakımından oldukça fazla miktarda silis içermektedir. İçerdiği silisi yapı ise zeolit mineralleri tarafından oluşmaktadır. Bayburt taşının duvar kaplamalarında, restorasyon imalatlarında, köprü yapılarında, camilerde ve çeşme benzeri sanatsal yapılarda kullanım alanlarına sahiptir.

Bayburt taşının kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 14’de, granülometri eğrisi Şekil 8’de sunulmuştur.

Tablo 14. Bayburt Taşına Ait Kimyasal ve Fiziksel Özellikler (Yılmaz, 2015)

Kimyasal Özellikler	
Toplam SiO ₂ (%)	69,96
Al ₂ O ₃ (%)	12,25
Fe ₂ O ₃ (%)	0,33
CaO (%)	2,52
MgO (%)	1,20
SO ₃ (%)	0,05
K ₂ O (%)	2,43
Na ₂ O (%)	0,57
Kızdırma Kaybı (%)	10,08
Cl (%)	0,0280
Fiziksel Özellikler	
45 µ elek üzeri (%)	7,0
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,31
Özgül yüzey alanı (cm ² /g)	7193
Puzolan Aktivasyonu	8,8



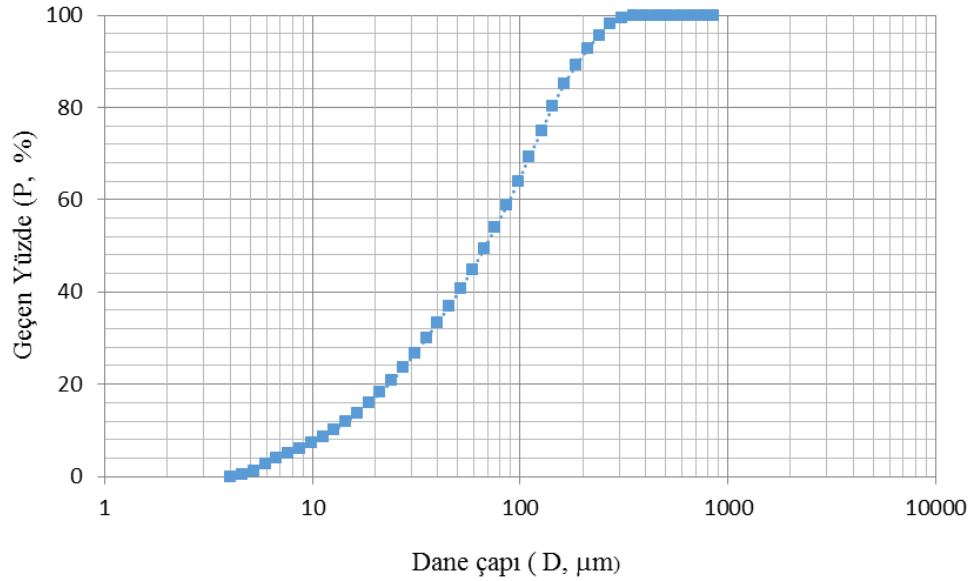
Şekil 8. Bayburt taşı atıklarının granülometri eğrisi.

Mermer tozu.

Çalışma kapsamında kullanılan mermer tozu atıkları için lazer kırınım yöntemi kullanılarak dane boyutu belirlenmiştir. Mermer tozu katı atık maddelerinin kimyasal ve fiziksel analizleri Tablo 15’de, granülometri eğrisi Şekil 9’da verilmiştir.

Tablo 15. Mermer Tozu Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri (Gücek, 2011)

Kimyasal Özellikler	
Toplam SiO ₂ (%)	8,5
Al ₂ O ₃ (%)	3,72
Fe ₂ O ₃ (%)	0,40
CaO (%)	54,59
MgO (%)	0,30
SO ₃ (%)	0,09
K ₂ O (%)	0,0
Na ₂ O (%)	0,0
Kızdırma Kaybı (%)	43,4
Cl (%)	0,03
Fiziksel Özellikler	
45 μ elek üzeri (%)	39,5
ÖzgülAğırlık(g/cm ³)	3,6
Blaine (cm ² /g)	6700
Puzolanik Aktivite	0,0



Şekil 9. Mermer tozuna ait dane boyutu dağılım eğrisi.

Yöntemler

Bu kısımda teze konu olan deneylerin dayandırıldığı standartlar ve çalışmadaki metotlar hakkında bilgiler ifade edilmiştir.

Deneylerde referans alınan ASTM standartları.

Yüksek lisans çalışması çerçevesinde yapılan deneylerde ASTM standartları referans alınmış olup, bu standartlar Tablo 16'da sunulmuştur.

Tablo 16. Deneylerle İlgili ASTM Ölçütleri

Deneyin adı	Standart
Elek analizi	ASTM D 422 (2007)
Organik madde tayini	ASTM D 2974 (2007)
Özgül ağırlık deneyi	ASTM D 854 (2010)
Kıvam limitlerinin belirlenmesi	ASTM D 4318 (2010)
Standart kompaksiyon deneyi	ASTM D 698 (2007)
Serbest basınç deneyi	ASTM D 2166 (2006)
Donma çözülme deneyi	ASTM D 560 (1996)
Durabilite testi	ASTM D 559 (2003)

Zeminin sınıflandırılması.

Çalışma kapsamında kullanılan zeminin hangi zemin sınıfına ait olduğunu belirlemek amacı ile elek analizi yapılmıştır. İnce taneli zemin oranının daha fazla çıkması nedeni ile yıkamalı elek analizi yöntemi kullanılmıştır. 200 No'lu elek altı malzemeye lazer kırınım

yöntemi uygulanmıştır ve Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre zemin CL olarak belirlenmiştir.

Kıvam limitleri.

Zeminlerde likit ve plastik limit değerlerinin bulunması adına ilk olarak Atterberg tarafından araştırma yapılmıştır. Atterberg, killerin plastisite özelliklerini yitirdiği su muhtevasını plastik limit olarak nitelendirirken, likit limit için ise viskoz akmanın alt sınırı olan su muhtevası olarak tanımlama yapmıştır (Atterberg, 1911).

Tez çalışması kapsamında likit limit deneyi için koni penetrasyon yöntemi kullanılmıştır. Yöntem dahilinde alette bulunan konik ucun 5 sn süre sonucunda kap içerisinde hazırlanan karışıma 20 mm batması sonucunda elde edilen su muhtevası, zemine ait likit limit değerini belirtmektedir. 40 nolu elekten elenen doğal zemine belirli oranlarda su eklenir. Deneye az su miktarlarından zeminin akıcı olabileceği su miktarına artış yapılarak devam edilir. Deney için hazırlanan karışım spatula yardımı ile metal kaba konulup zeminin üst kısmı aynı seviyeye getirilir. Konik uç kısmı zemine temas etmeyecek şekilde indirilir. Alette bulunan dijital saat sıfırlanır ve deney başlatılır. 5 saniye sonunda dijital saatte ölçülen değer okunur. Ardından konik uç kaldırılıp kabın içerisinden, koninin battığı noktanın oluşturduğu çöken kısımdan malzeme alınır ve kap boş ağırlığı alınan kaba konur ve tartım işlemi yapılır. Tartım işleminden sonra zemin numunesini bulunduğu metal kap etüve konur. Bu işlem, su miktarında artış yaparak tekrarlanır. Tüm bu işlemlerin ardından elde edilen sonuçlara göre grafikler hazırlanır ve likit limit değerleri belirlenir. Likit limit değeri, koni penetrasyon yönteminde 20 mm batmaya karşılık gelen su muhtevası olarak tespit edilir.

Plastik limit deneyinde 40 numaralı elekten geçen ve çok az miktarda su eklenerek malzemenin avuç ayasıyla cam plaka üzerinde inceltmesiyle 3 mm'de ortaya çıkan kırılmalara denk gelen değerlerdir. Koni penetrasyon deney düzeneği ile etüv içerisine bırakılan malzemeler Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Koni penetrasyon deney düzeneği ile etüv içerisine bırakılan malzemeler.

Kompaksiyon deneyi.

Kompaksiyon zeminin tabakalar halinde serilmesi ve boşluk oranının azaltılmasıdır. Sıkıştırma ile zeminin mukavemetinin ve taşıma gücünün artması ile zeminde meydana gelecek oturmalar azaltılır (Fidan, 2016). Bu çalışmada kompaksiyon çeşitlerinden olan standart kompaksiyon deneyi kullanılmış olup pik noktasına karşılık gelecek su içeriğinin bulunması amaçlanmıştır.

Deney kapsamında doğal zemine belirli oranlarda su eklenerek karışım iyice karıştırılır. Hazırlanan bu karışım standartlara uygun bir şekilde silindir çelik kalıba 3 aşamada doldurulduktan sonra kademeli bir şekilde 25 kez tokmak yardımı ile sıkıştırma işlemi yapılır. Sıkıştırılan zemin kalıptan çıkarılır. Çıkarılan zeminden bir miktar malzeme alınır, tartılır, etüvde bekletilir ve daha sonra su içeriği hesaplanır. Elde edilen sonuçlara göre kompaksiyon parametrelerine ait grafikler oluşturulur. Karışımların optimum su içerikleri ve kuru birim hacim ağırlıkları tespit edilir. Şekil 11’de standart kompaksiyon testine ait yapım sıralaması sunulmuştur.

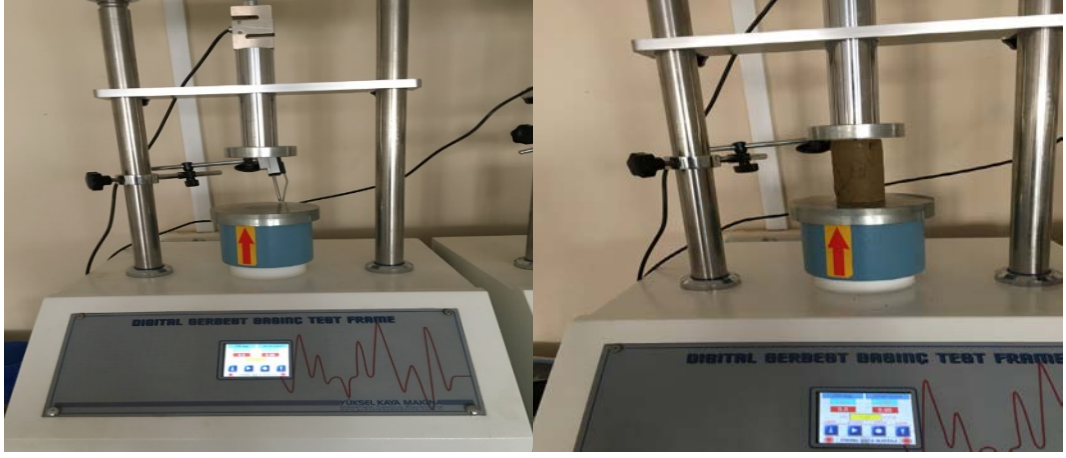


Şekil 11. Standart proktor deneyi yapım aşamaları.

Serbest basınç deneyi.

Serbest basınç deneyi killi zeminler için uygun bir yöntemdir. Bu deneyde, zemin numunesinde oluşan kırılmalar genellikle diyagonal bir düzlemde gerçekleşir. Çalışma kapsamında hazırlanan deney numuneleri 100 mm yüksekliğe, 50 mm çapa sahip silindirik numunelerdir. Hazırlanan karışımlar için 7, 28 ve 84 günlük kür süreleri belirlenmiştir.

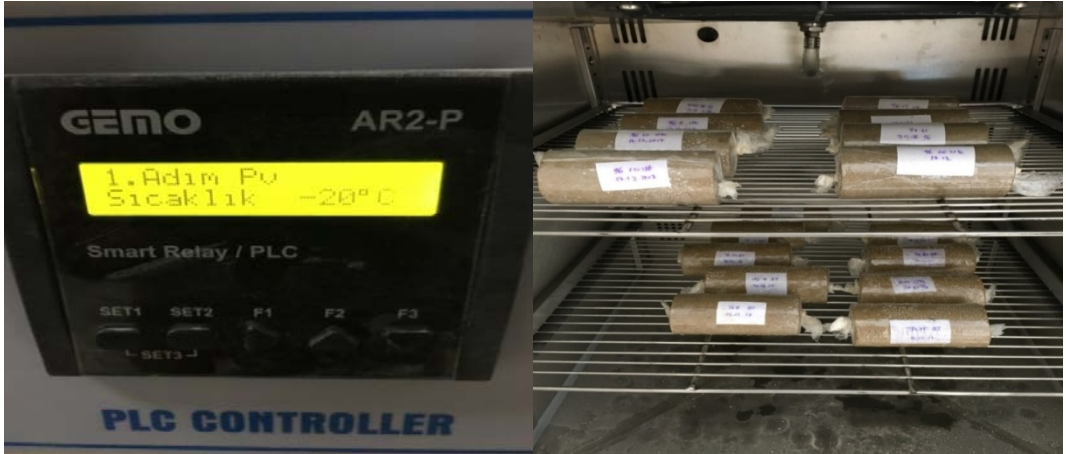
Karışımlar bu süreler boyunca desikatörde bekletildikten sonra, karışımlara tek eksenli serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Tek eksenli serbest basınç test düzeneği Şekil 12’de verilmektedir.



Şekil 12. Tek eksenli serbest basınç test düzeneği.

Donma-çözülme çevrimi.

Hazırlanan numunelerin değişen çevre şartlarında gösterdiği davranışları belirlemek, stabilizasyon çalışmalarının donma-çözülme çevrimlerinin yaşandığı yerlerde kullanımları açısından büyük bir önem taşır. Bu nedenle, ASTM D 560’a uygun olarak, numunelere donma-çözülme deneyleri yapılmıştır. Deneylerde ilgili standarda göre karışımlar 12 donma-çözülme çevrimine tabii tutulmuştur. Donma-çözülme çevriminin tamamlanmasıyla beraber numunelere dayanım testleri yapılmıştır. Donma-çözülme çevrimlerine ait görseller Şekil 13’te verilmiştir.



Şekil 13. Donma-çözülme çevrimi ve işlemleri.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

Araştırma Bulguları

Yüksek lisans tez çalışmasının konusu, Bayburt il merkezinden alınan doğal zemin malzemesinin uçucu kül, Bayburt taşı ve mermer tozu stabilizasyonudur. Uçucu külün zeminin dayanımına etkisiyle ilgili literatürde çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar ışığında zemine %25 uçucu kül katkısı katılmıştır. Ayrıca %5, 10, 15 ve %20 katkı miktarında Bayburt taşı ve mermer tozu katkıları eklenerek hazırlanan numuneler zemin mekaniği deneylerine tabii tutulmuşlardır. Bu bölümde yapılan deney verileri incelenerek tespit edilen sonuçlar detaylı şekilde anlatılmıştır.

Deneyleerde Alınan Veriler

Doğal zemine uçucu kül, Bayburt taşı ve mermer tozu katı atıkları ilavesiyle yapılan kimyasal stabilizasyonda deneysel çalışma kapsamı içerisinde likit limit, plastik limit ve plastisite indisi sonuçları belirlenmiştir. Hazırlanan numuneler için standart kompaksiyon testleri yapılmış ve optimum su içerikleri ve maksimum kuru yoğunlukları bulunmuştur. Belirlenen kür sürelerinin ardından tek eksenli serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Durabilite tetkikleri açısından, donma-çözülme deneyi sonuçlarından yararlanılmıştır.

Kıvam limitleri.

Çalışma konusu kapsamında yapılmış ve notasyonları daha önceden belirtilen karışımlara ait ASTM D 4318 (2010) standardı gereği yapılan kıvam limitleri deneylerinden alınan sonuçlar Tablo 17’de sunulmuştur.

Tablo 17. *Deney Numunelerine Ait Kıvam Limiti Verileri*

Karışımlar	LL(%)	PL(%)	PI(%)
S	48,8	26,5	22,3
SFA	42,7	33,0	9,7
SFABS5	43,9	32,0	11,9
SFABS10	43,0	31,0	12,0
SFABS15	42,4	30,0	12,4
SFABS20	42,0	30,0	12,0
SFAMP5	42,3	32,0	10,3
SFAMP10	42,5	31,0	11,5
SFAMP15	42,7	32,0	10,7
SFAMP20	43,2	34,0	9,3

Kıvam limitleri deneyleri, karışımların hazırlanmasının ardından yapılmıştır. S karışımının LL ve PI sonuçları diğer karışımlara kıyasla yüksek bir değerde çıkmıştır. Doğal zemine ait plastik limit değeri de numunelere bakıldığında oldukça düşük bir sonucun ortaya çıktığı tespit edilmiştir.

Doğal malzemeye %25 uçucu kül ilavesi yapılarak hazırlanan SFA karışımı zemin numunesine kıyaslandığında, LL ve PI değerlerinde S karışımına göre düşüşler ortaya çıktığı görülmüştür.

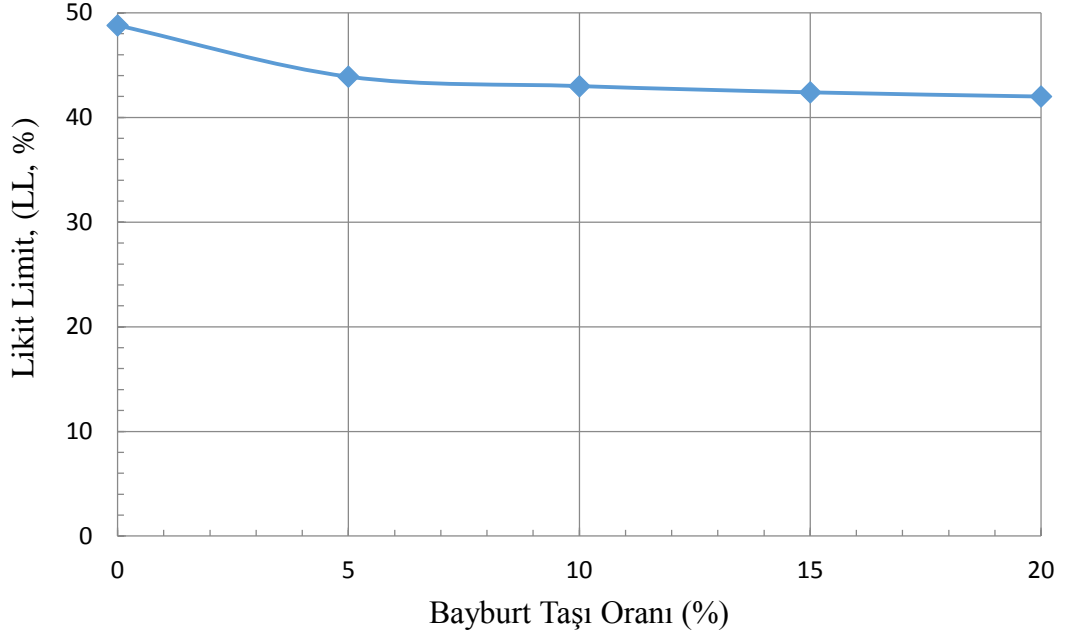
SFABS karışımlarının likit limit değerlerinin SFA karışımının likit limit değerinden kısmen daha yüksek olduğu ve SFAMP karışımlarının likit limit değerlerinin SFA karışımının likit limit değeri ile oldukça yakın olduğu belirlenmiştir

SFABS karışımlarına ait likit limit değerlerinde artan Bayburt taşı oranında LL verilerinde azalmaların meydana geldiği gözlenmiştir. SFABS karışımlarının SFAMP karışımlarına göre daha yüksek likit limit değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Likit limit değerinin en düşük olduğu değer Bayburt taşının %20 oranında kullanıldığı SFABS/20 olduğu tespit edilmiştir.

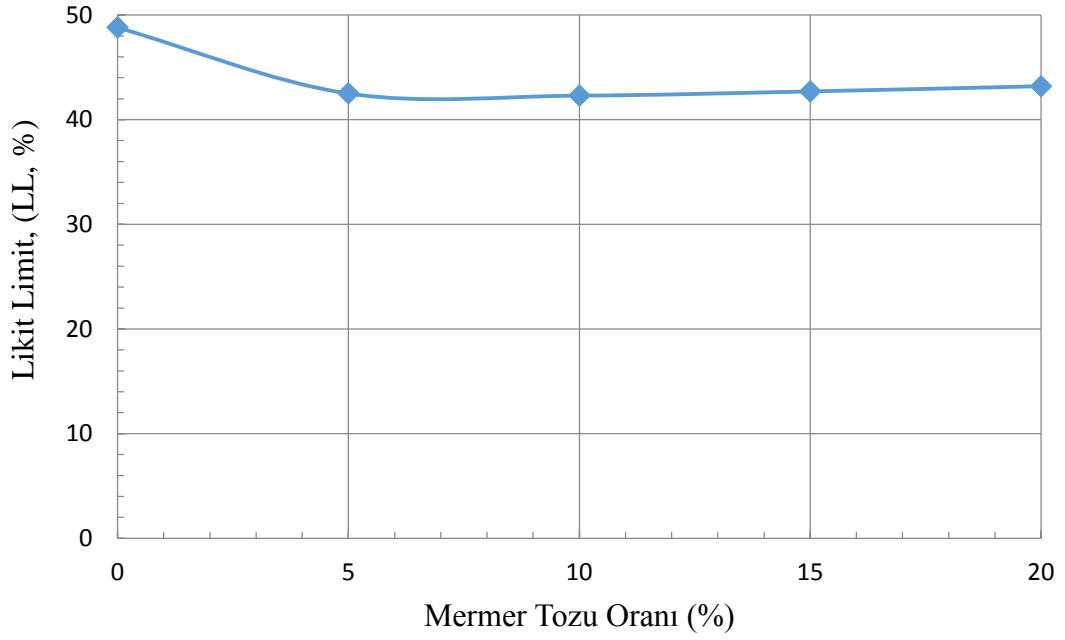
SFA karışımının doğal zemin numunesine göre plastik limit değerinde artış görülmüştür. Artan Bayburt taşı oranındaki SFABS karışımlarına ait plastik limit değerlerinde düşüşler meydana gelirken SFAMP karışımlarında ise düzensiz bir davranış söz konusudur.

Doğal zemine göre SFA karışımının plastisite indisi değerinde azalma meydana gelmiştir. Artan Bayburt taşı ve mermer tozu oranındaki SFABS ve SFAMP karışımlarına ait plastisite indisi değerlerinde düzensiz bir davranış söz konusudur.

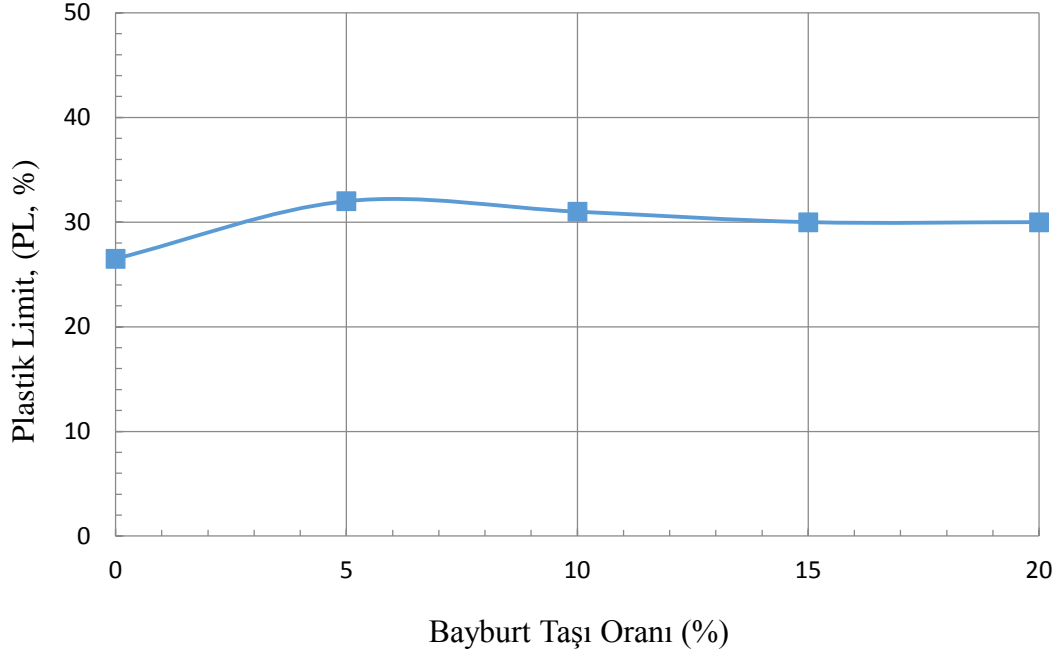
Karışımların likit limit değerlerinin belirlenmesinde kullanılan koni penetrasyon deneyi verileri EK-1'de sunulmuştur. SFABS ve SFAMP'ye ait LL, PI ve PL grafikleri Şekil 14, Şekil 15, Şekil 16, Şekil 17, Şekil 18, Şekil 19'da sunulmuştur.



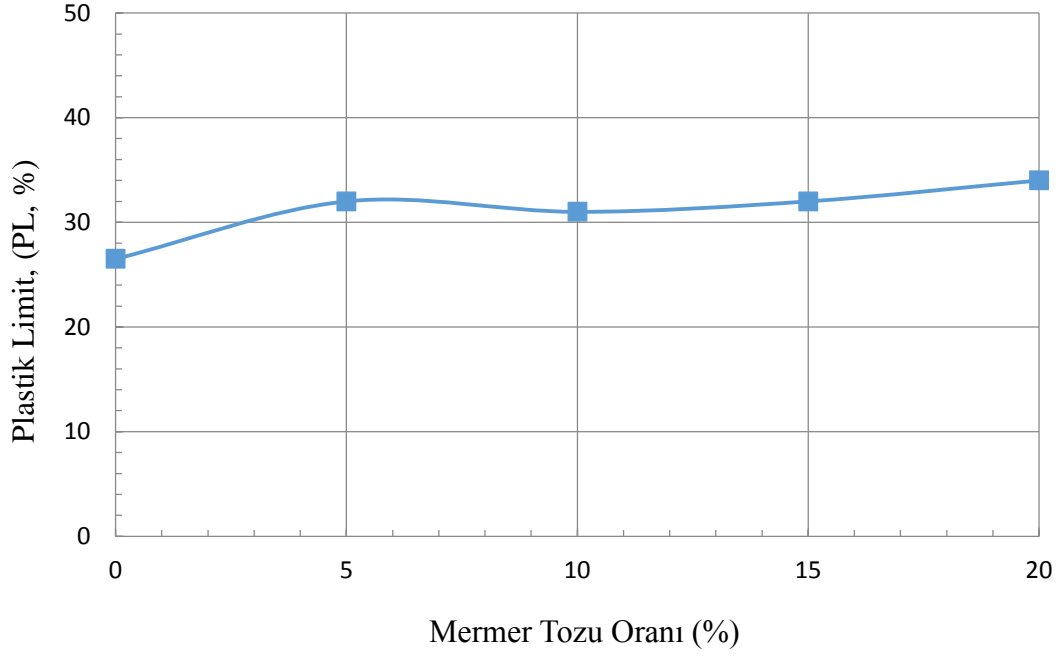
Şekil 14. SFABS karışımlarına ait likit limit değerleri.



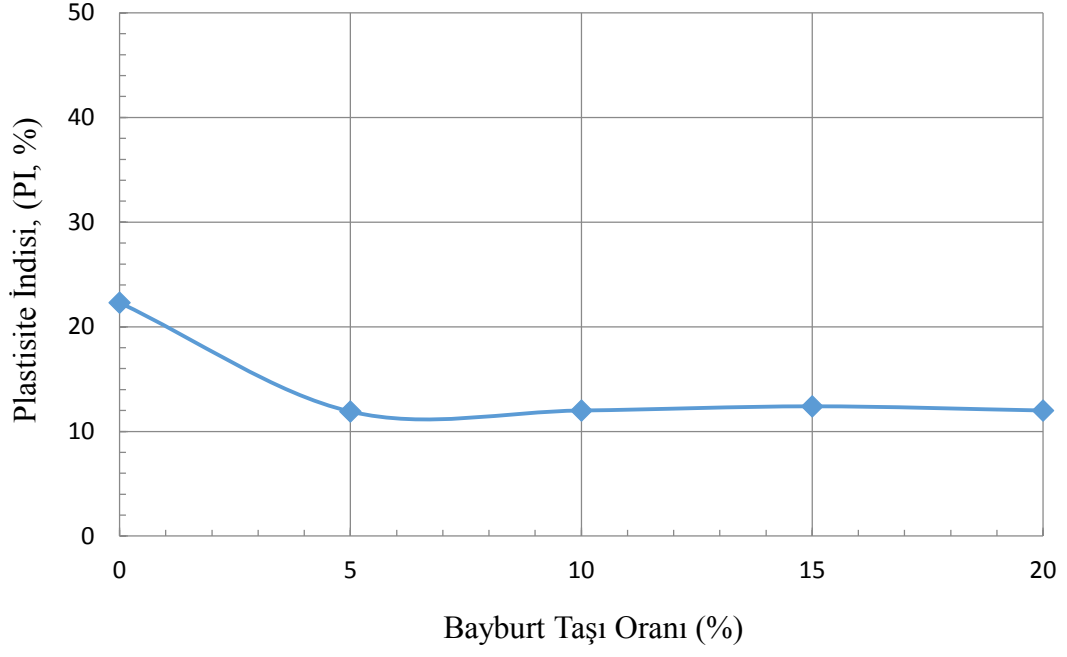
Şekil 15. SFAMP karışımlarına ait likit limit değerleri.



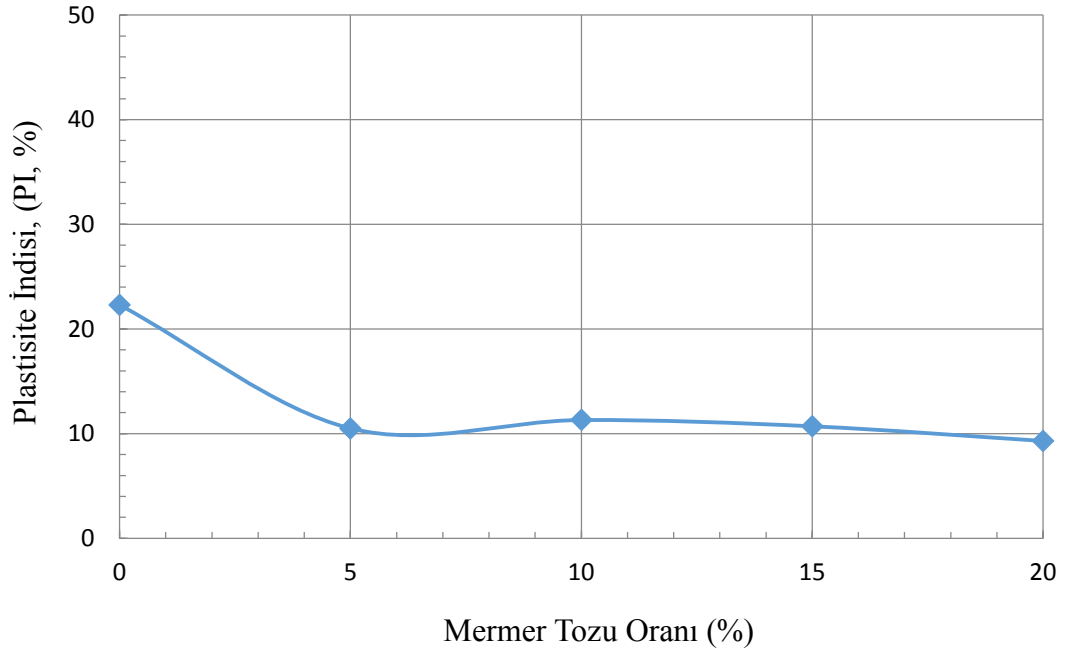
Şekil 16. SFABS karışımlarına ait plastik limit değerleri.



Şekil 17. SFAMP karışımlarına ait plastik limit değerleri.



Şekil 18. SFABS karışımlarına ait plastisite indisi değerleri.



Şekil 19. SFAMP karışımlarına ait plastisite indisi değerleri.

Kompaksiyon parametreleri.

Yüksek lisans tez kapsamında notasyonları belirlenen toplamda 12 çeşit numune bulunmaktadır. Bayburt taşı ve mermer tozu oranı %5, %10, %15, %20 olan ve içerisinde %25 oranında uçucu kül bulunan karışımların kompaksiyonu yapılmış olup maksimum birim hacim ağırlıkları ve su içerikleri ASTM D 698 standardına uygun şekilde belirlenmiştir. Kompaksiyon deneyleri sonucunda bulunan kompaksiyon eğrilerine ait grafikler EK-2’de verilmiştir.

Kompaksiyon deneylerine öncelikle doğal zemin ve SFA karışımlarıyla başlanmıştır. SFABS karışımlarının kuru birim ağırlıkları ile su içeriklerine ait değerler Tablo 18’de sunulmuştur. SFAMP karışımlarının kuru birim ağırlıkları ile su içeriklerine ait değerler Tablo 19 vasıtasıyla gösterilmiştir.

Tablo 18. *SFABS Karışımları İçin Kompaksiyon Verileri*

Numune	Maksimum kuru yoğunluk, Mg/m ³	Optimum su içeriği, %
S	1,63	23,0
SFA	1,57	22,0
SFABS5	1,52	22,0
SFABS10	1,53	22,0
SFABS15	1,53	23,6
SFABS20	1,53	24,0

Tablo 19. *SFAMP Karışımları İçin Kompaksiyon Verileri*

Numune	Maksimum kuru yoğunluk, Mg/m ³	Optimum su içeriği, %
S	1,63	23,0
SFA	1,57	22,0
SFAMP5	1,54	23,0
SFAMP10	1,56	22,0
SFAMP15	1,60	21,0
SFAMP20	1,67	18,0

Doğal zemine sadece uçucu kül katılmasıyla elde edilen SFA numunelerine ait kompaksiyon deney sonuçlarına bakıldığında, optimum su muhtevası değerinin ve maksimum kuru ağırlığı değerinin doğal zemine göre düştüğü görülmüştür. Buna göre, doğal zemine %25 oranında uçucu kül katılmasıyla, maksimum kuru yoğunluk değerlerinin ve optimum su içeriklerinin azaldıkları tespit edilmiştir.

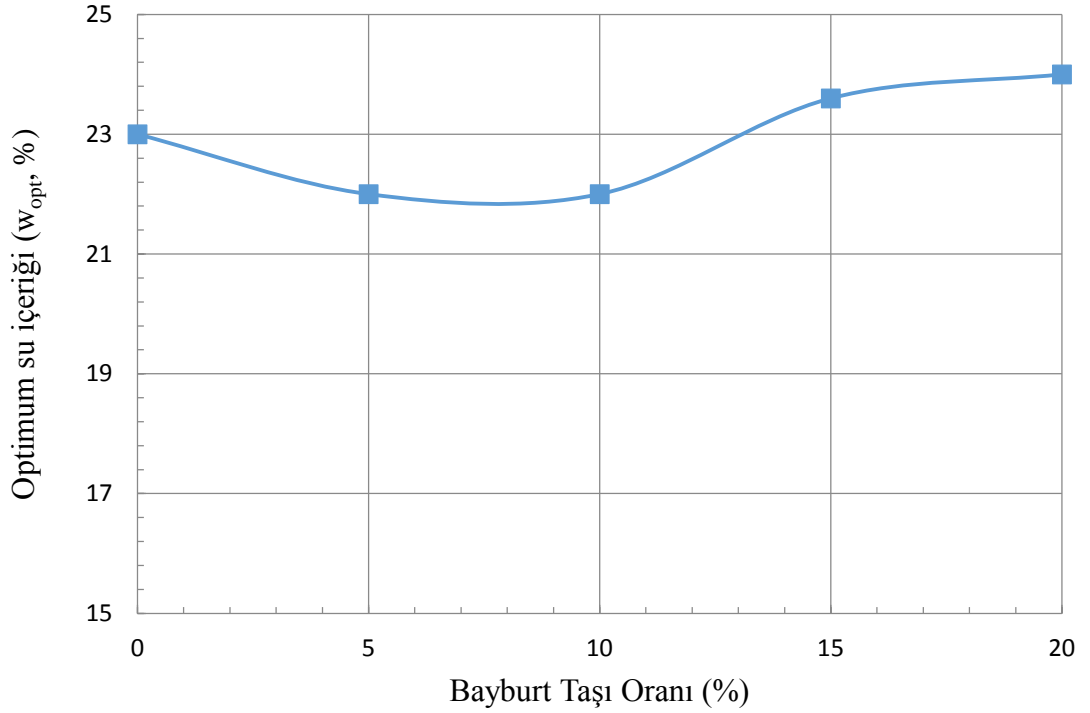
SFABS karışımlarının maksimum kuru yoğunluk değerleri SFA karışımına göre azalırken, optimum su muhteva değerlerinin de arttığı görülmüştür. Belirlenen katkı oranı ve

optimum oranda (%25) uçucu kül ile hazırlanan SFABS karışımlarından elde edilen örnek numunelerde maksimum kuru yoğunluk değerlerinde Bayburt taşı oranlarının artması sonucunda artış olduğu görülmektedir.

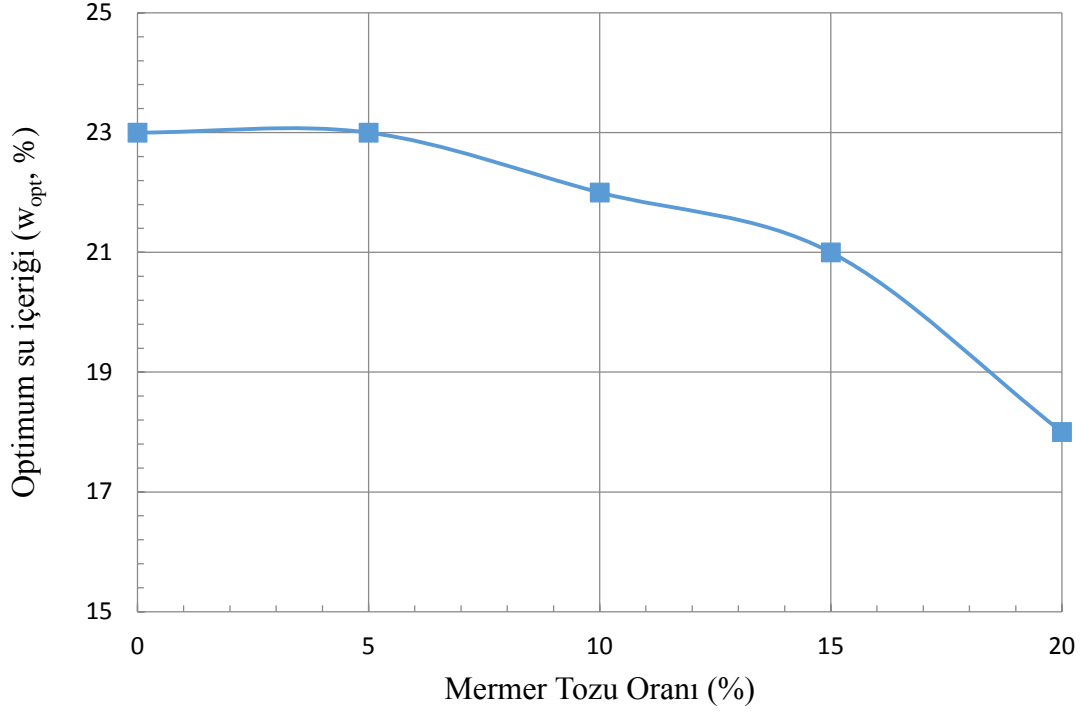
SFAMP karışımlarının maksimum kuru yoğunluk değerleri SFA karışımına göre artarken, optimum su içeriği değerlerinde ise azalmalar meydana gelmiştir. Hazırlanan numunelerde artan mermer tozu oranlarının sonucunda SFAMP karışımlarının maksimum kuru yoğunluk değerlerinde artış olduğu görülmektedir.

Genel anlamda katkı kullanılan numunelerde maksimum kuru birim ağırlık değerleri 1,52-1,67 Mg/m³ arasında değişmektedir. Optimum su içeriği değerleri ise %18-24 arasındadır.

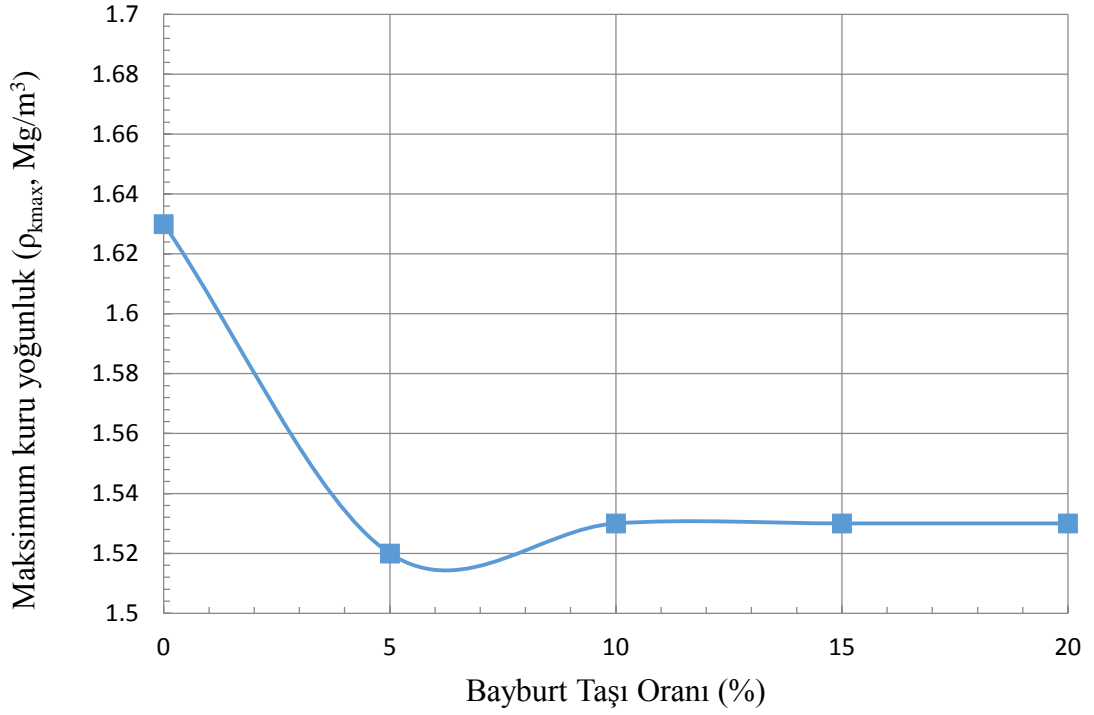
SFABS ve SFAMP karışımlarına ait optimum su içerik verileri Şekil 20'de ile Şekil 21'de sıralanmıştır. SFABS ve SFAMP karışımlarına ait maksimum kuru yoğunluk değerindeki değişim sonuçları da Şekil 22'de ve Şekil 23'te verilmiştir.



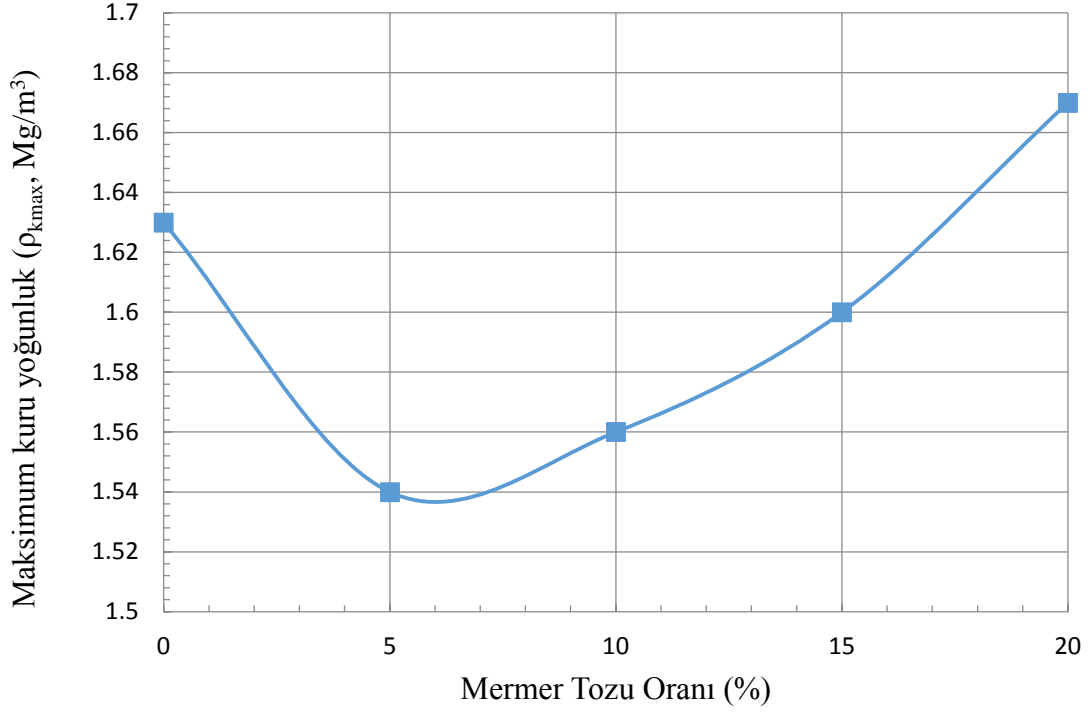
Şekil 20. SFABS karışımları için optimum su içerikleri.



Şekil 21. SFAMP karışımları için optimum su içerikleri.



Şekil 22. SFABS karışımlarının maksimum kuru yoğunluk değerleri.



Şekil 23. SFAMP karışımlarının maksimum kuru yoğunluk değerleri.

Serbest basınç dayanımları.

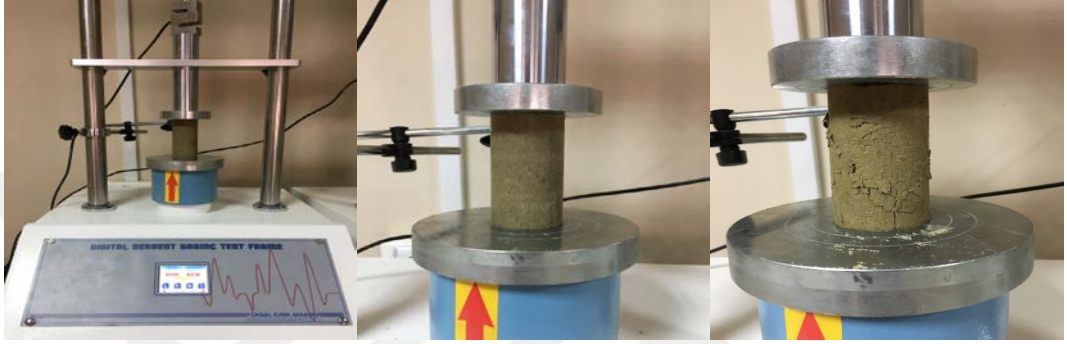
Çalışma kapsamında optimum su içeriği değerlerinin belirlendiği karışımların, mukavemet davranışlarını tayin etmek amacıyla serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma işlemleri kompaksiyon aleti ile yapılmıştır. 100 mm yüksekliğinde ve 50 mm çapında yapılan silindirik numunelerden 108 adet hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler daha önceden belirlenen 7, 28, 84 günlük kür süresine tabii tutulmuşlardır. Doğal zemine %25 uçucu kül ile Bayburt taşı ve mermer tozunun belirlenen oranlarında karıştırılması ile hazırlanan numunelerin dayanım davranışları irdelenmiştir. Bu kapsamda Şekil 24’te deney numunelerinin hazırlanış aşamaları, Şekil 25’te numunelerin desikatörde kür edilmesi ve Şekil 26’da numunelerin dayanımlarına bakıldığı test düzeneği verilmiştir.



Şekil 24. Deney numunelerinin hazırlanışı.



Şekil 25. Numunelerin desikatörde kür edilmesi.



Şekil 26. Tek eksenli serbest basınç dayanımların test düzeneği.

Serbest basınç dayanımlarına ilk olarak doğal zemin ile başlanmıştır. Bütün deneyler süresince zemine %25 uçucu kül ile Bayburt taşı ve mermer tozu %5, %10, %15 ve %20 oranlarında katılmışlardır. Tablo 20’de SFABS numunelerine ait 7 gün, 28 gün ve 84 günlük kür süresi sonucunda serbest basınç dayanımlarının tablosu sunulmuştur. Tablo 21’de SFAMP karışımlarına ait aynı sürelerin bitimindeki tek eksenli serbest basınç dayanımı verileri tespit edilmiştir.

Tablo 20. SFABS Karışımlarının Serbest Basınç Dayanımı Verileri

Numune	Tek Eksenli Serbest Basınç Dayanımı (kPa)		
	Kür Süresi		
	7.gün	28.gün	84.gün
S	159,42	170,71	189,91
SFA	545,46	847,55	1210,89
SFABS5	769,85	1100,00	1408,78
SFABS10	961,76	1280,98	1618,18
SFABS15	838,56	1147,35	1477,75
SFABS20	741,37	1062,50	1367,80

Tablo 21. SFAMP Karışımlarının Serbest Basınç Dayanımı Verileri

Numune	Tek Eksenli Serbest Basınç Dayanımı (kPa)		
	Kür Süresi		
	7.gün	28.gün	84.gün
S	159,42	170,71	189,91
SFA	545,46	847,55	1210,89
SFAMP5	1031,60	1564,00	1956,00
SFAMP10	1075,51	1821,80	2170,00
SFAMP15	980,25	1512,39	1870,35
SFAMP20	958,77	1102,93	1353,05

Tablo 21 ve Tablo 22 verileri incelendiğinde SFA karışımının doğal zemin numunesine göre basınç dayanımı sonuçlarında önemli derecede yükselmeler elde edildiği belirlenmiştir. SFA numunesinin serbest basınç değeri 84 günlük kür neticesinde zemine göre 6 kat artış göstermiştir. Buna göre ince taneli zeminler için uçucu kül katkı maddesi ile stabilizasyonda olumlu sonuçlar meydana geldiği görülmüştür. Nitekim literatür çalışmalarında da uçucu kül katkılı zeminlerin stabilizasyonda kullanılması sonucunda dayanım sonuçlarında olumlu etkilere ulaşılmıştır. Yılmaz (2016) tarafından yapılan çalışmada % 25 oranında hazırlanan uçucu kül katkılı karışımlarda en yüksek serbest basınç dayanımları tespit edilmiştir. Gücek (2011), yapmış olduğu stabilizasyon çalışmasında %10 mermer tozu ve %20 oranında uçucu kül katkılı karışımlarda en yüksek basınç dayanımlarını elde etmiştir. SFA, SFABS ve SFAMP karışımları ile hazırlanmış olan zemin numunelerinin kırılma şekilleri gevrek kırılma biçimindedir.

SFABS ve SFAMP karışımlarına ait numunelerin 7.gün sonundaki serbest basınç dayanımlarının SFA karışımlarına oranla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. SFABS ve SFAMP karışımlarının dayanım sonuçları incelendiğinde en yüksek serbest basınç dayanım değerlerinin %10 katkı oranlarında hazırlanan SFABS10 ve SFAMP10 karışımlarında edilmiştir. Artan katkı oranına göre %10 katkılı numunelere kadar dayanımlarda artışlar meydana gelirken bu oranın artırılması ile dayanımlarda düşüşler meydana gelmiştir.

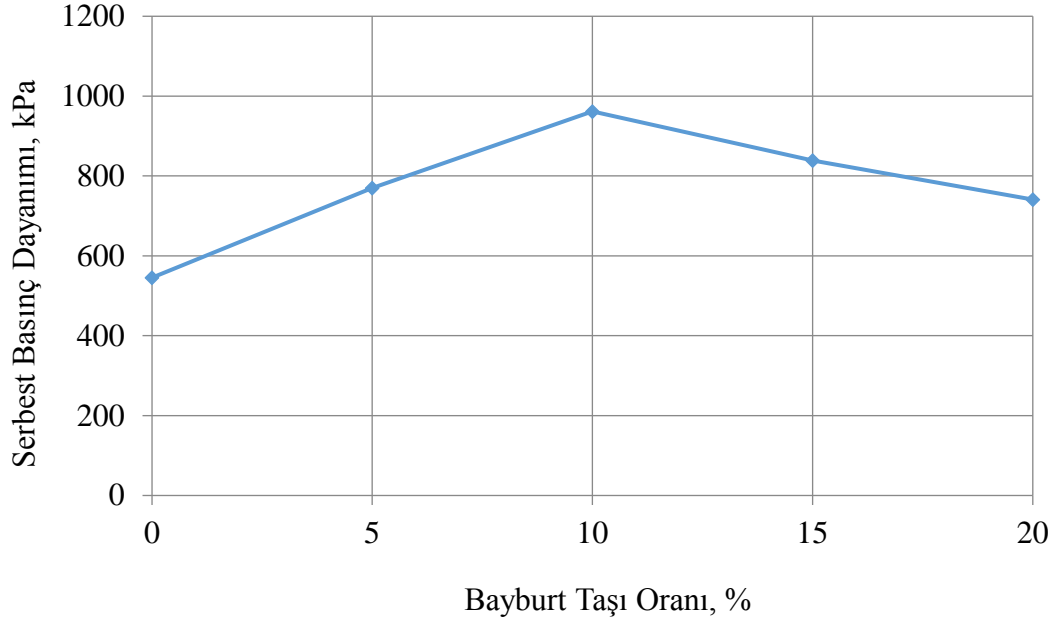
SFABS karışımlarının 28 gün kür sonrasındaki verileri incelendiğinde artan kür süresinin dayanım değerleri üzerinde pozitif sonuçlar verdiği görülmüştür. SFABS numuneleri arasında en yüksek mukavemet 1280,98 kPa değeri ile SFABS10 karışımından elde edilmiştir. Bu değer 847,55 olan SFA karışımına göre %51 oranında daha yüksektir. Tüm SFABS numuneleri SFA numunesinden ve dolayısıyla doğal zeminden daha yüksek dayanım göstermiştir.

SFAMP karışımlarının 28 gün kür süresi sonrasında verileri incelendiğinde en yüksek dayanım sonucunun SFAMP10 numunesine ait 1821,80 kPa olarak belirlenmiştir. Bu değer

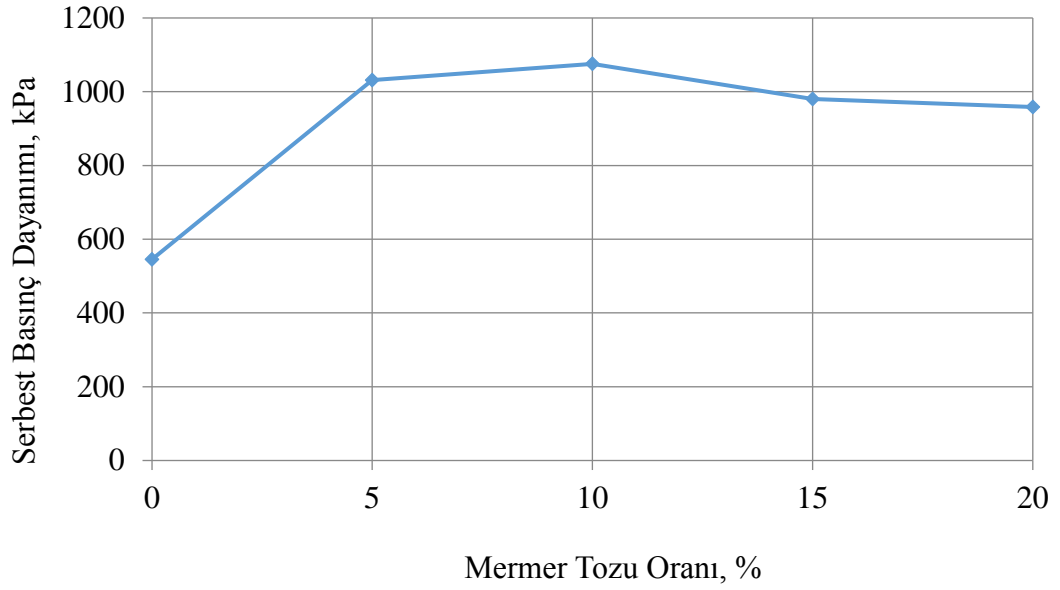
847,55 olan SFA karışımına göre %115 oranında dayanım artışı meydana gelmiştir. SFAMP karışımlarının tümü SFA ve doğal zemine göre oldukça yüksek dayanımlar elde edilmiştir. En yüksek dayanım sonucunun elde edildiği SFAMP10 karışımı SFABS10 karışımına göre yaklaşık %51 oranında daha fazla dayanım artışı sağlamıştır. %5 katkı oranı ile hazırlanan SFAMP5 karışımına ait dayanım sonucu en yüksek Bayburt taşı katkılı zemin numunesinden yaklaşık %25 oranında daha fazla basınç dayanımı değerine ulaşmıştır.

SFABS karışımlarına ait 84 gün kürde bekletildikten sonra dayanım sonuçlarına baktığımızda en yüksek serbest basınç dayanımının 1618,18 kPa olan SFABS/10 karışımları ile sağlandığı görülmüştür. Bu değer 1210,89 olan SFA numunesine göre %34 oranında daha yüksek dayanım sonucu elde edilmiştir. Tüm SFABS numuneleri, SFA numunesinden ve doğal zemin numunesinden daha fazla dayanım göstermiştir. 84 günlük kür sonucunda elde edilen verilere göre SFAMP karışımlarında en yüksek dayanım sonucunu 2170,0 kPa olan SFAMP10 karışımında elde edilmiştir. Bu dayanım sonucu çalışma kapsamında elde edilen en yüksek dayanım sonucudur. SFAMP numunelerinin tamamı SFA ve doğal zemin numunesinden daha fazla dayanım göstermiştir.

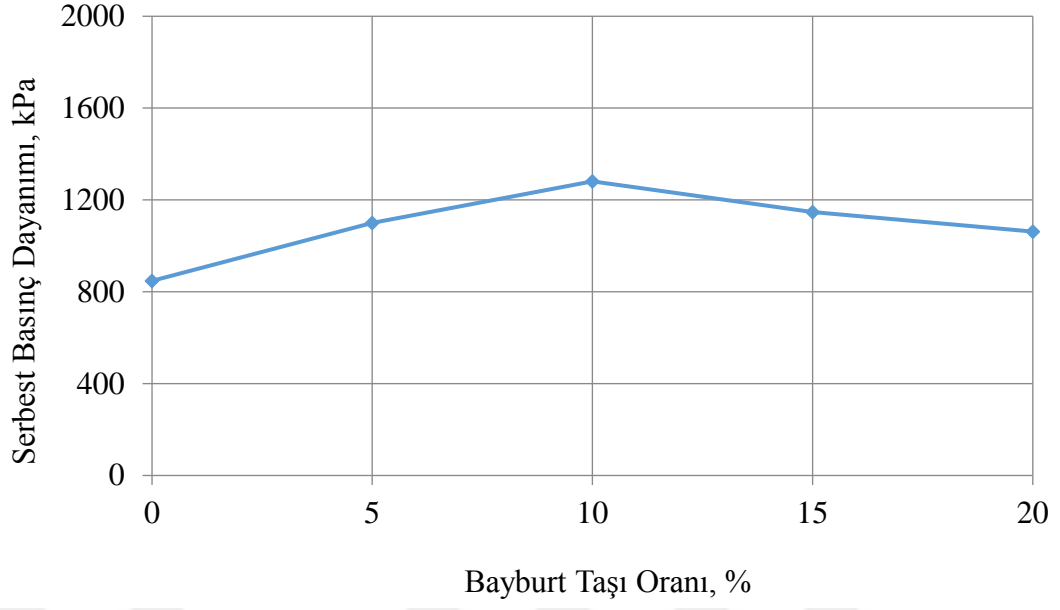
84 günlük kür sonrasında alınan tüm veriler incelendiğinde en iyi dayanım sonuçlarının SFABS karışımlarında SFABS10 numunesinde, SFAMP karışımlarında SFAMP10 numunesinden elde edilmiştir. Hazırlanan numunelerde mermer tozu atıklarının kullanıldığı karışımların SFABS karışımlarına göre daha yüksek dayanım sonuçları elde edilmiştir. Daha az katkı oranı ile hazırlanan SFAMP5 numunesi en yüksek dayanım sonucu veren Bayburt taşı karışımlarından daha iyi basınç dayanımı sonuçları verdiği görülmüştür. Hazırlanan numunelere ait Şekil 28, Şekil 29, Şekil 30, Şekil 31, Şekil 32 ve Şekil 33'te kür sürelerine bağlı olarak ayrı ayrı basınç dayanım verileri gösterilmiştir. Şekil 34, Şekil 35 ve Şekil 36'da verilen grafiklerde aynı kür sürelerine sahip olan karışımların karşılaştırılması verilmiştir.



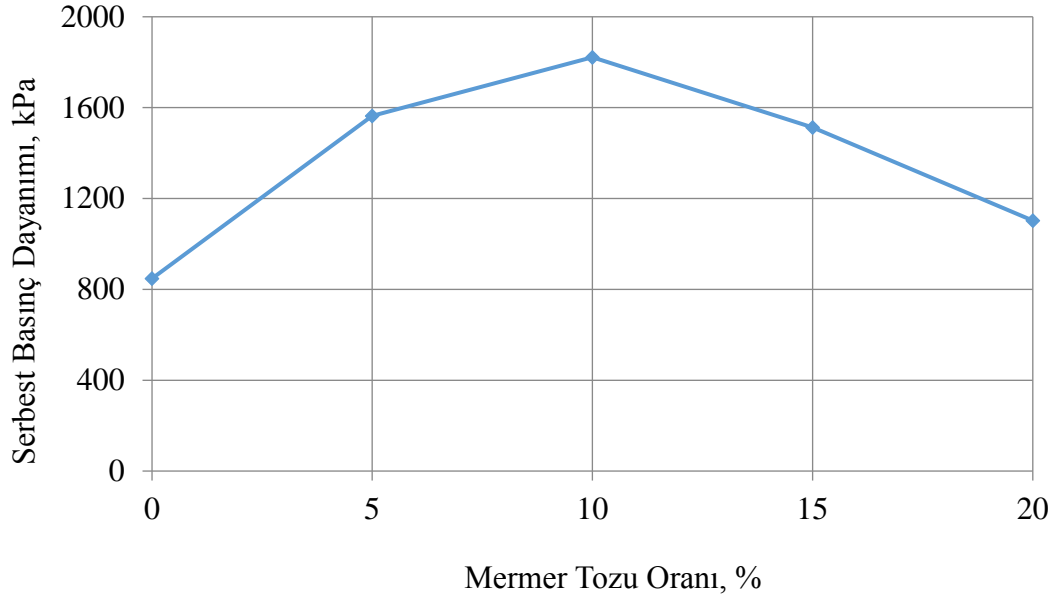
Şekil 27. SFABS numunelerinin 7 günlük kür sonrası serbest basınç dayanımları.



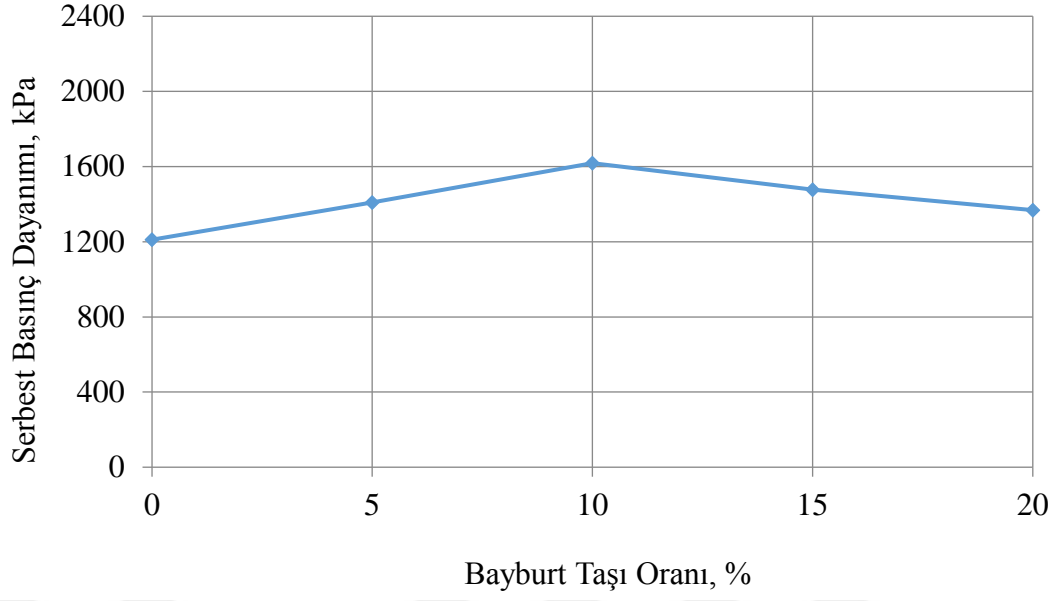
Şekil 28. SFAMP numunelerinin 7 günlük kür sonrası serbest basınç dayanımları.



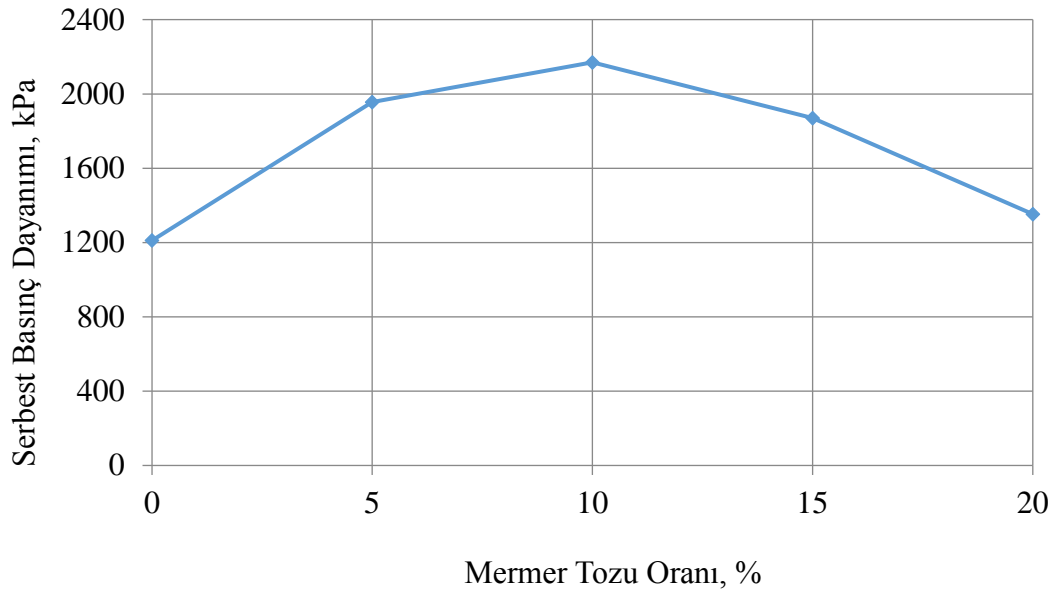
Şekil 29. SFABS numunelerinin 28 günlük kür sonrası serbest basınç dayanımları.



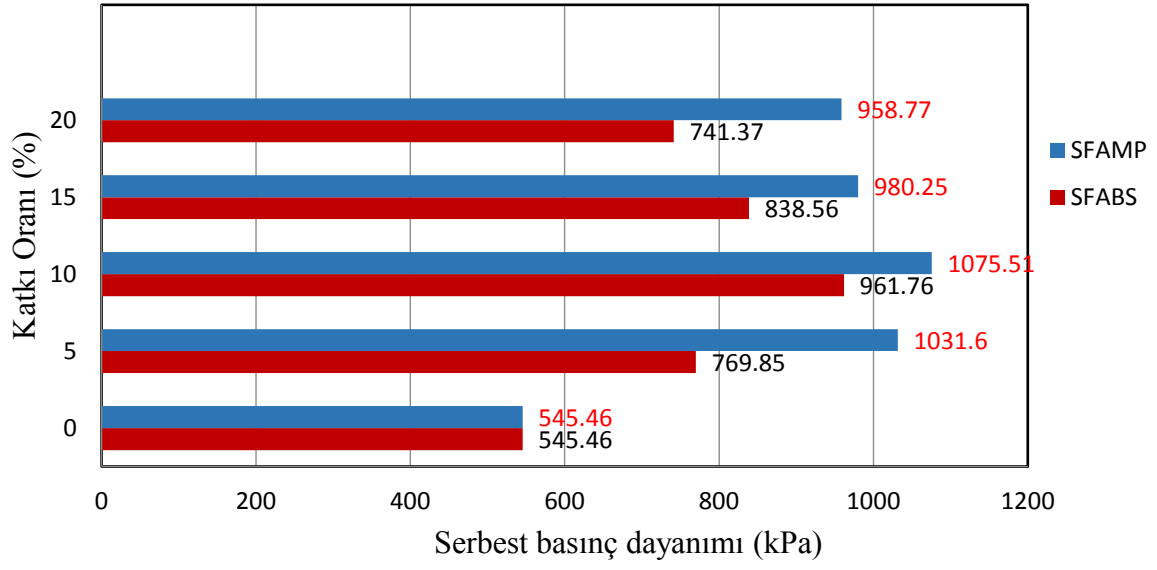
Şekil 30. SFAMP numunelerinin 28 günlük kür sonrası serbest basınç dayanımları.



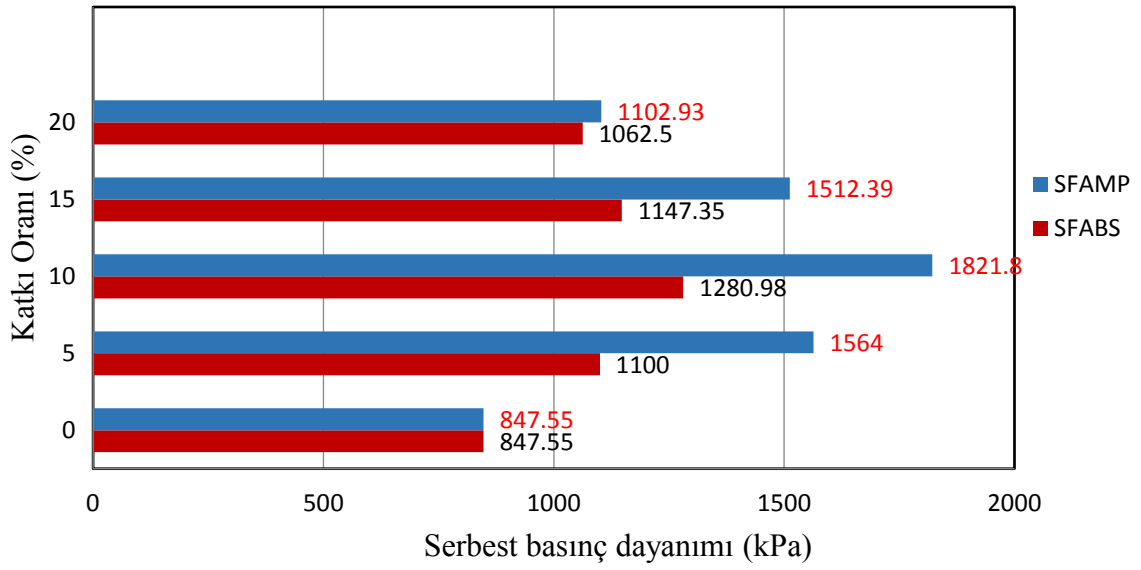
Şekil 31. SFABS numunelerinin 84 günlük kür sonrası serbest basınç dayanımları.



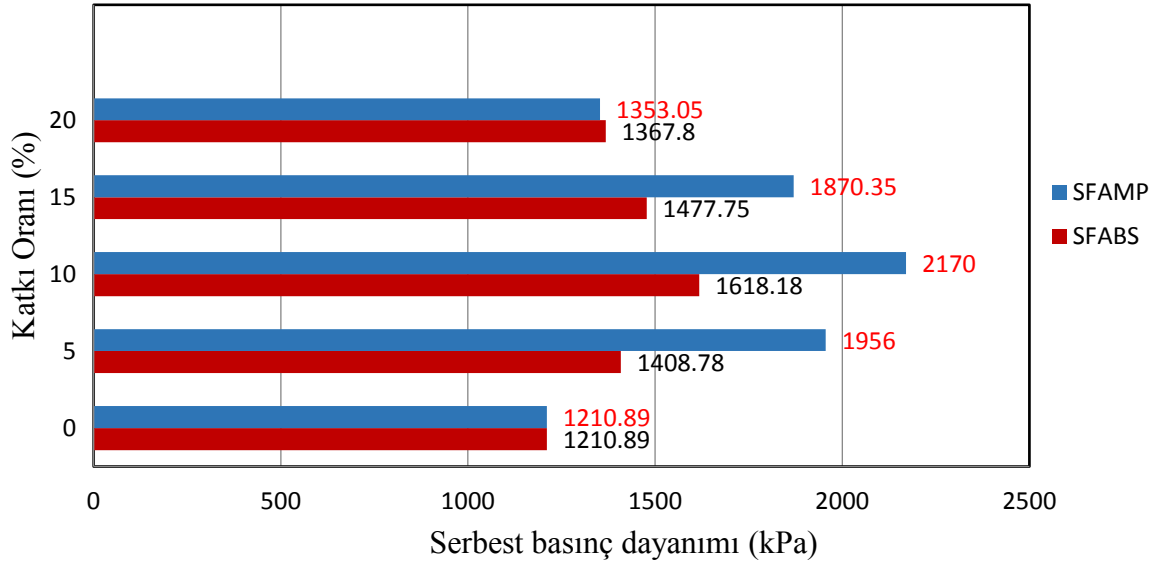
Şekil 32. SFAMP numunelerinin 84 günlük kür sonrası serbest basınç dayanımları.



Şekil 33.SFABS ve SFAMP numunelerinin 7 günlük serbest basınç dayanımlarının karşılaştırılması.



Şekil 34. SFABS ve SFAMP numunelerinin 28 günlük serbest basınç dayanımlarının karşılaştırılması.



Şekil 35. SFABS ve SFAMP numunelerinin 84 günlük serbest basınç dayanımlarının karşılaştırılması.

Durabilite tetkikleri.

Uçucu kül, Bayburt taşı ve mermer tozu katkılarıyla iyileştirilen farklı iklim koşullarında gösterdiği davranışları tespit etmek, durabilite açısından önem arz etmektedir. Bu bağlamda hazırlanan deney numunelerini ASTM D 560 (1996) standardına uygun olarak donma çözülme çevrim deneyi yapılmıştır.

Donma-çözülme çevrimi.

ASTM D 560 (1996) standardı kapsamında karışımlara 28 günlük kür süresi sonunda 12 donma-çözülme çevrimi uygulanmıştır. Donma-çözülme çevrimi sonrasında bu karışımların dayanımlarının belirlenmesi için serbest basınç test düzeneğine geçilmiştir. Bayburt taşı ve mermer tozu ile yapılan karışımlara ait 10 adet karışım için her karışımdan 3'er adet olmak üzere toplamda 30 adet numune hazırlanmıştır. Hesaplama tek eksenli serbest basınç dayanımlarının ortalamaları esas alınmıştır. Tespit edilen dayanım sonuçlarına ilişkin verilere Tablo 22 ve Tablo 23'de gösterimi yapılmıştır.

Tablo 22. SFABS Karışımlarının Donma-Çözülme Sonrası Basınç Dayanımları

Numuneler	Tek Eksenli Basınç Dayanımları (kPa)
S	106,7
SFA	525,3
SFABS/5	928,5
SFABS/10	1078,5
SFABS/15	1036,7
SFABS/20	878,5

Tablo 23. SFAMP Karışımlarının Donma-Çözülme Sonrası Basınç Dayanımları

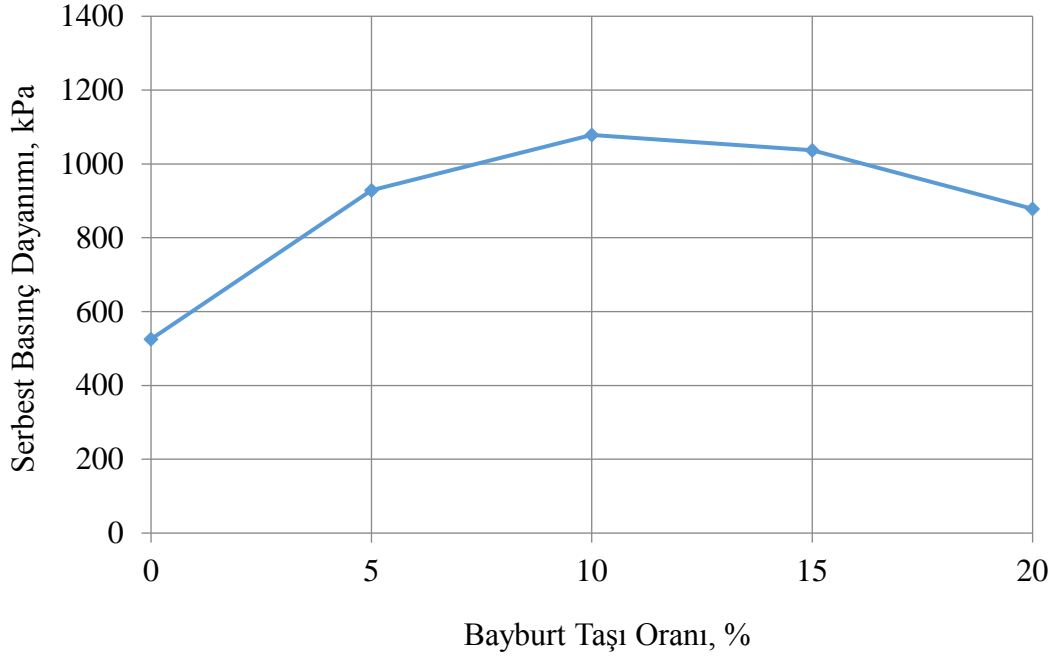
Numuneler	Tek Eksenli Basınç Dayanımları (kPa)
S	106,7
SFA	525,3
SFAMP/5	1102,0
SFAMP/10	1153,1
SFAMP/15	1090,1
SFAMP/20	581,6

SFABS karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonucunda SFA karışımı verilerine göre arttığı görülmüştür. SFABS karışımlarıyla hazırlanan numunelerde donma-çözülme çevrimi sonrası dayanım değerlerine bakıldığı zaman en iyi dayanım değeri SFABS10 karışımlarıyla hazırlanan numunelerde elde edilmiştir.

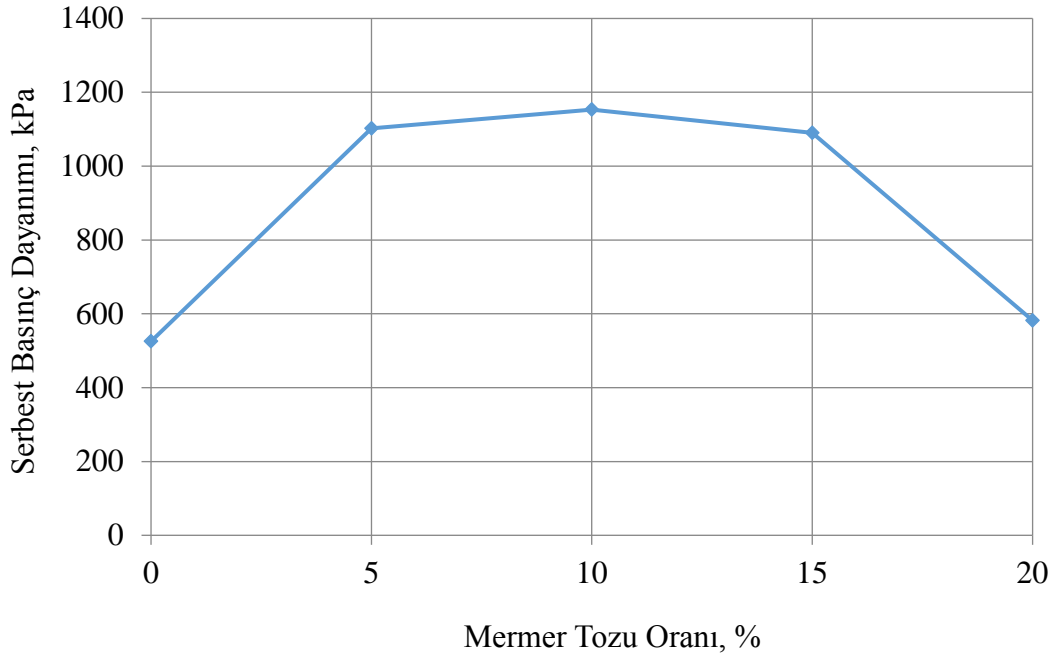
SFAMP karışımlarının hazırlanmış olduğu donma-çözülme çevrimi sonucunda SFA karışımı verilerine göre arttığı görülmüştür. SFAMP karışımlarıyla hazırlanan numunelerde donma-çözülme çevrimi sonrası dayanım değerlerine bakıldığı zaman en iyi dayanım değeri 1153,1 kPa olan SFAMP10 karışımında meydana gelmiştir.

Donma çözülme çevrimleri sonucunda elde edilen en yüksek dayanımlar serbest basınç dayanımında olduğu gibi SFABS10 ve SFAMP10 karışımlarından elde edilmiştir. Elde edilen veriler ışığında, 28 günlük serbest basınç dayanımlarına göre SFAMP10 karışımında %20 oranında azalma meydana gelirken, SFAMP10 karışımlarında ise %58 oranında azalma meydana gelmiştir. Durabilite tetkikleri açısından Bayburt taşının uçucu kütle kullanımının mermer tozuna oranla daha durabil olduğu tespit edilmiştir.

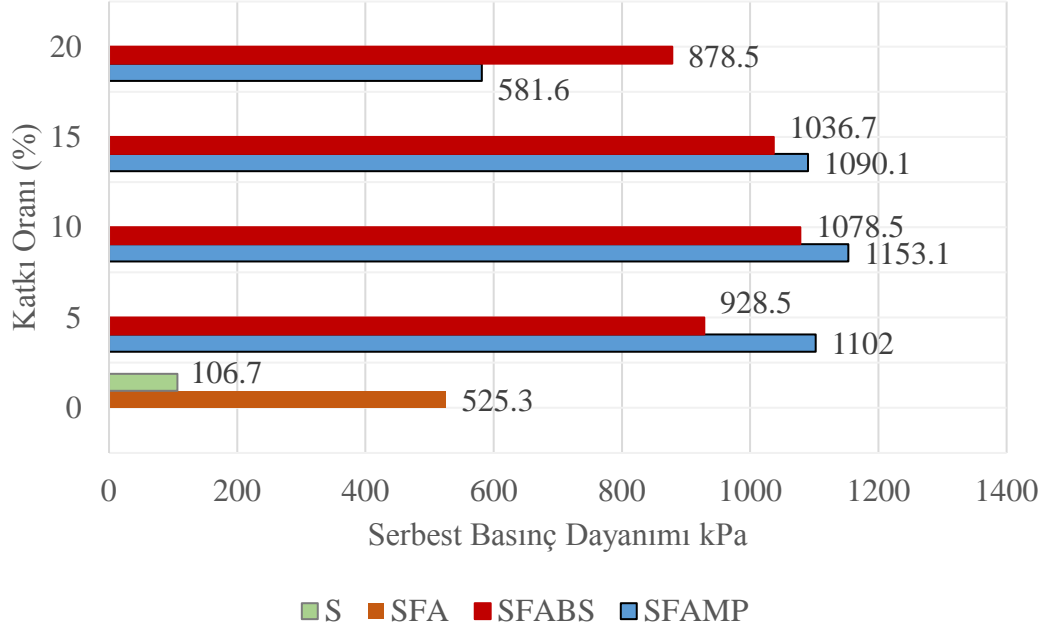
Şekil 37 ve Şekil 38’de SFABS ve SFAMP karışımlarına ait donma-çözülme çevrimleri sonrası tek eksenli basınç dayanımları ve Şekil 39’da ise S, SFA, SFABS ve SFAMP karışımlarına ait donma-çözülme çevrimleri sonrası tek eksenli basınç dayanımlarının karşılaştırılmaları grafiklerde sunulmaktadır.



Şekil 36. SFABS karışımlarının donma-çözülme sonrası basınç dayanımları.



Şekil 37. SFAMP karışımlarının donma-çözülme sonrası basınç dayanımları.



Şekil 38. SFABS ve SFAMP karışımlarına ait donma-çözülme sonrası serbest basınç dayanımlarının karşılaştırılması.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre düşük plastisiteli kil olan zemine uçucu kül, Bayburt taşı ve mermer tozu katkı maddeleri eklenerek yapılan stabilizasyon çalışmasında, hazırlanan numunelerin indeks, dayanım ve durabilite tetkikleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma neticesinde aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır:

- ✓ SFA numunelerinin likit limit ve plastisite indisi verileri doğal zemine göre azalmıştır. Plastik limit değerlerinde artışlar meydana gelmiştir. SFABS numunelerinin kıvam limitleri SFA numunesine göre daha yüksektir. SFAMP karışımlarının kıvam limit değerleri ise SFA karışımına göre yakın değerlerdedir. Kıvam limitlerinin en düşük değeri SFABS20 karışımından elde edilmiştir.
- ✓ Kompaksiyon verileri incelendiğinde; SFA karışımında katkısız doğal zemine kıyasla optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunluk değerleri azalmıştır.
- ✓ Uçucu kül katkısı ile hazırlanan SFABS karışımlarının, SFA karışımlarına göre maksimum kuru yoğunluklarında düşüşler meydana gelirken optimum su içeriklerinde ise artışlar meydana gelmiştir. Bu karışımların artan katkı oranı miktarıyla birlikte kompaksiyon parametrelerinde artış görülmüştür.
- ✓ SFAMP karışımlarında SFA karışımına göre artan katkı oranı miktarıyla birlikte maksimum kuru yoğunluk değerlerinde artışlar meydana gelirken, optimum su muhtevası değerlerinde düşüşlerin olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ SFA, SFABS ve SFAMP karışımlarının kompaksiyon parametrelerinden birbirine benzer sonuçlar elde edilmiştir.
- ✓ Uçucu külün doğal zeminle karıştırılmasıyla hazırlanan SFA karışımlarında 7 günlük kür sonunda doğal zemine göre 4 kata varan, 28 günlük kür sonrasında 5 kata varan, 84 günlük kür sonunda 6 kata varan dayanım artışları tespit edilmiştir. Uçucu külün katkı maddesi olarak kil stabilizasyonunda kullanılabilir olduğunu gösteren bu veriler literatür çalışmalarını destekler niteliktedir.
- ✓ SFABS karışımlarında 7, 28 ve 84 günlük kür sürelerinin ardından yapılan tüm tek eksenli serbest basınç deneylerinde maksimum dayanım SFABS10 numunesinden elde edilmiştir. SFABS10 karışımı SFA karışımına göre 7 günlük kür sonunda %76, 28 günlük kür sonunda %51, 84 günlük kür sonunda %34 oranında artan dayanım göstermiştir.

- ✓ SFAMP karışımlarının 7 günlük kür sonunda doğal zemine göre serbest basınç dayanımında 7 kata varan artışlar görülmüştür. Hazırlanan bu karışımlar incelendiğinde, en yüksek dayanımların SFAMP10 numunesinden elde edildiği tespit edilmiştir. SFAMP10 karışımı SFA karışımına göre 7 günlük kür sonunda %97, 28 günlük kür sonunda %115, 84 günlük kür sonunda %80 oranında artan dayanım göstermiştir.
- ✓ SFABS ve SFAMP karışımlarının serbest basınç dayanım verileri karşılaştırıldığında 84 günlük kür sonucunda en yüksek dayanım verileri SFABS karışımlarında 1618,18 kPa ile SFABS10 numunesinden, SFAMP karışımlarında ise 2170,00 kPa ile SFAMP10 numunesinden elde edilmiştir. Bu veriler ışığında mermer tozunun uçucu kül ile beraber kullanılmasının Bayburt taşına göre daha yüksek dayanım verdiği tespit edilmiştir.
- ✓ Donma çözülme çevrimleri sonucunda elde edilen en yüksek dayanımlar serbest basınç dayanımında olduğu gibi SFABS10 ve SFAMP10 karışımlarından elde edilmiştir. Elde edilen veriler ışığında, 28 günlük serbest basınç dayanımlarına göre SFAMP10 karışımında %20 oranında azalma meydana gelirken, SFAMP10 karışımlarında ise %58 oranında azalma meydana gelmiştir. Durabilite tetkikleri açısından Bayburt taşının uçucu küle kullanımının mermer tozuna oranla daha durabil olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ Düşük plastisiteli bir kilin stabilizasyonunda uçucu kül, Bayburt taşı ve mermer tozu atıklarının kullanılabilirliğinin araştırıldığı bu çalışma sonucunda, kıvam limitlerinde ve kompaksiyon parametrelerinde anlamlı değişimlerin meydana gelmediği, dayanım verilerinde uçucu küle beraber kullanılan mermer tozunun Bayburt taşına göre daha yüksek dayanımlar verdiği, buna karşın Bayburt taşının mermer tozuna göre donma çözülme çevrimine karşı durabilitesinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan çalışma neticesinde ileriye dönük yapılabilecek araştırmalar adına verilebilecek öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- Bu çalışma kapsamında kullanılan doğal zemin grubu düşük plastisiteli kildir. Düşük plastisiteli kil dışındaki zeminler kullanılarak uçucu kül, Bayburt taşı ve mermer tozu atıklarının farklı zeminlerle birlikte davranışları incelenebilir.
- Stabilizasyon uygulamalarında daha önce kullanılmamış atıkların uçucu kül, Bayburt taşı ve mermer tozu ile farklı kombinasyonlarda kullanımları irdelenebilir.
- Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen çalışma verileri arazi deneyleri ile karşılaştırılabilir.

Kaynakça

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (AASHTO). (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. USA: AASHTO M 147, 63-65.
- Adailer, K. (1996). *Mitigation of Earthquake-Induced Liquefaction Hazards* (Doctoral dissertation). Rensselaer Polytechnic Institute, New York.
- Akdag, O. N., & Kırımhan, S. (1999). Industrial Solid Waste and Recycling in Denizli Organized Industrial Zone. *D.E.Ü. Faculty of Engineering Journal of Science and Engineering*. 1, 47-58.
- Alataş, T. (1996). *Afşin – Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Yol Stabilizasyonunda Çeşitli Malzemelerle Birlikte Kullanımı Üzerine Bir Araştırma* (Doktora Tezi). Yüksek öğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 50970)
- Al-Mukhtar, M., Lasledj, A., & Alcover, J. F. (2010). Behaviour and Minerology Changes in Lime-Treated Expansive Soil at 50 °C. *Applied Clay Science*. 50, 199-203.
- Alkaya, D. (2002). *Uçucu Kül Katkısının Dolgu Zeminlerin Stabilizesine Etkisi* (Doktora Tezi). Yüksek öğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 128256)
- Arman, A. & Moonfish, G. A. (1972). *Lime Stabilization of Organic Soils*. Research Record No. 381, Highway Research Record, Washington, 37-45.
- ARRB, (1969). *Symposium on the Selection and Construction of Base Materials in Roads*. Bulletin No. 5, October, Melbourne.
- Arora, S., & Aydilek, A. H. (2005). Class F Fly-Ash-Amended Soils as Highway Base Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 17, 640-649.
- ASCE, (1997). *Soil Improvement and Geosynthetics Committee Report, Ground Improvement –Ground Reinforcemen*. 17-19 Temmuz 1997, GSP No:69, 1- 371, Utah.
- ASTM C 618, (2002). *Annual Book of ASTM Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete*, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 422, (2007). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 559, (2003). *Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures*, ASTM, Pennsylvania.

- ASTM D 560, (1996). *Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures*, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 698, (2007). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort*, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 854, (2010). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 2166, (2006). *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 2487, (2011). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 2974, (2007). *Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils*, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 4318, (2010). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*, ASTM, Pennsylvania.
- Atanur, A. (1973). Kireç Stabilizasyonu ve Yol Yapımındaki Tahkikatı. *Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası*. Ankara. 11-17.
- Atterberg, A. (1911). The Behaviour of Clays with Water, Their Limits of Plasticity and Their Degrees of Plasticity. *Kungliga Lantbruksakademiens Handlingar Och Tidskrift*. 50/2, 132-158.
- Aytekin, M. (2004). *DeneySEL Zemin Mekaniği*. Ankara: Teknik Yayınevi, 217-218.
- Aytekin, S. (2009). *Uçucu Küllerin Killi Zeminlerin İslahında Kullanımı (Yüksek Lisans Tezi)*. Yüksek öğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 244177)
- Balta, İ. (1984). *Doğu Karadeniz Bölgesi Topraklarının Çimento ve Kireçle Stabilizasyonu (Doktora Tezi)*. Yüksek öğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 378757)
- Başer, O., & Çokca E. (2010). Improvement of swelling Soils by using Waste marble dust. *Soil mechanics and 13th National Congress of Basic Engineering*. İstanbul. 143.
- Bell, F. G. (1996). Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils. *Engineering Geology*. 42, 223-237.
- Brooks, R. M. (2009). Soil Stabilization with Flyash and Rice Husk Ash. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*. 1, 3, 209-217.

- Buhler, R. L., & Cerato, A. B.. (2007). Stabilization of Oklahoma Expansive Soils Using Lime and Class C Fly Ash. *GeoDenver Congress: New Peaks in Geotechnics*. 1-10.
- Cai, Y., Shi, B., Charles, W. W., & Tang, C. (2006). Effect of Polypropylene Fibre and Lime Admixture on Engineerin Properties of Clayey Soil. *Engineering Geology*. 87, 230-240.
- Cömert, A.T. (2005). *Uçucu Küllerin Zemin Stabilizasyona Etkileri* (Yüksek Lisans Tezi). Yüksek öğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 168014)
- Cömert, A., Fırat, S., Yılmaz, G., & Sümer, M.. (2010). The use of fly ash, marble dust and waste sand in the road basement foundation. *13th National Congress of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. İstanbul.
- Çakıroğlu, İ. (2007). *Yüksek Plastisiteli Killerin Stabilizasyonu* (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya
- Çalık, Ü. (2012). *Perlitin Puzolanik Katkı Olarak Kireçle Birlikte Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı* (Doktora Tezi). Yüksek öğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 300926)
- Çetiner, S. I. (2004). *Şişen Zeminlerin Çayırhan Uçucu Külü ve Desülfojips ile Stabilizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Yüksek öğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 153547)
- Çetin, A. Y. (2011). *Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Alternatif Malzemeler ile Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Yüksek öğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 295471)
- Degirmenci, N., Okucu, A., & Turabi, A. (2007). Application of Phosphogypsum in Soil Stabilization. *Building and Environment*. 42, 3393-3398.
- Eades, J. L., & Grim, R. E. (1966). A Quick Test to Determine Lime Requirements for Soil Stabilization. *Highway Research Board*. 61-72.
- El-Rawi, N. M., & Abdul-Hasan, M. (1986). Effect of Chemical Additives on the Strength of Some Iraqi Soils-Lime Mixtures. *Journal of Building Research Center*. 14, 3, 25-31.
- Edil, T. B., Benson, C. H., Bin-Shafique, M. S., Kim, W., Tanyu, B. F., & Senol, A. (2002). Field Evaluation of Construction Alternatives for Roadway over Soft Subgrade. *Transportation Research Board*. Washington, 36-48.
- Edil, T. B., Acosta, H. A., & Benson, C. H. (2006). Stabilizing Soft Fine Grained Soils with Fly Ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 18, 2, 283-294.

- Eren, S., & Filiz, M. (2009). Comparing the Conventional Soil Stabilization Methods to the Consolid System Used as an Alternative Admixture Matter in Isparta Daridere Material. *Construction and Building Materials*. 23, 2473-2480.
- Erdinç, M. (1995). Durability and Chlorine imperviousness in fly ash concrete, Istanbul Technical University. *Institute of Science and Technology*. 100 p., Istanbul.
- Fang, H. Y. (1991). *Foundation Engineering Handbook*. Londra: Van Nostrang Reinhold Publishing.
- Federal Highway Administration, (1998). *Ground Improvement Technical Summaries Final Draft*. FHWA Demonstration Project. USA.
- Fidan, D. (2016). *Killerin Stabilizasyonunda Doğal Puzolanik Katkı Maddesi İnceliğinin Dayanım ve Durabiliteye Etkisi (Yüksek Lisans Tezi)*. Yüksek öğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 44951)
- Ghosh, A., & Subbarao, C. (2007). Strength Characteristics of Class F Fly Ash Modified with Lime and Gypsum. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 133, 7, 757-766.
- Gücek, S. (2011). *Mermer Tozu ve Uçucu Külün Kil Zeminlerin İyileştirilmesinde Kullanımı, (Yüksek Lisans Tezi)*. Yüksek öğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 284513)
- Hausmann, M. R. (1990). *Engineering Principles of Ground Modification*. McGraw-Hill. New York. 632.
- Hayward, B. (1996). *Ground Modification Seminar Notes*. Odenton.
- Huat, B. B. K., Mail, S., & Mohamed, T. A. (2005). Effect of Chemical Admixtures on the Engineering Properties of Tropical Peat Soils. Department of Civil Engineering. University Putra Malaysia, Serdang, Selangor, Malaysia, *American Journal of Applied Sciences*. 2 (7), 1113-1120.
- Hunt, R. E. (1986). *Geotechnical Engineering Techniques and Practices*. McGraw Hill. USA.
- Hunt, R. E. (1994). *Geotechnical Engineering Investigation Manual*. McGraw Hill. USA.
- Hunter, D. (1988). Lime Induced Heave in Sulfate Bearing Clays. *Journal of Geotechnical Engineering*. 114/2, 150-167.
- Ingles, O. G., & Metcalf, J. B. (1973). *Soil Stabilization*. John Wiley&Sons. New York.

- Jewell, R. J. (1968). *An Evaluation of Criteria for Selection of Pavement Base Course Materials in Western Australia* (Master Thesis) University of Western Australia, Australia.
- Kavak, A. (1996). *The Behavior of Lime Stabilized Clays Under Cyclic Loading* (Doktora Tezi). Yüksek öğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 50492)
- Kavak, A., Güngör, A. G., Avşar, C., & Atbaş, B. (2008). Kireç ile Zemin Stabilizasyonu. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 12. Ulusal Kongres.*, Konya.
- Kedzi, A. (1979). *Stabilized Earth Roads*. Elsevier. Amsterdam, 325-327.
- Kocabey, S. (2019). *Düşük Plastisiteli Killerin Kireçle Stabilizasyonunda İnceliğin Etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). Yüksek öğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 533972)
- Kukko, H. (2000). Stabilization of Clay with Inorganic Products. *Journal of Materials In Civil Engineering*. 12, 4, 307-309.
- Kumar, B. R. P., & Sharma, R. S. (2004). Effect of Fly Ash on Engineering Properties of Expansive Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 130, 7, 764-767.
- Kumar, A., Walia, B. S., & Bajaj, A. (2007). Influence of Fly Ash, Lime and Polyester Fibers on Compaction and Strength Properties of Expansive Soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 19, 3, 242-248.
- Lambe, P. C., Khosla, N. P., & Jayaratne, N. N. (1990). Soil Stabilization in Pavement Structures. *Transportation Studies Research. Sacramento*. 545-589.
- Ledbetter, R. H. (1985). Improvement of Liquefiable Foundation Conditions Beneath Existing Structures. *Dept. of the Arm*. Washington.
- Lee, S. W., & Fishman, K. L. (1993). Resilient and Plastic Behavior of Classifier Tailings And Fly Ash Mixtures. *Transport Res Rec* 1418, 51-59.
- Lin, D. F., Lin, K. L., & Luo, H. L. (2007). A Comparison between Sludge Ash and Fly Ash on the Improvement in Soft Soil. *Journal of the Air-Waste Management Association*. 57, 59-64.
- Little, N. D. (1987). Fundamentals of the Stabilization of Soil with Lime. *National Lime Association*. Arlington, 19-20.
- Mitchell, J. K. (1976). *Stabilization of Soils for Foundations of Structures*. University of California-Department of Civil Engineering Press. Berkeley.

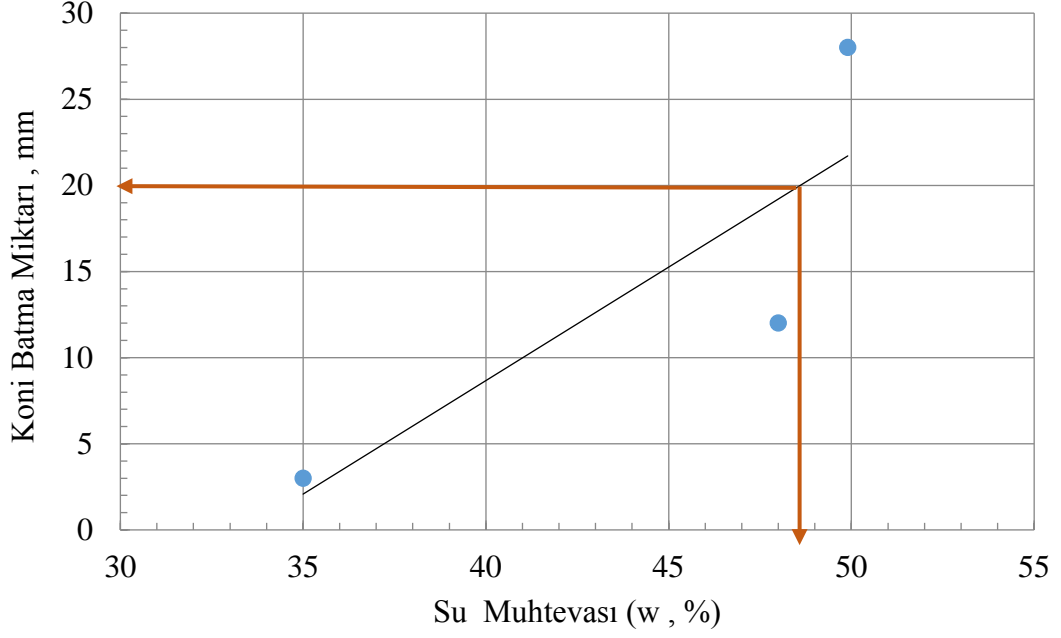
- Mitchell, J. K. (1986). Practical Problems from Surprising Soil Behavior. *Journal of Geotechnical Engineering*. 112, 3, 259-289.
- Mollamahmutoğlu, M., Yilmaz, Y., & Gungör, A. G. (2009). Effect of a Class C Fly Ash on the Geotechnical Properties of an Expansive Soil. *Int. Journal of Eng. Research-Development*. 1, 1, 1-6.
- Nelson, J D., & Debora J. M. (1992). Expansive Soils-Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering. *John Willey and Sons Inc. Londra*: 259-261.
- Onargan, T., & Köse, H. (1997). Marble. *D.E.Ü. Faculty of Engineering Publications*. İzmir 220, 209s.
- Öksüzer, N. (2016). *Farklı İnceliklere Sahip Mermer ve Bayburt Taşı Atıklarının Lif Donatılı Geopolimer Bağlayıcı Sistemlerde Kullanılması* (Yüksek Lisans Tezi). Yüksek öğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 444948)
- Önalp, A. (1983). *İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi* (Cilt 2). Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi Yayın No: 3. 1225s.
- Özaydın, K. (1995). *Zemin Mekaniği*. İstanbul: Birsen Yayınevi. 261 s.
- Özer, M., & Orhan, M. (2007). Lazer Kırınım Yöntemiyle Zeminlerin Tane Büyüklüğü Dağılımının Belirlenmesi: Genel İlkeler ve Örnek Hazırlama Yöntemi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 22/ 2, 217-226.
- Pektaş, C. (2012). *Muhtelif Katkı Maddeleri ve/veya Donatı Kullanımı ileYapılan Zemin İyileştirme(Stabilizasyon) Yöntemlerinin Teorik ve Deneysel Olarak Ayrıntılı Bir İrdeleme ve Değerlendirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yüksek öğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 327224)
- Petry, T. M., & Little, D. N. (1992). Update on Sulfate Induced Heave in Treated Clays: Problematic Sulfate Levels. *Transportation Research Board*. 1362.
- Rajasekaran, G., & Rao, S. N. (2002). Permeability Characteristics of Lime Treated Marine Clay. *Ocean Engineering*. 29, 113-127.
- Rodriquez, A. R., Castillo, H., & Sowers, G. F. (1973). Soil Mechanics in Highway Engineering. *Trans Tech Publications*. Germany.
- Sağlamer, A. (1985). Zemin Islah Metotları. *Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Semineri*. DSİ Genel Müdürlüğü. Adana.

- Seco, A., Ramírez, F., Miqueleiz, L., & García, B. (2011). Stabilization of Expansive Soils for Use in Construction. *Applied Clay Science*. 51, 348-352.
- Tan, O., & yisan, R. (1996). Uucu Kl İle Zemin Stabilizasyonu, Zemin Mekaniği ve Temel Mhendisliği Altıncı Ulusal Kongresi. *Dokuz Eylül Üniversitesi*. İzmir.
- Taşpolat, L. T., Zorluer, ., & Koyuncu, H. (2006). Impervious Clay of Waste Marble Powder The Effect of Freeze-Thawing in Layers. *Electronic Journal of Construction Technology*. 11-16.
- Terzi, S., & Karaşahin, M. (2003). Marble Powder Waste Asphalt Concrete Mixture Use as Elephants. *Technical Journal*. 2, 2903-2922.
- TS 639, (1975). *Uçucu Kller*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tunç, A. (2001). *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*, İstanbul: Atlas Yayın Dağıtım. 325.
- Tunç, A. (2002). *Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları*, İstanbul: Atlas Yayın Dağıtım, 912.
- U. S. Army Corps. of Eng. (2003). *Guidelines on Ground Improvement for Structures and Facilities*, Research No. 20314-1000, Dept of the Army, Washington.
- Usta, M. (2004). *The Effect of Waste Marble Powder on Free Compressive Strength of Soils* (Doktora Tezi). Yüksek ğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 150767)
- Uzuner, B. A. (2013). *Temel Mhendisliğine Giriş* (5.Baskı). Trabzon: Derya Kitabevi. 342-359.
- Vijayalakshmi, V., Singh, S., & Bhatnagar, D. (2001). Marble Slurry: A New Resource Material For Entrepreneurs. *Science Tech Entrepreneur Project*. 9.
- Winterkorn, H. F., & Fang, H. Y. (1975). *Foundation Engineering Handbook*. Londra: VanNostrand Reinhold Publication. 176.
- Yarbaşı, N., Kalkan, E., & Akbulut, S. (2007). Modification of the Geotechnical Properties, as influenced by Freeze-Thaw, of Granular Soils with Waste Additives. *Cold Regions Science and Technology*. 48, 44-54.
- Yıldırım, S. (2002). *Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı*. İstanbul: Birsen Yayınevi. 466.
- Yıldız, ., & Eskikaya, ř. (1995). Evaluation of Afyon Marble Powder Waste. *I. Turkey Marble Symposium*. 1, 45-52.

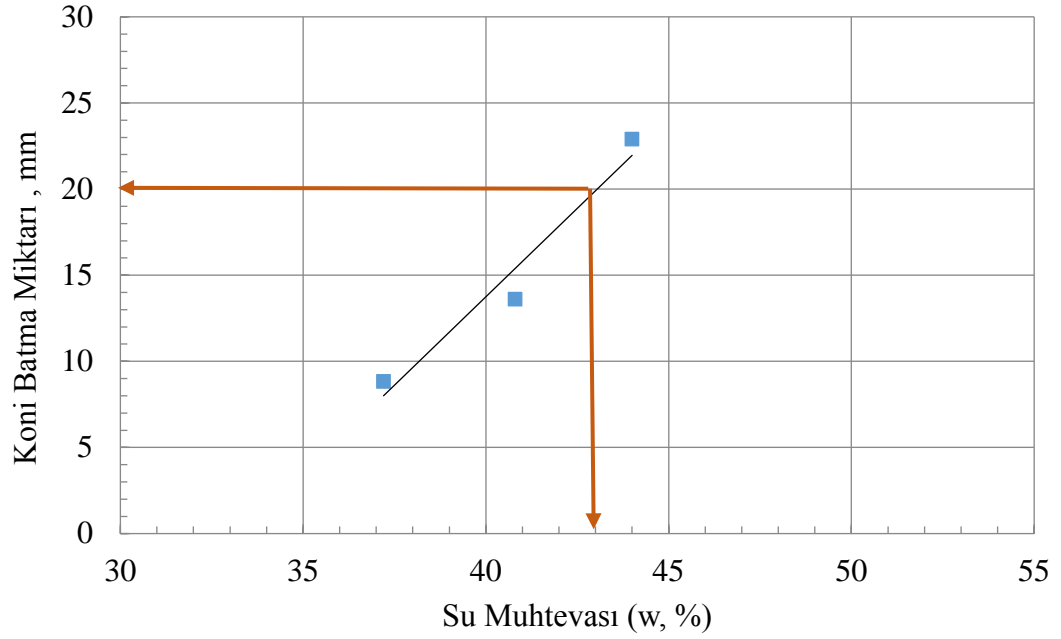
- Yıldız, A. H. (2008). *Evaluation of Marble Powder Waste in Road Construction* (Doktora Tezi). Yüksek öğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 179767)
- Yılmaz, F. (2015). *Tüfit Taşların Zemin Stabilizasyonunda Kireçle Birlikte Kullanılabilirliğinin Standart Deneyler ve Bilgisayarlı Tomografi Tekniği ile Araştırılması* (Doktora Tezi). Yüksek öğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 397321)
- Yılmaz, F. (2016). Use of Fly Ash in Ground Stabilization. *3rd International Symposium on Environment and Morality*. 4-6 November 2016, Alanya - Turkey.
- Yılmaz, G., Özsoy, E. A., & Çetin, M. (2008). Seyitömer Uçucu Küllerinin Killerle Kullanımı. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 12. Ulusal Kongresi*. Konya, 841-848.
- Yoder, E. J., & Witczak, M. W. (1975). *Principles of Pavement Design*. John Wiley&Sons Inc. New York.
- Yurdagül E., Kamiloğlu H. A., & Tekin İ. (2012). Usage of bayburt stone in road infrastructures as a improvement material. *International Conference on Traffic and Transport Engineering*. 439-444
- Zha, F., Liu, S., Du, Y., & Cui, K. (2008). Behavior of Expansive Soils Stabilized with Fly Ash. *Natural Hazards*. 47, 3, 509-523.
- Zorluer İ., & Usta, M. (2003). Waste Remediation of Soils with marble dust. *Turkey IV. Marble Symposium*. 305-312.

EKLER

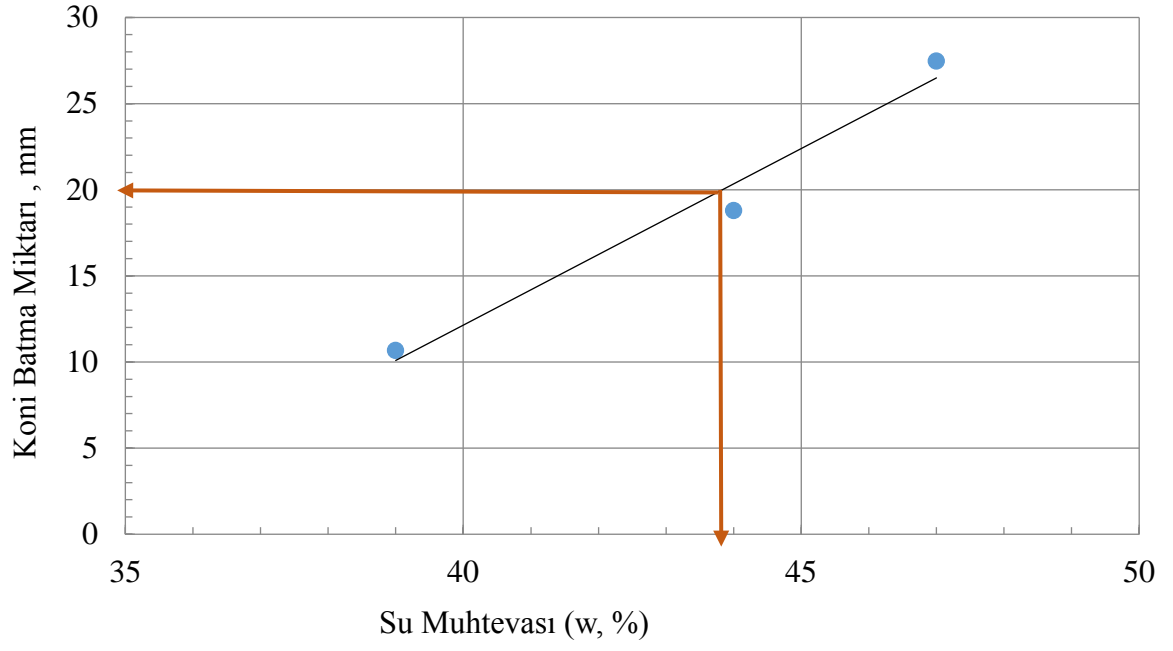
Ek-1. Düşen Koni Penetrasyon Deney Sonuçları



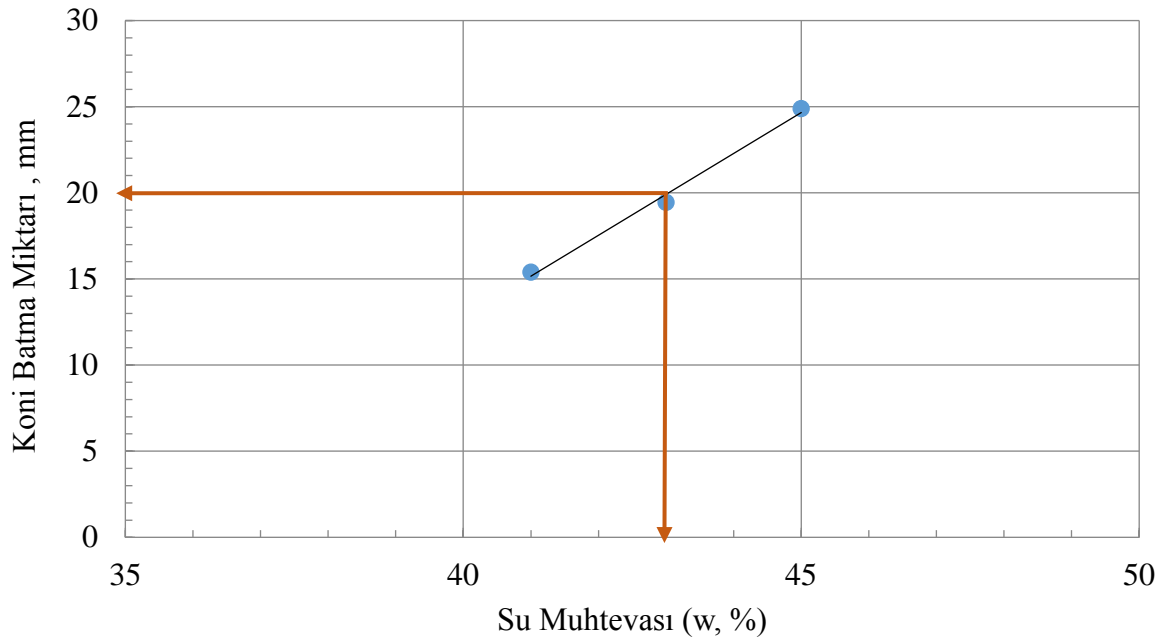
Şekil 39. Doğal zemine ait düşen koni penetrasyon grafiği.



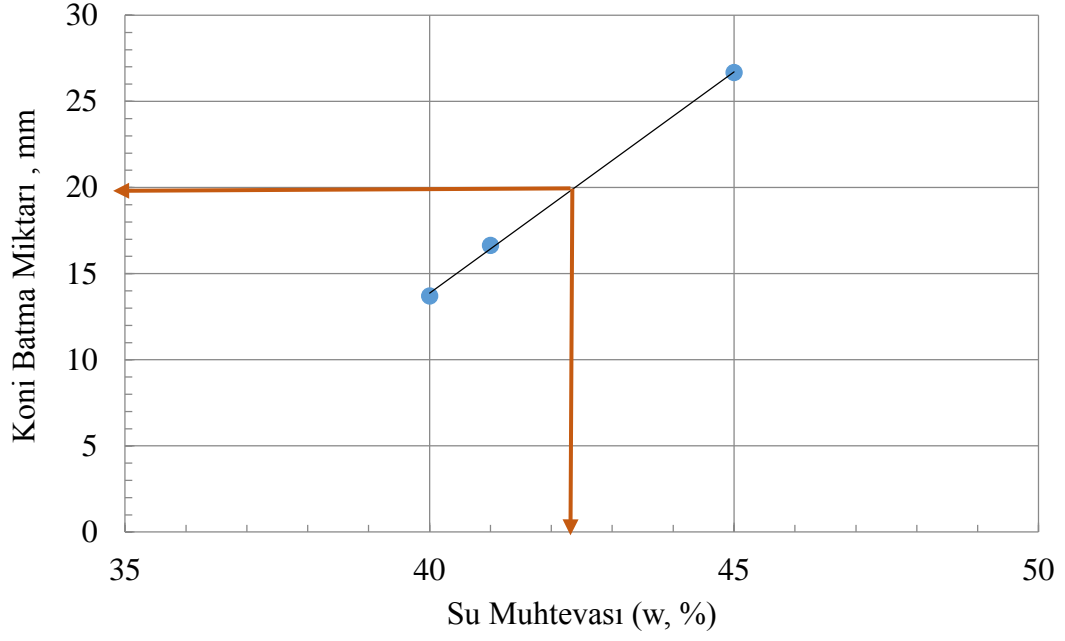
Şekil 40. SFA karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.



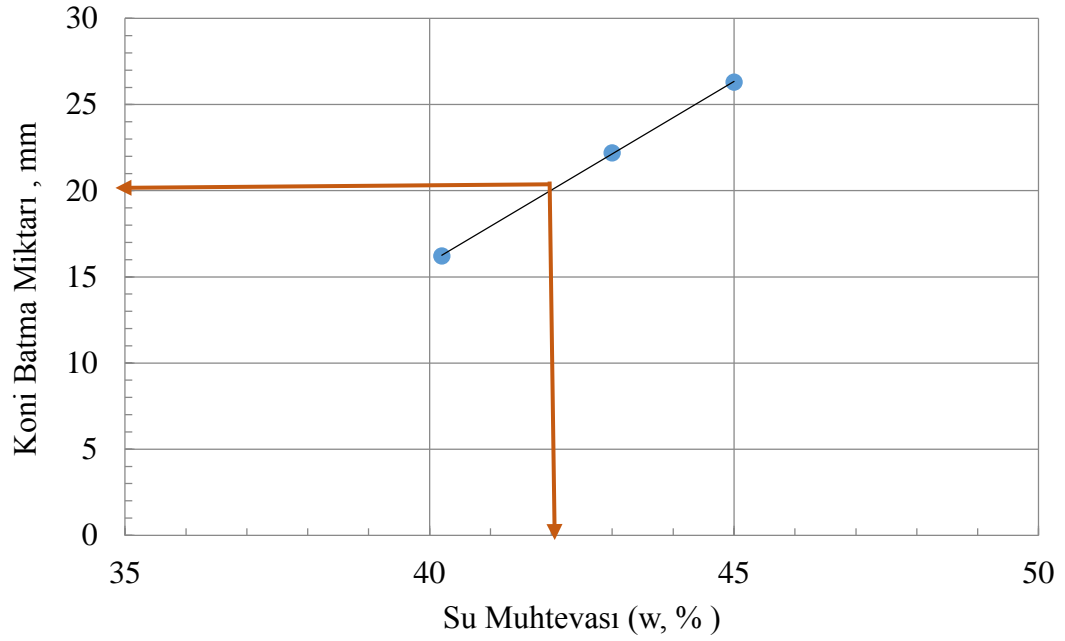
Şekil 41. SFABS5 karışımına ait düşen koni penetrasyon grafiği.



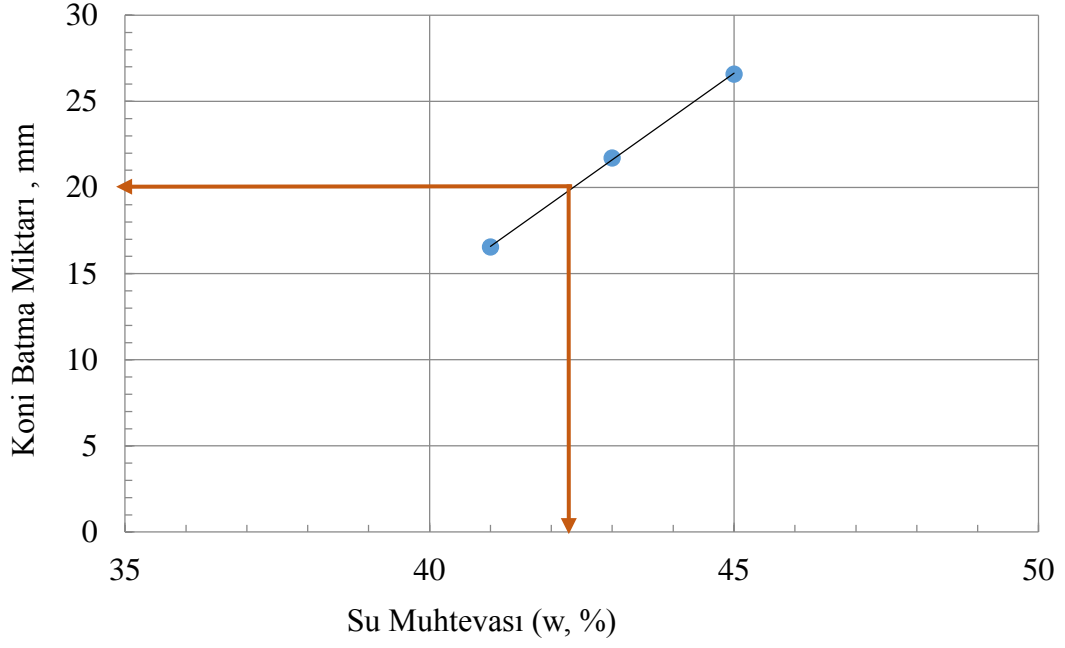
Şekil 42. SFABS10 karışımına ait düşen koni penetrasyon grafiği.



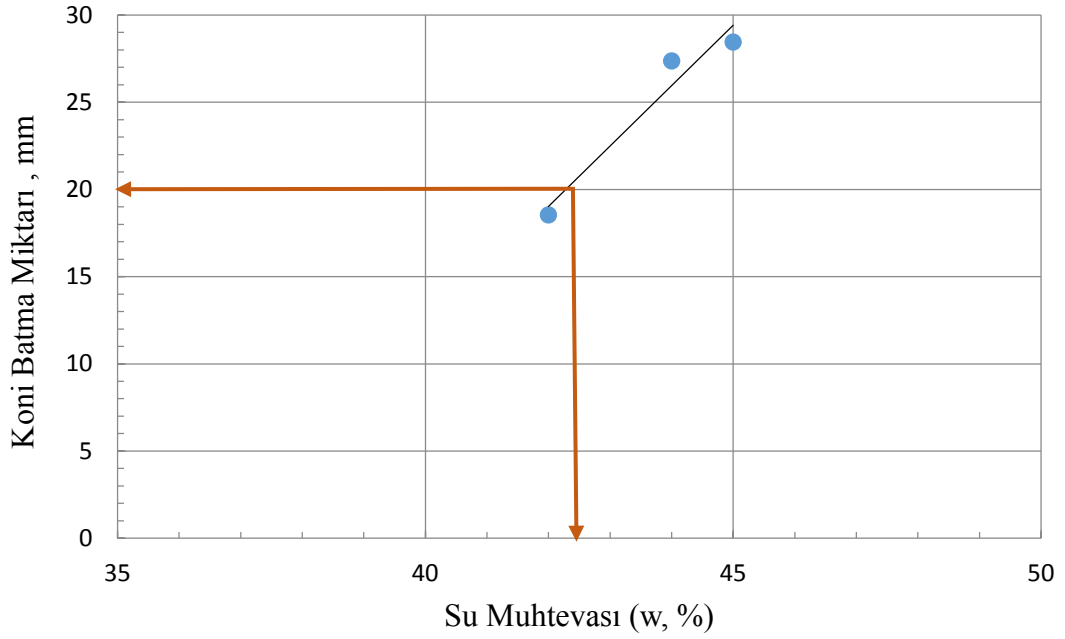
Şekil 43. SFABS15 karışımına ait düşen koni penetrasyon grafiği.



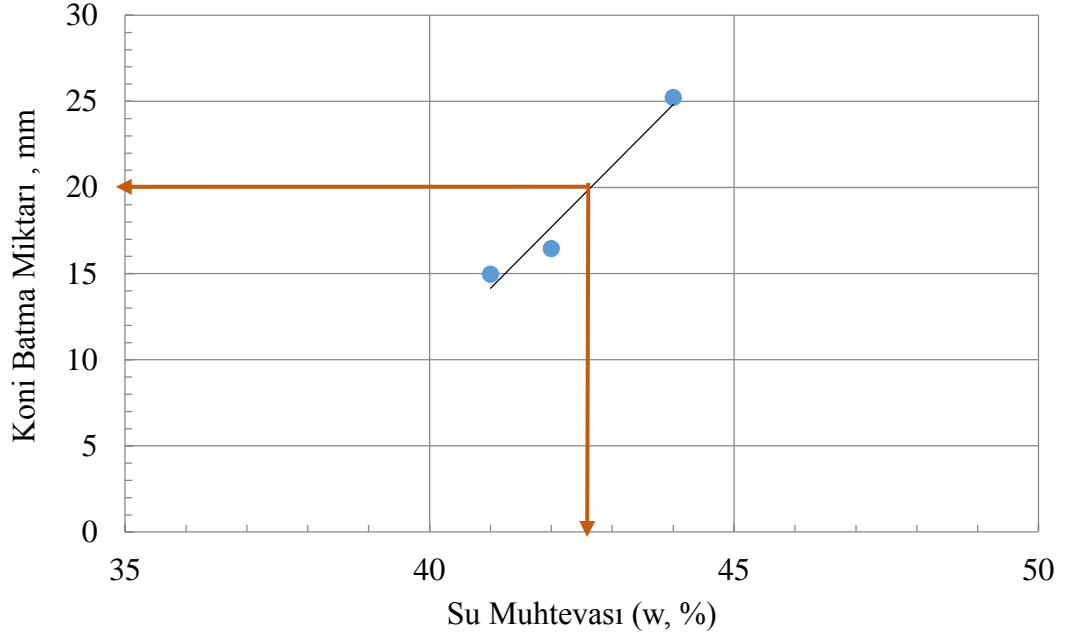
Şekil 44. SFABS20 karışımına ait düşen koni penetrasyon grafiği.



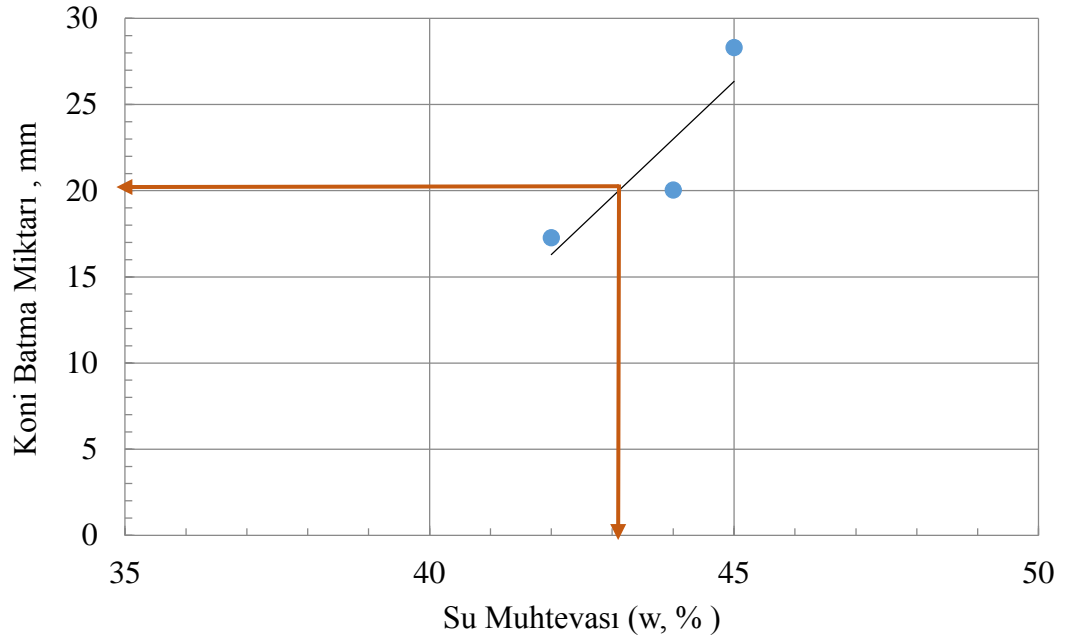
Şekil 45. SFAMP5 karışımına ait düşen koni penetrasyon grafiği.



Şekil 46. SFAMP10 karışımına ait düşen koni penetrasyon grafiği.

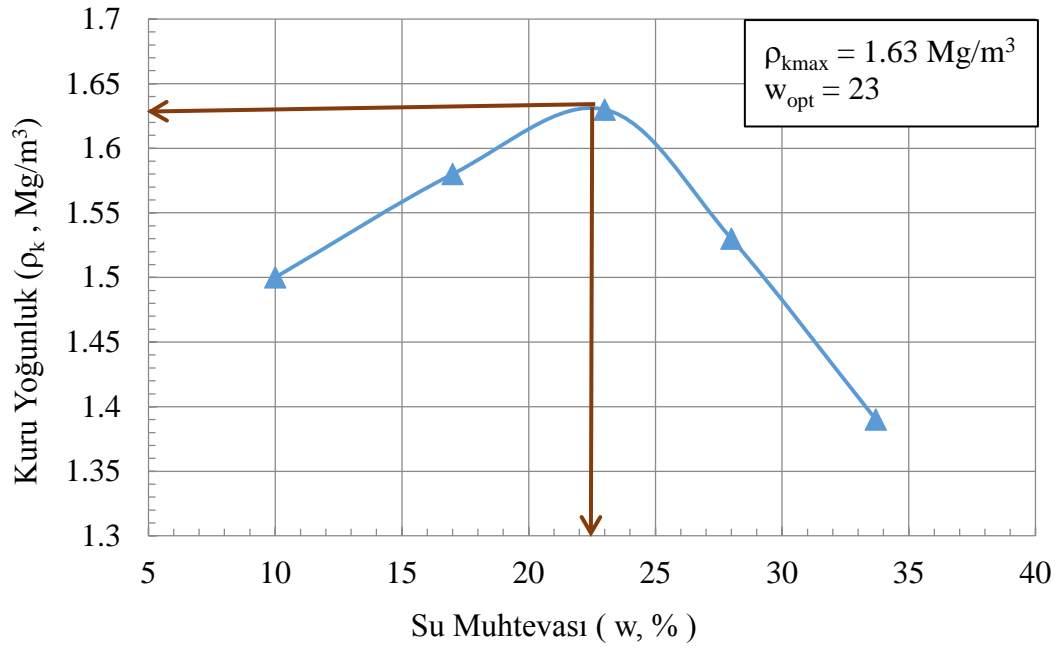


Şekil 47. SFAMP15 karışımına ait düşen koni penetrasyon grafiği.

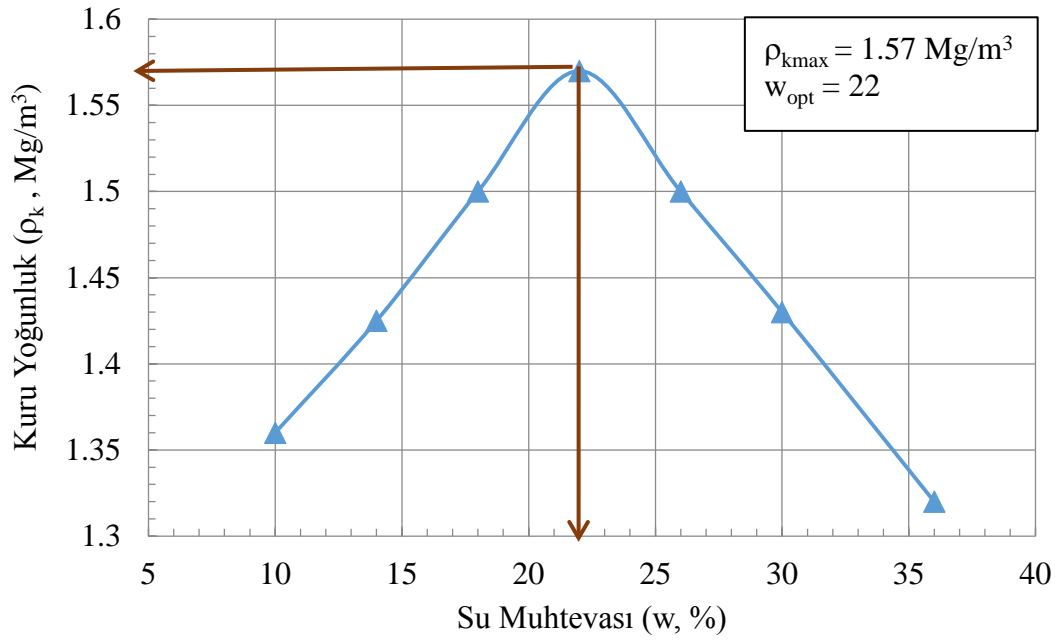


Şekil 48. SFAMP20 karışımına ait düşen koni penetrasyon grafiği.

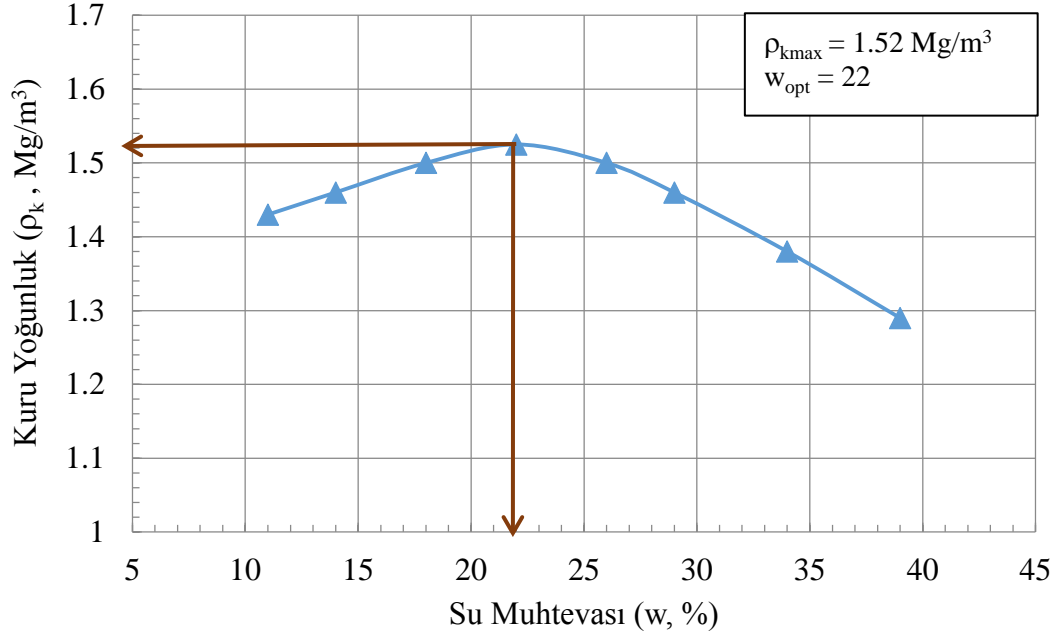
Ek-2. Kompaksiyon Denev Sonuçları



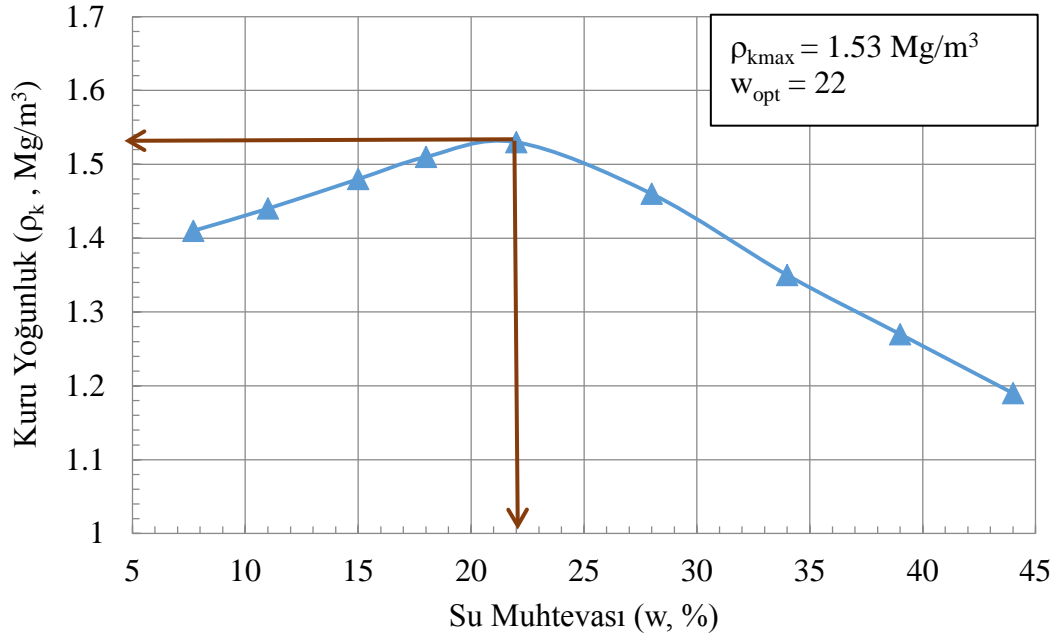
Şekil 49. Doğal zemine ait kompaksiyon eğrisi.



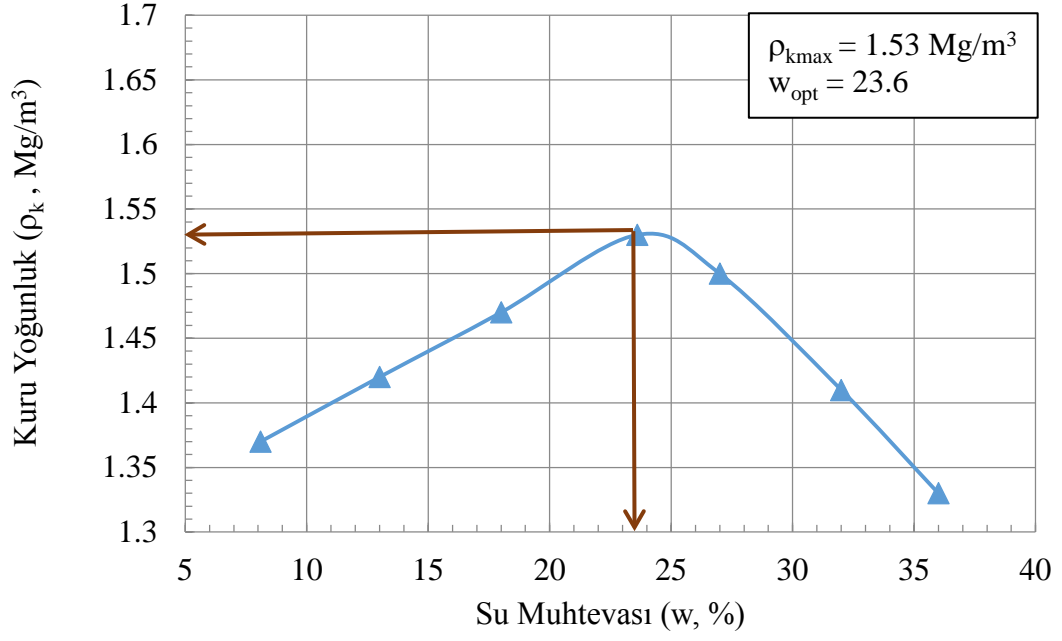
Şekil 50. SFA karışımına ait kompaksiyon eğrisi.



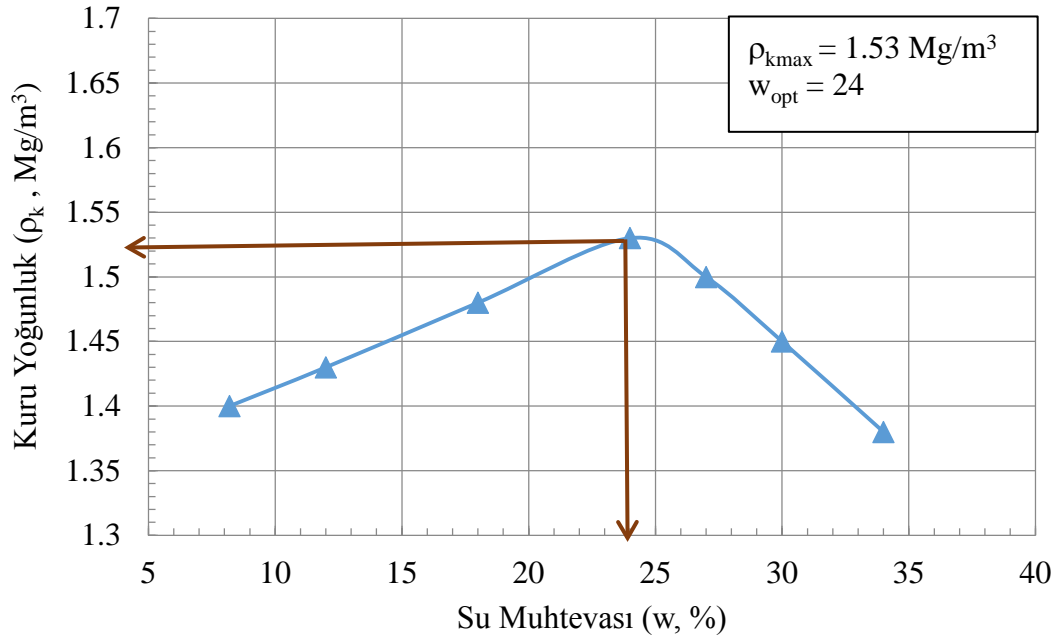
Şekil 51. SFABS5 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.



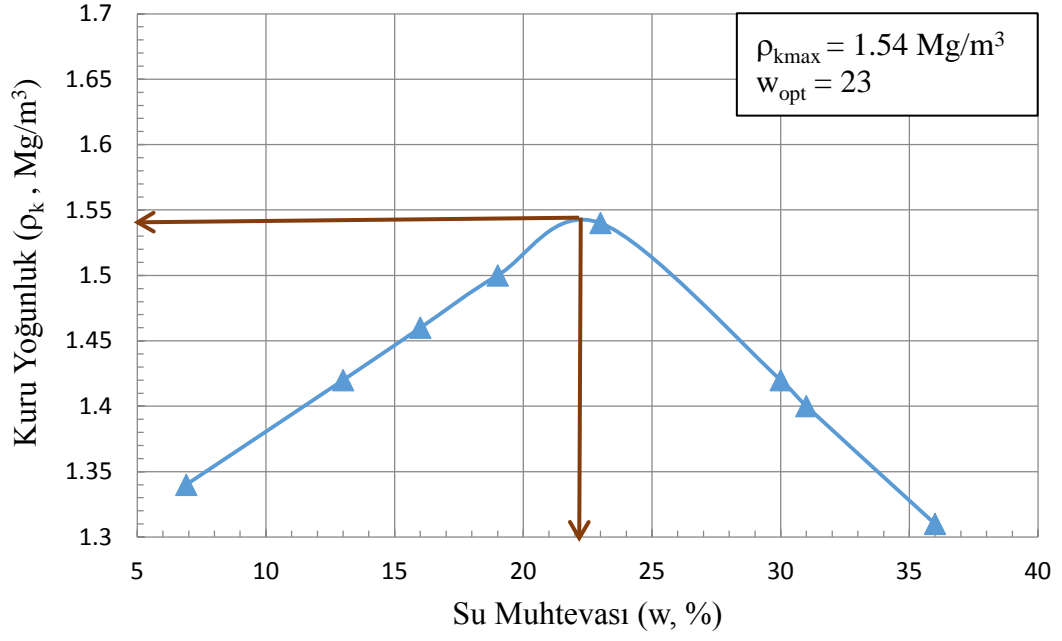
Şekil 52. SFABS10 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.



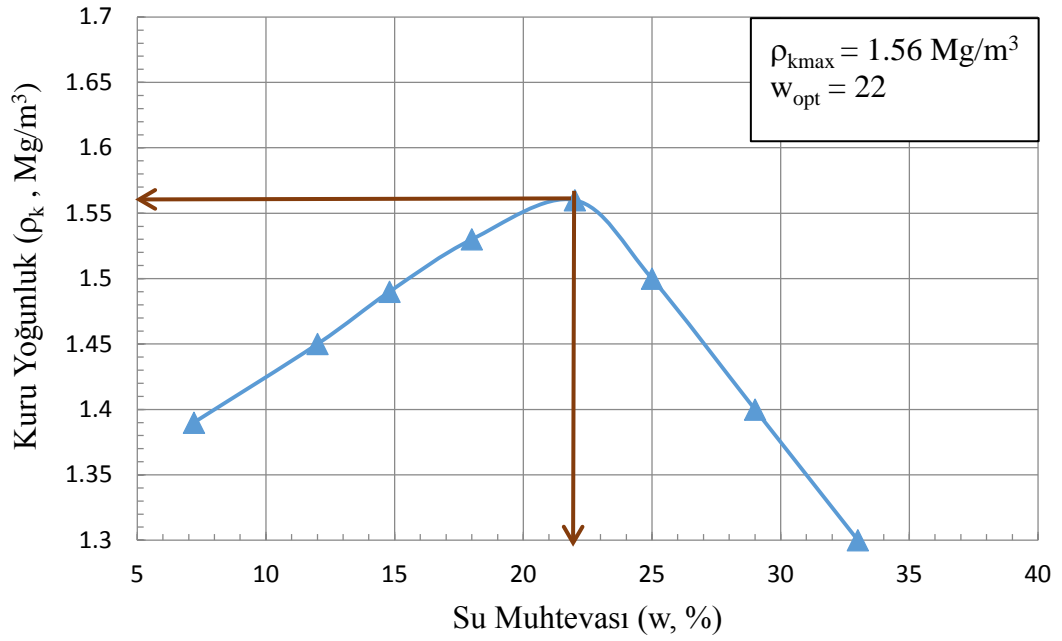
Şekil 53. SFABS15 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.



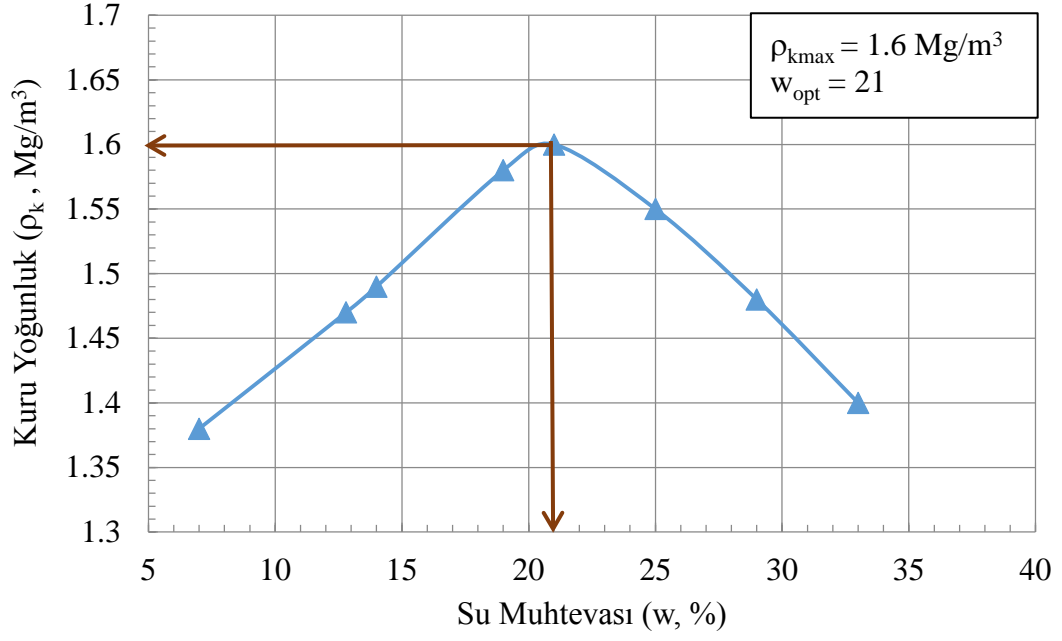
Şekil 54. SFABS20 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.



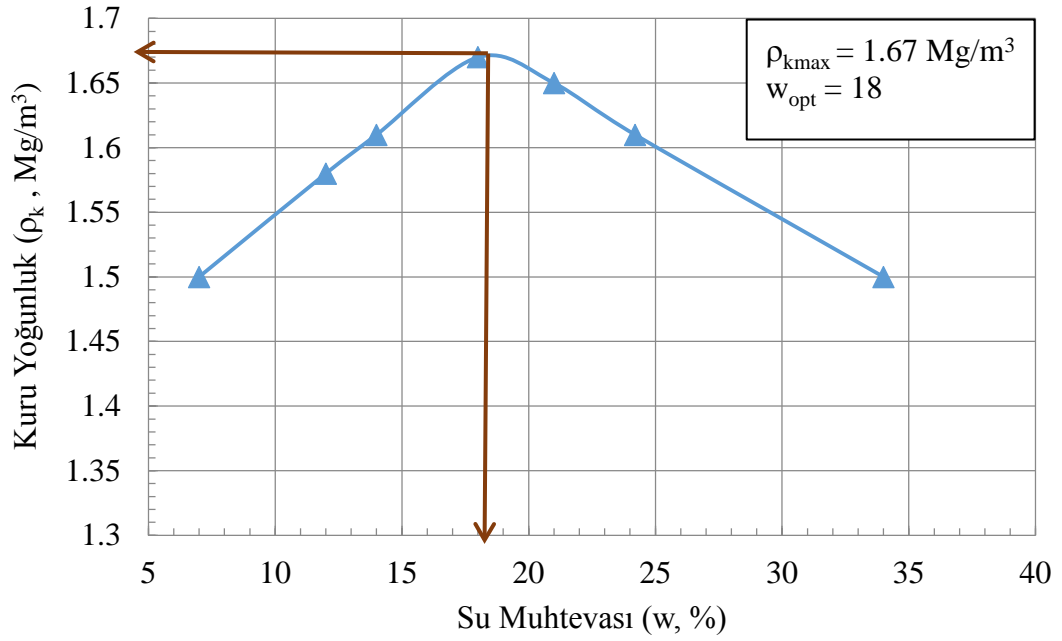
Şekil 55. SFAMP5 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.



Şekil 56. SFAMP10 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.



Şekil 57. SFAMP15 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.



Şekil 58. SFAMP20 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.

ÖZ GEÇMİŞ

Mesut TAŞ, 1994 yılında Diyarbakır'da doğdu. İlköğrenimini İstanbul Ali Haydar Günver İlköğretim Okulu'nda dereceyle bitirdi. Lise öğrenimini İstanbul Füsun Yönder Anadolu Lisesi'nde tamamladı ve 2012 yılında mezun oldu. Aynı yıl Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü kazanıp lisans eğitimini bölüm birincisi olarak tamamladı. Eğitimini bitirdikten sonra Bayburt'ta beton alanında faaliyet gösteren özel bir firmada işe başlayıp saha mühendisliği yaptı. Ardından İstanbul'da özel bir inşaat firmasında yaklaşık 2 yıl saha mühendisliği ve şantiye şefliği yaptı. 2016 yılında Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Halen Siirt ilinde inşaat mühendisi ve gayrimenkul değerlendirme uzmanı olarak çalışmalarına devam etmektedir.