



**İNCE DANELİ ZEMİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE
MAGNEZYUM CÜRUFUNUN
KULLANILABİLİRLİĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat YEŞİLÇAY

**Danışman
Prof. Dr. İsmail ZORLUER**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Şubat 2023

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İNCE DANELİ ZEMİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE MAGNEZYUM
CÜRUFUNUN KULLANILABİLİRLİĞİ**

Murat YEŞİLÇAY

Danışman

Prof. Dr. İsmail ZORLUER

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Şubat 2023

TEZ ONAY SAYFASI

Murat YEŞİLÇAY tarafından hazırlanan “İNCE DANELİ ZEMİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE MAGNEZYUM CÜRUFUNUN KULLANILABİLİRLİĞİ” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 08/02/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. İsmail ZORLUER

Başkan : Prof. Dr. İsmail ZORLUER
Afyon Kocatepe Üniversitesi/ Mühendislik Fakültesi **İmza**

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Murat KİLİT
Afyon Kocatepe Üniversitesi/ Mühendislik Fakültesi **İmza**

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ
Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi **İmza**

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

08/02/2023

Murat YEŞİLÇAY

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İNCE DANELİ ZEMİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE MAGNEZYUM CÜRUFUNUN KULLANILABİLİRLİĞİ

Murat YEŞİLÇAY

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof Dr. İsmail ZORLUER

Hızlı kentleşme, uygun yerleşme alanlarının hızla azalması ve yapı boyutlarının fazlaca artması gibi sebeplerden dolayı inşaat sektöründe zemin iyileştirme işlemine duyulan ihtiyaç oldukça artmıştır. Bu durumlarda uygulanacak çözümlerden biri olan katkı maddeleri ile zemin iyileştirme çalışmaları yapılırken daha çok atık malzemeler ile çalışılmaktadır. Atık malzemelerin kullanımı ile bu malzemelerin doğaya sağlık, doğal çevre kirliliği vb. zararlı yönlerinden bir nebze arındırılması sağlanmış olur.

Bu çalışmada zemin iyileştirilmesinde kullanılabilecek birden çok katkı maddesi olmasına rağmen, saf magnezyum üretiminden elde edilen ve endüstriyel atık kabul edilen magnezyum cürufunun, zemin iyileştirilmesinde belirli oranlarda (%5-10-15-20-25) zemine karıştırılıp laboratuvar şartlarında dayanımlarının ölçülmesiyle elde edilecek sonuca göre zemin iyileştirilmesinde kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Numuneler eksenel basınç deneyi, kompaksiyon deneyi, kıvam limitleri deneylerine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre artan katkı oranlarına bağlı dayanım artışları meydana gelmiş ve uzun vadede dayanımın daha da artabileceği öngörülmüştür. Dayanım açısından en uygun katkı oranlarının minimum %15 oranında olduğu gözlemlenmiştir.

2023, xi + 88 sayfa

Anahtar Kelimeler: Magnezyum cürufu, Zemin iyileştirme, Kil zemin, Dayanım.

ABSTRACT
M.Sc. Thesis

**THE USEABILITY OF MAGNESIUM SLAG IN THE IMPROVEMENT OF FINE-
GRAINED SOIL**

Murat YEŞİLÇAY

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof Dr. İsmail ZORLUER

Due to reasons such as rapid urbanization, rapid reduction of suitable settlement areas and excessive increase in building sizes, the need for floor improvement in the construction sector has increased significantly. In these cases, one of the solutions to be applied is to work with waste materials while soil improvement studies are carried out with additives. With the use of waste materials, the environmental pollution of these materials to nature, etc. it will be provided to be cleaned a little from harmful aspects.

In this study, although there are multiple additives that can be used in soil improvement, magnesium slag, which is obtained from pure magnesium production and accepted as industrial waste, is mixed with the ground in certain proportions (5-10-15-20-25) in soil improvement and its strengths are measured in laboratory condition and its usability in soil improvement was investigated.

The specimens were subjected to axial compression test, compression test and consistency limits tests. According to the test results, strength increases occurred with increasing additive ratios and it is predicted that the strength can increase even more in the long term. It was observed that the most suitable additive rates in terms of strength were minimum 15%.

2023, xi + 88 pages

Keywords: Magnesium Slag, Soil Stabilization, Clay Soil, Resistance.

TEŞEKKÜR

Tez konusu seçimi, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların analizi ve yazımı sırasında tüm akademik birikimi ve tecrübeleriyle yol gösteren tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İsmail ZORLUER'e katkılarından dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında araştırma, deney ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Süleyman GÜCEK'e, her konuda destek, öneri ve eleştirileriyle yardımlarını hissettiğim hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca karşılaştığımız zorluklara rağmen gece gündüz maddi ve manevi yol arkadaşlığı yapan meslektaşım, arkadaşım Sayın Ali YAMAN'a, bu günlere gelmemde desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve tez çalışmamda bana gösterdikleri maddi ve manevi destekleri, anlayış ve sabırlarından dolayı sevgili aileme sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Murat YEŞİLÇAY
Afyonkarahisar 2023

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
RESİMLER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Zemin Stabilizasyonu	3
2.2 Zemin Stabilizasyonun Temel Amaçları	8
2.3 Zemin Stabilizasyonu Yöntemleri	9
2.3.1 Yüzeysel Stabilizasyon	10
2.3.1.1 Katkısız Stabilizasyon	10
2.3.1.2 Katkılı Stabilizasyon	11
2.3.2 Derin Stabilizasyon	20
2.3.2.1 Dinamik Kompaksiyon.....	20
2.3.2.2 Derin Vibrasyon (Vibro-flotasyon)	21
2.3.2.3 Kompaksiyon Kazıkları.....	23
2.3.2.4 Patlayıcılar.....	23
2.3.2.5 Enjeksiyon	24
2.3.2.6 Geotekstiller	26
2.3.2.7 Taş Kolonlar	27
2.3.2.8 Jet Grout	28
2.3.2.9 Derin Karıştırma Yöntemi.....	30
2.3.2.10 Kireç Kazıkları	31
2.3.2.11 Ön Yükleme Yöntemi	31
2.3.2.12 Kum Drenleri Yöntemi.....	32
2.3.2.13 Vakum ile Ön Yükleme Yöntemi.....	33
2.3.2.14 Elektro-Osmoz Yöntemi.....	34
2.3.2.15 Isı ile Stabilizasyon	35

3. MATERYAL ve METOD	36
3.1 Materyal	36
3.1.1 Zemin	36
3.1.2 Magnezyum.....	37
3.1.2.1 Özellikleri.....	38
3.1.2.2 Kullanım Alanları ve Rezervleri	39
3.1.3 Magnezyum Cürufu	40
3.1.3.1 Magnezyum Cürufu Üretimi	41
3.1.3.2 Magnezyum Cürufunun Zararları.....	43
3.1.3.3 Magnezyum Cürufu ile Yapılan Çalışmalar.....	44
3.2 Metod	46
3.2.1 Numune Hazırlama	46
3.2.2 Tanımlama Deneyleri.....	47
3.2.2.1 Dane Boyutu ve Dane Çağı Dağılımı.....	47
3.2.2.2 Hidrometre Deneyi	48
3.2.2.3 Piknometre (Özgül Ağırlık) Deneyi.....	50
3.2.2.4 Atterberg Limit Deneyleri	50
3.2.2.5 Standart Proktor (Kompaksiyon) Deneyi	52
3.2.2.6 Eksenel Basınç Deneyi.....	53
4.BULGULAR	54
4.1 Kıvam Limit Değerlerinin Belirlenmesi	55
4.2 Kuru Yoğunluk – Su Muhtevası İlişkisinin Belirlenmesi.....	57
4.3 Eksenel Basınç Deney Değerleri	59
4.4 Kür Sürelerine Bağlı Su Muhtevası Değişimi	66
4.5 Elastisite Modülünün Grafiklerle Belirlenmesi	68
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	69
6. KAYNAKLAR.....	72
ÖZGEÇMİŞ.....	79
EKLER	80

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

M	Mikron
W_L	Likit limit
W_P	Plastik limit
I_P	Plastisite indisi
W	Su muhtevası
W_{opt}	Optimum su muhtevası
ε	Deformasyon
E	Elastisite Modülü
P	Basınç
q_u	Serbest basınç mukavemeti
ρ_{kmax}	Maksimum kuru birim hacim ağırlığı
γ	Özgül ağırlık
sn	Saniye
dk	Dakika
°C	Santigrat derece
kN	Kilo newton
N	Newton
m	Metre
cm	Santimetre
mm	Milimetre
ml	mililitre
Pa	Pascal
kPa	Kilopascal
CaO	Kalsiyum Oksit
Mg	Magnezyum
MgO	Magnezyum Oksit
SiO ₂	Silisyum Dioksit
Fe ₂ O ₃	Demir Oksit
Al ₂ O ₃	Aluminyum Oksit
F	Flor
SO ₃	Kükürt Trioksit
TiO ₂	Titanyum Dioksit
MnO	Manganez Oksit
P ₂ O ₅	Fosfor Pentoksit
CaCO ₃	Kalsiyum Karbonat
CO ₂	Karbon Dioksit

Kısaltmalar

AB	Avrupa Birliği
ASTM	American Standards of Testing Materials (AB.D. Test Standartları)
TS	Türk Standartları
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Zemin iyileştirme uygulamaları.	4
Şekil 2.2 Çeşitli enjeksiyon malzemelerinin zeminlerin dane çaplarına göre girebilme limitleri.	25
Şekil 2.3 Enjeksiyon tekniklerinin şematik gösterimi.	26
Şekil 3.1 Metalik magnezyum üretim şeması.	42
Şekil 3.2 Elek analizi ve hidrometre sonuç grafiği ile tane dağılımı.	49
Şekil 3.3 Likit limitin belirlenmesi.	51
Şekil 3.4 Zemin numunesinin kuru birim hacim ağırlığı-su muhtevası grafiği.	53
Şekil 4.1 Katkı oranına bağlı kıvam limit değerleri.	56
Şekil 4.2 Katkı oranına bağlı plastisite indis değerleri.	56
Şekil 4.3 Katkılı ve katkısız numunelerin kompaksiyon eğrileri.	57
Şekil 4.4 Farklı katkı oranlarına göre optimum su muhtevaları.	58
Şekil 4.5 Farklı katkı oranlarına göre kuru birim ağırlıkları.	58
Şekil 4.6 Kür sürelerine göre serbest basınç dayanım grafiği.	59
Şekil 4.7 Katkı oranlarına göre serbest basınç dayanım grafiği.	60
Şekil 4.8 Katkısız numune dayanımlarının kür süresine göre değerlendirilmesi.	60
Şekil 4.9 Katkı oranı %5 olan numune dayanımlarının kür süresine göre değerlendirilmesi.	61
Şekil 4.10 Katkı oranı %10 olan numune dayanımlarının kür süresine göre değerlendirilmesi.	62
Şekil 4.11 Katkı oranı %15 olan numune dayanımlarının kür süresine göre değerlendirilmesi.	62
Şekil 4.12 Katkı oranı %20 olan numune dayanımlarının kür süresine göre değerlendirilmesi.	63
Şekil 4.13 Katkı oranı %25 olan numune dayanımlarının kür süresine göre değerlendirilmesi.	63
Şekil 4.14 Kür süresi 1 günlük numune dayanımlarının katkı oranına göre değerlendirilmesi.	64
Şekil 4.15 Kür süresi 7 günlük numune dayanımlarının katkı oranına göre değerlendirilmesi.	64

Şekil 4.16 Kür süresi 28 günlük numune dayanımlarının katkı oranına göre değerlendirilmesi.	65
Şekil 4.17 Kür süresi 56 günlük numune dayanımlarının katkı oranına göre değerlendirilmesi.	65
Şekil 4.18 Kür süresi 112 günlük numune dayanımlarının katkı oranına göre değerlendirilmesi.	66
Şekil 4.19 Kür süresi boyunca su kayıplarının değerlendirilmesi.	67
Şekil 4.20 Katkı oranlarına bağlı olarak su kayıplarının değerlendirilmesi.	68
Şekil EK 1.1 %5 katkı oranında likit limit deney grafiği.	80
Şekil EK 1.2 %10 katkı oranında likit limit deney grafiği.	80
Şekil EK 1.3 %15 katkı oranında likit limit deney grafiği.	81
Şekil EK 1.4 %20 katkı oranında likit limit deney grafiği.	81
Şekil EK 1.5 %25 katkı oranında likit limit deney grafiği.	82
Şekil EK 2.1 %5 katkı oranında kompaksiyon eğrisi.	82
Şekil EK 2.2 %10 katkı oranında kompaksiyon eğrisi.	83
Şekil EK 2.3 %15 katkı oranında kompaksiyon eğrisi.	83
Şekil EK 2.4 %20 katkı oranında kompaksiyon eğrisi.	84
Şekil EK 2.5 %25 katkı oranında kompaksiyon eğrisi.	84
Şekil EK 3.1 1 Gün - %0-5 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.	85
Şekil EK 3.2 1 Gün - %10-15 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.	85
Şekil EK 3.3 1 Gün - %20-25 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.	85
Şekil EK 3.4 7 Gün - %0-5 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.	85
Şekil EK 3.5 7 Gün - %10-15 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.	86
Şekil EK 3.6 7 Gün - %20-25 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.	86
Şekil EK 3.7 28 Gün - %0-5 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.	86

Şekil EK 3.8 28 Gün - %10-15 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.....	86
Şekil EK 3.9 28 Gün - %20-25 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.....	87
Şekil EK 3.10 56 Gün - %0-5 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.....	87
Şekil EK 3.11 56 Gün - %10-15 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.....	87
Şekil EK 3.12 56 Gün - %20-25 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.....	87
Şekil EK 3.13 112 Gün - %0-5 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.....	88
Şekil EK 3.14 112 Gün - %10-15 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.....	88
Şekil EK 3.15 112 Gün - %20-25 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.....	88

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Zemin türlerine göre iyileştirme metotları	5
Çizelge 2.2 Stabilizasyon amacına göre uygulanan metotlar	6
Çizelge 2.3 Zemin ıslah yöntemi için yaklaşık maliyetler.	7
Çizelge 2.4 Zemin ıslah yöntemleri ve kullanım amaçları.....	8
Çizelge 2.5 Kimyasal stabilizasyonda katkı seçim rehberi	12
Çizelge 2.6 İnorganik ve organik katkı maddelerinin karşılaştırılması.....	13
Çizelge 2.7 Kireç katkısının önerilen kullanım miktarları.	15
Çizelge 2.8 Farklı zemin türlerine göre kireç oranları.	15
Çizelge 2.9 Zemin türlerine göre zemin iyileştirilmesinde kullanılan optimum kireç miktarları.....	16
Çizelge 2.10 Farklı zemin sınıflarına göre çimento miktarı.....	17
Çizelge 2.11 Geosentetiklerin fonksiyonları.	27
Çizelge 3.1 Zemin numunesinin fiziksel özellikleri.....	37
Çizelge 3.2 Dolomit ham maddesi ve magnezyum cürufunun kimyasal özellikleri	41
Çizelge 3.3 Eksenel basınç deneyi için hazırlanan numune dağılımı.	47
Çizelge 3.4 Elek analizi deney sonuçları.....	48
Çizelge 4.1 Numunelere ait kıvam limit değerleri.	55
Çizelge 4.2 Numunelere ait kompaksiyon değerleri.	57
Çizelge 4.3 Numunelere ait serbest basınç dayanımları.....	59
Çizelge 4.4 Numunelere ait serbest basınç deneyleri sonrası su muhtevası kayıpları. ..	67
Çizelge 4.5 Numunelere ait elastisite modülü değerleri.....	69

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 Derin dinamik kompaksiyon yöntemi.....	21
Resim 2.2 Vibraflotasyon uygulama basamakları.	22
Resim 2.3 Taş kolon uygulaması	28
Resim 2.4 Jet grout uygulama aşamaları.....	29
Resim 2.5 Konsolidasyonu hızlandırmada kullanılan kum drenleri.	33
Resim 2.6 Elektro-osmoz yöntemi.	35
Resim 3.1 Deneyde kullanılacak örselenmiş zemin numunesi.	37
Resim 3.2 Magnezyum elementi.....	38
Resim 3.3 Deneyde kullanılacak magnezyum cürufu.....	40
Resim 3.4 Dane boyutunun hidrometre deneyiyle tespit edilmesi.....	49
Resim 3.5 Casagrande deneyiyle likit limitin tespit edilmesi.	51
Resim 3.6 Standart proktor deney aleti.	52
Resim 3.7 Zemin numunesinin serbest basınç deneyiyle dayanımının tespiti.....	54
Resim 3.8 Zemin numunelerinin gerekli kür şartlarında saklanması.....	54

1. GİRİŞ

İnsanoğlu doğası gereği dış tehditlerden korunma ve konfor alanı oluşturmak için yıllar boyunca barınma ihtiyacı duymuştur. Son yıllarda bu barınma ihtiyacı teknoloji ve modernleşmenin etkisiyle daha kaliteli yaşam arayışlarına dönüşmüştür. Bu arayışı karşılayacak yapıların inşa edilmesi için gereken arazi miktarıda artmıştır. Ancak zemin, araziye inşa edilecek yapıya uygun özellikleri karşılayamayabilir. Yüksek arsa maliyetleri sebebiyle başka bir arazi tercih edilmesi ve arazideki uygun olmayan zemin tabakasının kaldırılıp yerine uygun bir malzeme ile zemin tabakası oluşturma işlemi de ekonomik yönden uygun olmayabilir. Ayrıca artan kentleşme sonucu arazi sayısının yetersiz kalması zeminin iyileştirilip yapıya uygun hale getirilmesi seçeneğini ön plana çıkarmaktadır. Bu sorunu çözmek için geoteknik mühendisliği çeşitli yöntemler geliştirmiştir. Bunlardan en etkiliisi sayılabilecek yöntem ise zayıf mühendislik özelliği taşıyan zemine belirli oranlarda bir veya birden fazla katkı malzemesi eklenerek yüzeysel zemin stabilizasyonunu sağlamaktır. Zemin stabilizasyonu, zayıf mühendislik özelliği taşıyan zemine ait taşıma gücü, geçirgenlik, oturma değerlerinin geliştirmesi amacıyla uygulanmaktadır.

Son yıllarda zemin iyileştirmesinde kullanılabilecek farklı katkı maddelerinin özellikleri konusunda akademik çalışmalar artarak devam etmektedir. Zeminlerin katkı maddeleri ile iyileştirilmesinde genellikle endüstriyel metallerin üretiminde açığa çıkan yan ürünler, kireç, uçucu kül, çimento, asfalt, reçine, kimyasal maddeler gibi katkı malzemelerinin kullanıldığı bilinmektedir. Bunun yanında; köpük beton, talaş, çakıl taşı, yonga, deniz kabuğu, volkanik kül, mermer tozu, atık lastik gibi malzemeler de zemin iyileştirilmesinde kullanılabilirliği söz konusu olmaktadır. Uygun katkı maddesi arayışları için yapılan çalışmalar sonucunda endüstriyel atık malzemelerin katkı maddesi olarak kullanılmasıyla da zeminin işlenebilirliğinin ve mekanik özelliklerinin iyileştiği gözlemlenmiştir.

Cüruf, metallerin veya içeriğinde metal bulunduran cevherlerin, eritildiklerinde açığa çıkan ve metalden daha hafif oksit ve silikat bileşiklerine sahip olan ve yoğunluk farkından dolayı yüzeyde biriken bir yan atık ürün olarak belirtilmektedir. (Ünal ve ark. 2014).

Endüstriyel cüruflar genellikle soğutulup çevreye ve canlı sağlığına zarar vermemesi açısından toprak altına gömülerek bertaraf edilmesi gerekliliğini doğurmuştur. Depolama sahalarının gerekliliği, bertaraf edilme sırasında harcanacak işgücü ve maliyet, ekonomiye büyük ölçüde yük olmuştur. Bu sorunlar karşısında özellikle gelişmiş ülkelerde endüstriyel atıkların çoğunluğu geri kazandırılmaktadır. Cürufların inşaat sektöründe zemin iyileştirmesinde kullanılması geri dönüştürme seçeneklerinden en önemlilerinden birisi olarak görülmektedir. Bu geri dönüşümle işletmelerin depolama ve bertaraf maliyetlerinin azalması sağlanmaktadır. Sonuç olarak cürufların katkı maddesi olarak kullanılması, zeminleri iyileştirmesi amacının yanısıra hem çevreye hem de ekonomiye olan zararı önemli miktarda azaltmıştır.

Gelişmiş dünya devletlerinde olduğu gibi Türkiye’de de endüstriyel atıklarının büyük bir oranı geri dönüştürülebilmektedir. Geri kazandırılmaya ihtiyaç duyulan yan atıklardan biri de ülkemizde de bulunan saf magnezyum metal üretim tesislerinde açığa çıkan magnezyum cürufudur.

Magnezyum gümüş beyazlığında, hafif bir metal olup alaşım maddesi olarak kullanılmaktadır. Saf magnezyumun üretilmesi için ham madde olarak manyezit veya dolomit cevheri kullanılmaktadır. Cevherlerin işlenmesiyle saf magnezyum metali elde edilirken, proses yan ürünü olarak cüruf atık olarak ortaya çıkmaktadır. Cüruf çimento sektöründe, çimento katkısı olarak kullanılmaktayken; hazır beton sektöründe ise öğütme aşamasından sonra beton bileşeni olarak kullanılabilir. Saf magnezyum üretim tesislerinde açığa çıkan magnezyum cürufu, gerek ham madde kaynağı ve ham maddenin işlenme şekli, gerekse kimyasal yapısı ve mekanik performansları açısından incelendiğinde; çimento sektöründe klinker muadili bir ürün, beton sektöründe ise yüksek fırın cürufu veya uçucu kül muadili bir ürün olarak değerlendirilebileceği ortaya çıkacaktır. Üstelik çimento sektörü için kırma işlemine, beton sektörü için ise öğütme işlemine gerek duyulmayacağı için magnezyum cürufu, kullanım kolaylığı açısından ön plana çıkmaktadır.

Bu çalışmada daha önce farklı endüstriyel atıklarla yapılan çalışmalara göre daha az çalışılan magnezyum cürufunun zemin iyileştirilmesinde kullanılabilirliği araştırılmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Zemin Stabilizasyonu

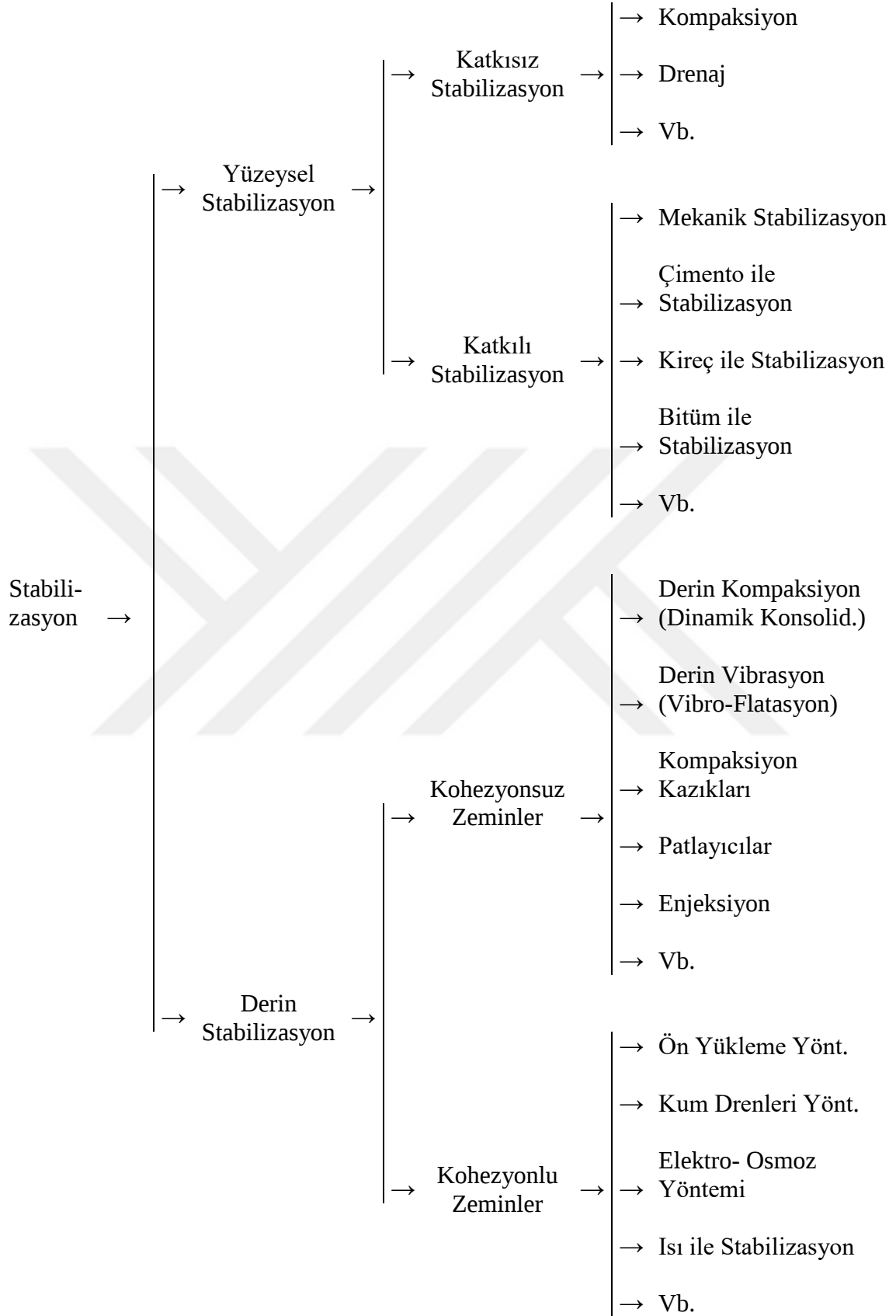
Özaydın (2012)'a göre inşaat mühendisliği uygulamalarında proje sahasındaki zemin özelliklerinin mühendislik tasarımları ve projenin yapım yöntemleri seçimi üzerinde önem arz ettiği bilinmektedir. Bu yüzden bazı proje sahalarında karşılaşılan zemin özellikleri projenin yapılabilir olmasını tayin edecek boyutlarda büyük sorunlar çıkarabilmektedir. Bu gibi durumlarda arazi zemin özelliklerinin iyileştirilmesi geoteknik mühendisliği seçenekleri arasında yer almaktadır.

Özaydın (2012)'a göre zemin stabilizasyonu, zeminlerin belirli özelliklerinin, yapılması amaçlanan mühendislik uygulamasına yönelik olarak, maliyet ve uygulanabilirlik açısından farklılık gösteren fiziksel, kimyasal veya biyolojik yöntemlerden en uygunun seçilip kullanılarak iyileştirilmesi olarak yorumlanabilir. Zeminlerin, arazinin iyileştirilmesi yerine ıslahı, stabilizasyonu ve modifikasyonu gibi aynı anlama gelecek terimler zemin mühendisliği uygulamalarında birbirinin yerine sıkça kullanılmaktadır.

Uzuner (2013)'e göre stabilizasyon (ıslah, iyileştirme, modifikasyon, sağlamlaştırma vb.) zeminin özelliklerinin çeşitli yöntemlerle geliştirilmesine verilen genel bir tanımdır. Stabilizasyonda amaç, projenin özelliğine göre; taşıma gücünü artırmak, oluşabilecek oturmaları, deformasyonları azaltmak, geçirimsizliği azaltmak vb. olabilir.

Lambe, Khosla ve Jayaratne (1990)'e göre zemin çeşidine ve amaçlanan hedefine göre iyileştirme yöntemleri farklılık gösterir. Zeminlerin kimyasal tepkimeler yoluyla çeşitli özelliklerinin iyileştirilmesine kimyasal stabilizasyon adı verilir. Mekanik stabilizasyon ise zeminlerin mühendislik özelliklerinin fiziksel işlemler kullanılarak iyileştirilmesi yöntemine denir.

İnşaat proje sahasında zemin iyileştirmesi için herhangi bir yöntem seçilmesi farketmeksizin standart penetrasyon deneyi (SPT) ve koni penetrasyon deneyi (CPT) gibi arazi deneyleriyle kontrol edilmelidir. Hedeflenen koşullara ulaşıncaya kadar iyileştirme işlemleri farklı yöntemlerle tekrarlanmalıdır. (Kayabalı 2010)



Şekil 2.1 Zemin iyileştirme uygulamaları (Yılmaz 2015).

Çizelge 2.1 Zemin türlerine göre iyileştirme metotları (Hunt 1994).

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

Çizelge 2.2 Stabilizasyon amacına göre uygulanan metotlar (US. Army Corps. of Eng. 2003).

Amaçlar	Stabilizasyon Yöntemleri
Sıvılaşma direncini artırmak, Deplasmanları azaltmak.	Vibrokompaksiyon Taş kolonlar Derin dinamik kompaksiyon Patlayıcı tekniği ile kompaksiyon Çakıl kolonlar Jet grout Kompaksiyon enjeksiyonu Granüler kolonlar (kum ve 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 tekniği 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.	Sürşarj dolgulu ve dolgusuz yüzey drenler Granüler kolonlar (kum ve çakıl)
Konsolidasyon oturmalarını azaltmak.	Sürşarj (Ön yükleme) Jet grout Taş kolonlar Kompaksiyon enjeksiyonu Elektro-osmoz
Sızıntı yollarını kapamak ve/ veya su akımı doğrultusundaki borulamayı azaltmak	Penetrasyon enjeksiyonu Kompaksiyon
Erozyon direncini artırmak	Mekanik stabilizasyon Bioteknik stabilizasyon Kompaksiyon
Çatlaklardan ve bileşim yerlerinden su kaçaklarını engellemek	Kompaksiyon enjeksiyonu
Göçen zeminleri ıslah etmek	Derin dinamik kompaksiyon Enjeksiyon Vibrokompaksiyon

Çizelge 2.3 Zemin ıslah yöntemi için 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 drenler	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	Uygulama-ya 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)

Çizelge 2.4 Zemin ıslah yöntemleri ve kullanım amaçları (Öntürk 2011).

Uygulanan yöntem	Zemin türü		Zemin iyileştirme amacı				
	Daneli	Kohezyonlu	Taşıma Gücü	Oturma Kontrolü	Stabilite	Çevresel Sebepler	Sıvılaşma
Vibrokomp.	✓		✓	✓			✓
Kum Sık. Kazıkları	✓		✓	✓			✓
Kompaksiyon Kazıkları	✓		✓	✓			✓
Dinamik Kompaksiyon	✓		✓	✓		✓	✓
Patlatma	✓		✓				✓
Önyikleme		✓	✓	✓			
Düşey Drenler		✓	✓	✓			
Isıtma		✓		✓			
Soğutma	✓	✓				✓	
Geosentetikler		✓	✓	✓			
Mini Kazıklar	✓	✓	✓	✓			
Fore Kazıklar	✓	✓	✓		✓		
Zemin Çivileri	✓	✓			✓		
Donatılı Zemin	✓					✓	
Derin Karış.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Taş Kolonlar		✓	✓	✓	✓		✓
Permeasyon Enj.	✓		✓	✓	✓	✓	
Çatlatma Enj.		✓	✓	✓		✓	
Komp. Enj.	✓	✓	✓	✓			✓
Jet Enj.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

2.2 Zemin Stabilizasyonun Temel Amaçları

Temel projelerinde tasarım, yapının yüklerini güvenli bir şekilde zemine aktarması amacıyla oturma veya taşıma gücü değerlerinin çeşitli yöntemlerle elde edilmesiyle yapılır. Bu değerlerin farklılıklarına göre tasarımlarda değişiklik göstermektedir. Yapılan tasarıma rağmen zemin yapının yüklerini taşıyamıyorsa zeminin stabilizasyonu gerekmektedir.

Özaydın (2012)'a göre zemin iyileştirmesinin temel amaçları, mukavemet – taşıma gücü artışı, yük altında sıkışmaların (oturmaların) azaltılması, gerilmeler altında

deformasyonların azaltılması, şişme – büzülme potansiyelinin azaltılması, çevresel etkiler (donma – çözülme, ıslanma – kuruma) sonucu olumsuz fiziksel ve kimyasal değişimlerin önlenmesi ve durabilitenin artırılması, su geçirimsizliği, su basınçları oluşumu ve sızıntı suyu kontrolü, erozyon direncinin artırılması, deprem ve tekrarlı yükler altında sıvılaşma, mukavemet ve rijitlik kaybı potansiyelinin azaltılması, temel zemini ve dolgu malzemelerinde değişkenliğin azaltılması, yüzey bozulmalara karşı direncin artırılması olarak belirtilmiştir.

Ayrıca temel amaçların yanında atık malzemelerin değerlendirilmesi, yüzeysel su kaynaklarının korunması için yüzey stabilizasyonu, yeraltı sularının akım yönleri ve kalitesinin korunması, atıkların depolanması, zeminlerden inşaat malzemesi olarak yararlanma gibi çevresel amaçlarda söz konusudur.

2.3 Zemin Stabilizasyonu Yöntemleri

Zemin iyileştirilmesinin gerekliliği, geoteknik açıdan sorunlu zeminlerin tasarım şartlarıyla birlikte değerlendirilerek belirlenir. Öncelikle arazideki mevcut iyileştirilmemiş zemine ilişkin etütlerden elde edilen geoteknik veriler baz alınarak statik ve dinamik yükler altında analiz ve değerlendirmeler yapılır.

Zemin iyileştirme yönteminin seçimini etkileyen faktörler şunlardır:

- Zemin veya kayanın düşey ve yatay yönde değişimi ve özellikleri (ince tane yüzdesi, kıvam, normal konsolide/aşırı konsolide olma, süreksizlikler vb.)
- Yeraltı suyu durumu ve çevresel faktörler
- Öngörülen iyileştirme seviyesi (büyüklüğü)
- Farklı yöntemlerle elde edilebilecek iyileştirmelerin görece büyüklüğü ve yararı
- İyileştirilmesi hedeflenen alan ve derinlik
- Yapıma ilişkin faktörler (iş planı, ulaşılabilirlik, malzemeler, geçit hakkı, ekipman ve işgücü temini vb.)
- Yeni veya mevcut yapılarla etkileşim
- Sonuçların kontrol edilebilirliği
- Bakım, dayanıklılık ve işletme gereksinimleri ve maliyet

2.3.1 Yüzeysel Stabilizasyon

Yüzeysel zemin stabilizasyonu, genellikle yüklemenin fazla olmadığı yapı ve yol projelerinde uygulanan zeminin derinine inmezsizin yüzeysel kısımlarıyla ilgilenilen iyileştirme yöntemidir. Yüzeysel zemin stabilizasyonu katkılı stabilizasyon ve katkısız stabilizasyon olmak üzere iki grupta incelenir.

2.3.1.1 Katkısız Stabilizasyon

Uzuner (2013)'e göre mevcut proje zeminine herhangi bir madde katmaksızın yapılan iyileştirmeye, katkısız stabilizasyon adı verilir. Mevcut proje zeminin granülometresi bu yönteme uygunsa, katkısız stabilizasyon uygulanabilir. Katkısız stabilizasyona örnek yöntemler, kompaksiyon ve drenajdır.

Kompaksiyon Yöntemi:

Özaydın (1989)'a göre kompaksiyon, zeminlerin mekanik enerji uygulanıp sıkıştırılmasıdır. Farklı bir söylemle zemin danelerinin aralarındaki boşlukların azaltılarak birbirine yaklaştırılması ve daha sıkı bir hale gelmeleri için yapılan mekanik işlemlerdir.

Ünlü Şahan (2016)'a göre kompaksiyonda hedeflenen amaç, mekanik araçlar kullanılarak zemindeki daneleri birbirine yaklaştırarak dane boşluklarının azaltılmasını sağlamaktır. Kompaksiyon işlemi sonrası daneler birbirine yaklaştığından dolayı birim hacim ağırlık artacak ve zemin daha iyi zemin özellikleri gösterecektir.

Çakır (2001)'a göre kompaksiyonda zemin daneleri, boşluklardaki havanın dışarı çıkarılmasıyla birlikte birbirlerine yaklaşır. Sıkıştırma işlemi yapıldığında, zeminin geçirimsizliği azalır, aşınabilirliği azalır veya gecikir, sıkıştırılabilirliği azalır, gerçekleşebilecek oturmaları azalır, sıvılaşma yeteneği kaybolabilir, şişme ve büzülme davranışı kontrol altına alınabilir, kayma direnci yükselir ve taşıma gücü artar, birim hacim ağırlığı artar ve zemin dondan aşırı derecede etkilenmez.

Drenaj Yöntemi:

Cedergren (1989)'e göre zemin ile ilgili sorunların büyük bir bölümünün temel nedeni suyun varlığından kaynaklı oluşmaktadır. Su aşırı doygunluk, sıvılaşma ve benzeri sorunlara sebebiyet verir. Kayabalı, & Mollamahmutoğlu (2004)'na göre ise yeraltı suyundan kaynaklanan başlıca mühendislik problemleri sızma basınçlarının meydana gelmesi, barajlarda borulanmanın oluşması, temelde var olan yeraltı suyunun yollarda çökmeye sebep olması ve su tablası altındaki silt ve ince kum zemin yüzünden deprem dalgalarının neden olduğu sıvılaşma örnek gösterilebilir.

Tunç (2001)'a göre drenaj yöntemi, yüzeysel veya yüzey altı drenaj şeklinde ikiye ayrı bölümde değerlendirilir. Yüzey altı drenajı dren boruları kullanarak gerçekleştirilir. Boyuna yüzey altı drenajlarda ise hendeklerle zemin içerisindeki su uzaklaştırılarak dayanım artırılır.

Uzuner (2013)'e göre yüzey drenajında, yağmur vb. yüzey sularının zemin ortamına girmesini, zemin yüzeyinde erozyona yol açmasını vb, önlemek için toplanarak uzaklaştırılması hedeflenir. Yüzeysel (sığ) drenajda, açılan hendeklerle, sular toplanarak uzaklaştırılır. Hendekler, suların akıp gitmesi için eğimli inşa edilerek hendek tabanlarında suyun akışını güvenli bir şekilde sağlayacak düzenlemeler (delikli borular, geotekstiller vb.) yaparak içleri uygun filtre malzemesi ile (kum, çakıl) doldurularak vb. şekillerde oluşturulur.

2.3.1.2 Katkılı Stabilizasyon

Mühendislik özellikleri açısından problemli zeminlere değişik katkı maddeleri ekleyerek fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi işlemine katkılı stabilizasyon denmektedir.

Özaydın (1989)'a göre zeminlerin değişik katkı maddeleriyle karıştırılarak bazı fiziksel özelliklerini geliştirmek ve bununla birlikte belirli mühendislik özelliklerini iyileştirmek mümkün görülmektedir. Katkılı stabilizasyonda sıkça kullanılan katkı maddeleri arasında kireç, çimento, uçucu küller, asfalt ve bazı kimyasal maddeler örnek verilebilir.

Zemin iyileştirmesinde kullanılacak katkı malzemesinin belirlenmesi için oluşturulan tablo Çizelge 2.5’te verilmiştir.

Çizelge 2.5 Kimyasal stabilizasyonda katkı seçim rehberi (U.S. Army Corps. Of Eng. 2003).

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

* K-Ç-P: Kireç-çimento-puzolan kombinasyonu

** $PI \leq 20 - ((50-200 \text{ No.lu elekten geçen yüzde})/4)$

Mekanik Stabilizasyon:

Tunç (2002)’a göre mekanik stabilizasyon; iki veya daha fazla farklı özellikteki zeminlerin uygun oranlarda karıştırılarak istenilen mühendislik koşullarını sağlayan bir zemin haline dönüştürülmesi işlemidir. Böylece yük altında kalıcı deformasyon yapmayan yani stabil bir zemin elde edilmiş olunur.

Uzuner (2013)'e göre mekanik stabilizasyonda; mevcut proje zemininin granülometrisini düzeltmek üzere, farklı zemin katarak veya bir kısım zemini ortamdaki uzaklaştırarak, kompaksiyon işlemi uygulanır. İşin yapılması amacıyla göre, uygun granülometri seçilir (yol temeli, havaalanı temeli vb.).

Zemin iyileştirilmesinde kullanılacak katkı maddesinin organik veya inorganik olmasının üstünlük ve sakıncaları Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.6 İnorganik ve organik katkı maddelerinin karşılaştırılması (Cömert 2005).

Metot	Üstünlük ve Sakıncaları
İnorganik Esaslı (kireç, çimento, uçucu kül, kil vs.)	Malzemeler kolayca temin edilebildiğinden uygulama alanı oldukça geniştir.
	Maliyeti düşüktür.
	İlave edilen malzemeler kimyasal olarak zehirli değildir.
	Stabilizasyon işlemleri kolaydır ve çok özel aletler ve malzemeler gerekmez.
	Hem fiziksel, hem kimyasal olarak uzun süreli stabilitesi çok iyidir.
	Ultraviyole ve radyasyon tehlikeleri yoktur.
	Stabilize edilmiş malzemenin permeabilitesi düşer, mukavemeti artar.
Organik Esaslı (organik polimerler, biyolojik yöntemler vs.)	İyi bir mekanik ve yapısal karakteristik gösterir.
	15 yıldır yapılan işlemlerde başarı sağlanmış ve iyi bir bilgi birikimi elde edilmiştir.
	Yüksek bir fiyatı vardır.
	Çok düşük bir permeabilite elde edilir.
	Birçok atık için uygulanabilir.
	Ultraviyole ışınlarının önlemede tam başarılı sayılmaz.
	Mikroorganizmalar için elverişli değildir.
	Uzun süreli stabilize sağlayamaz.
	İnorganik sistemlere göre uygulanması çok zor ve özel aletler gerekir.
	Bazı sistem bileşenleri için tehlikelidir.

Kireç ile Zemin Stabilizasyonu:

Kızılcelik (2011)'e göre kireç, içeriğinde bolca kalsiyum bulunduran kalkerin kalsinasyonu ile meydana gelen malzemelerdir. Kireç kimyasal yapısında kalsiyum karbonat ve magnezyum karbonat elementlerini bulundurur. Kireç taşına uygun bir şekilde tasarlanmış fırınlarda belirtilen (850-14500°C) ısı aralıklarında pişirilmesi ile oluşan maddelerdir. Kireç taşının pişirilme işlemine kalsinasyon adı verilmektedir. ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$)

Ghabaee (2015)'e göre kireç fiziksel olarak beyaz renk olup ve özelliklerine bağlı olarak farklı çeşitlerinde su ve havayla temasında sertliği artar. Su ile karıştırılıp kullanıldığında bağlayıcı bir malzeme haline gelir. Kalsinasyon tepkimesi sonrasında açığa çıkan CaO (sönmemiş kireç), suyla temas etmesi halinde açığa sönmüş kireç ve ısı çıkar.

Ghabaee (2015)'e göre kireçle iyileştirme yöntemi geçmişten beri kullanılan iyileştirme yöntemlerindendir. Mısır, Çin, Persler, Babiller ve Hititliler gibi tarihte önemli medeniyetler tarafından kullanılarak zeminlerde iyileştirme amaçlanmıştır. Kireç katkısının medeniyetler tarafından kullanılmasının başlıca örneklerinden birisi de Romalılar tarafından yol yapımlarında ve su içi çalışması yapılan inşaatlarda kullanılmış olmasıdır. Erkan (2007)'a göre ise kireç ilk defa modern inşaat uygulamalarında 1924 yılında kullanılmış ve 1930'lu yıllarda da yolların stabilizasyonu işleminde etkili yöntem olarak kullanılmıştır. Kireçle stabilizasyon 2. Dünya savaşı sırasında ulaşım koşullarının ağdaş bir hale gelmesi için yol inşaatlarında kullanılmıştır. Günümüzde ise kireç proje saha temellerinin iyileştirilmesinde ve hava sahalarında, demir ve otoyollarda iyileştirme konusunda etkin kullanılan malzemelerdir.

Yılmaz (2015)'a göre kalsinasyon sonrası açığa çıkan kalsiyum oksitin havada asılı bulunan nem ile anlık tepkimeye girmesi ile amaçlanan iyileştirmenin etkisi azalabilir. İri taneli zeminlerde yapılacak kireçle stabilizasyon sönmemiş kireç ile daha etkin bir hale gelirken, killi ve siltli zeminlerde ise sönmüş kirecin kullanımı fayda sağlamaktadır.

Kireç katkısının çeşitli zemin türlerine göre önerilen kullanım miktarları Çizelge 2.7, Çizelge 2.8 ve Çizelge 2.9’da verilmiştir.

Çizelge 2.7 Kireç katkısının önerilen kullanım miktarları (Ingles ve Metcalf 1972).

Zemin türü	Modifiyeli (%)	Stabilizasyon (%)
İyi derecelenmiş killi çakıl	1-3	3
Siltli killer	1-3	2-4
Plastik killer	1-3	3-8
Yüksek Plastisiteli killer	1-3	3-10
İnce çatlaklı kaya	2-3	Önerilmez
Kumlu killer	Önerilmez	5
Kumlar	Önerilmez	Önerilmez
Organik zeminler	Önerilmez	Önerilmez

Çizelge 2.8 Farklı zemin türlerine göre kireç oranları (Nelson ve Debora 1992).

Zemin türü	Tavsiye edilen yaklaşık kireç miktarı (%)	
	Sönmemiş Kireç	Sönmüş Kireç
Killi Çakıl	2-3	2-4
Siltli Kil	3-8	5-10
Kil	3-6	3-8

Ghabae (2015)’e göre kirecin her zemine katkı maddesi olarak kullanılması uygun değildir. Buna göre organik ve kumlu zemin için kireç kullanımı uygun olmamakla beraber çakıllı zeminler için kullanımı uygundur. Mitchell (1986); Hunter (1988)’e göre kireç ile stabilizasyonda kil zeminlerde içeriğinde sülfat bulunması sebebiyle şişme sorunları meydana gelmektedir. Çalık (2012)’a göre ise kireç stabilizasyonunda zeminlerin sülfat içeriğinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Bundan dolayı zemin içeriğinde sülfat miktarı belirlenmeden yapılan işlemlerde ve genellikle içeriğinde organik madde bulunan zeminlerde kireçle stabilizasyonda uygun sonuçlar gözlemlenmemektedir. Arman ve Moonfish (1972)’e göre zemin içeriğinde %5’ten fazla organik madde bulunduran zeminlerde stabilizasyon işlemi yok denecek kadar az etki yaratır.

Çizelge 2.9 Zemin türlerine göre zemin iyileştirilmesinde kullanılan optimum kireç miktarları (Tunç 2002).

Zemin türü	Zeminin kuru ağırlık yüzdesi
Siltli Kil	2-4
İyi derecelenmiş çakıl	3
Plastik kil	3-8
Yüksek plastisiteli kil	3-10
Kumlu kil	5
Kumlar	Tavsiye edilmez
Organik zeminler	Tavsiye edilmez

Kavak (1996)'a göre kireç kullanılan iyileştirme işleminde zeminde kısa sürede; kuru yoğunlukları, likit limiti azalmakta, plastik limiti ve CBR değerlerini artırmakta, proktor eğrisini ise düzleştirmektedir. Uzun süre bekleme sonunda ise CBR değeri gittikçe artmakta, serbest basınç mukavemeti artmakta, büzülme ile şişmeye karşı stabilite artmakta ve bunun yanı sıra don etkisine karşı direnç de yükselmektedir.

Özaydın (2012)'e göre kireç stabilizasyonu zeminin mukavemetinin ve şekil değiştirme modülünün artmasını, kabarma potansiyelinin ve şişme basınçlarının azalmasını ve dayanıklılığının artmasını (çevre koşulları etkisiyle oluşacak zemin özelliklerinin değişmesinin sınırlı kalmasını) sağlamaktadır. Bu özelliklerin yanında plastisitenin azalmasına sebep olduğundan dolayı arazi çalışma koşullarının iyileştirilmesi konusunda yardımcı olur.

Çimento ile Zemin Stabilizasyonu:

Tumluuer (2006)'e göre çimento; kil, alçıtaşı ve kalkerden oluşan, suyla teması sonrası tepkimeye girip sertleşen hidrolik bağlayıcı maddedir. Portland çimentosu kullanımı yaygın olan çimento çeşididir. Kırılan kil, kalker ve gerekliliğine göre demir cevheri ve/veya kum katılarak öğütülür ve toz haline getirilir. Toz halinde bulunan malzeme 1500 °C'de döner fırınlarda pişirilir. Pişirme işleminden sonra oluşan malzemeye klinker ismi verilir. Klinker elde edildikten sonra içine % 4-5 miktarında alçı taşı ilave edilerek çok ince toz haline getirilir. Buna portland çimentosu denir.

Tumluer (2006)'e göre zemin özelliklerini geliştirmede kullanılan yöntemlerden biri de çimento ile stabilizasyondur. Karayollarında ve hava meydanlarının yapımında genel olarak çimento ile iyileştirme kullanıldığı görülmektedir. Stabilizasyon uygulamalarında zemin ile zeminin kuru ağırlığının %5-15'i oranında çimento karıştırılarak kompaksiyon işlemi yapılır.

Özaydın (2012)'e göre çimento ile stabilizasyonda çimento betonda olduğu gibi zemin daneleri arasında bağlayıcı bir görevde bulunmaktadır. Stabilizasyon işleminin betondan farkı ise çok düşük çimento oranlarında kullanılmasıdır (zemin-çimento karışımı düşük mukavemetli bir beton olarak düşünülebilir). Zeminde zaman-mukavemet ilişkisi betona benzer bir şekilde zemin mukavemetinin artışı çimento oranına bağlı bir şekilde artmaktadır.

Kireç katkısının çeşitli zemin türlerine göre önerilen kullanım miktarları Çizelge 2.10'da verilmiştir.

Çizelge 2.10 Farklı zemin sınıflarına göre çimento miktarı (Tunç 2002).

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

Uzuner (2013)'e göre çimento ile stabilizasyon saf kohezyonlu ve organik zeminler için uygulanmasında yeterli bir yöntem değildir. Stabilizasyon için gerekli optimum çimento miktarı serbest basınç deneyiyle belirlenir. İnce daneli zeminlerde optimum su muhtevassından daha fazla miktarda su katılarak deneyin yapılması daha uygun sonuçlar sunmaktadır.

Bitüm ile Zemin Stabilizasyonu:

Kett (1998); Ilıcalı vd. (2001)'e göre bitüm doğal ya da pirojenik kökenli ve moleküler ağırlıkları farklı olan ağır hidrokarbonların bir karışımı, veya bunların her ikisinin birleşimi olup çoğu kez bunların gaz, sıvı, yarı-katı veya katı halde olabilen ve metal olmayan türevleriyle birlikte bulunan, yapıştırıcı özelliğe sahip ve karbon disülfürde (CS_2) tamamen çözünebilen bir madde olarak tanımlanır. Uzuner (2000)'e göre yapışkan, siyah ve sıcakken sıvı halde bulunan, asfalt vb. petrolden elde edilen ürün bitüm olarak isimlendirilir. Ilıcalı vd. (2001)'e göre bitüm asfalten ve malten olmak üzere iki grupta incelenir. Bitümün n-heptanda çözülen kısmına malten adı verilirken, çözilemeyen kısma ise asfalten adı verilir.

Uzuner (2000)'e göre bitümlü maddelerin önemli özelliklerinden birisi de daneler arasındaki geçirimsizliği azaltmasıdır. İyileştirilecek zemin içerisinde kil ve organik maddelerin olmamasıyla ya daneler arasında yapışmayı sağlar ya da zemini su geçirmez kılarak daneler arasında bulunan suların arasındaki bağlarını korur veya her iki işlemi de aynı anda yapar. Bu stabilizasyon yönteminde katkı maddesi olarak yaklaşık %5-10 oranında asfalt veya katran kullanılabilir. Bitümle stabilizasyon genelde karayolları ve yüzey kaplama işlemlerinde kullanılır.

Özaydın (2011)'e göre bitüm stabilizasyonu zemini suyun zararlı etkilerinde koruyarak, daneler arasındaki bağı güçlendirir. Bitüm sayesinde danelerin yüzeyinin kaplanması zeminin suyun yumuşatıcı etkisinden korunmasına katkı sağlarken iri danelerden oluşan zeminlerde ise kohezyon etkisi oluşturur. Bununla birlikte danelerin birbirine yapışmasıyla zeminin sudan ve rüzgardan kaynaklı erozyona karşı direnç oluşturmalarını sağlar. Asfalt stabilizasyonunun en önemli uygulama yerleri karayolları olarak görülmektedir.

Uçucu Kül ile Zemin Stabilizasyonu:

Anon (2003)'e göre kömürün yanması sırasında yanma sırasında oluşan dumanla yayılan çok ince tanelere uçucu kül adı verilmektedir. Uçucu küller, elektrik ve buhar elde etmek için kömürü yakıt olarak kullanan termik santrallerden elde edilmektedir. Kömürün yakıt olarak kullanması sırasında kömürün yanmasına sağlayacak hava sisteme verilir ve gerçekleşen yanma sonunda küller oluşur. Aksoy (1992)'e göre ise termik santrallerde yakılan kömürden taban külü, cüruf malzeme ve uçucu kül olmak üzere 3 farklı yan ürün malzeme elde edilir. Bu yan ürünlerden uçucu kül en yaygın tercih edilen puzolan olarak 0.09 mm incelikte öğütülmüş kömürlerin 1600°C sıcaklıklara varan fırınlarda yanmasıyla oluşan ve baca yüzeylerinde yapışmış tozlu atıklardır. Mehta (1986)'ya göre havaya yükselmeyen ve baca tabanında büyük taneli olarak elde edilen malzemeye de taban külleri denir.

Türker vd. (2007), (TUIK 2008)'e göre küresel dünyada günümüzde açığa çıkan uçucu kül miktarının yıllık 600 milyon ton kadar olduğu saptanmıştır. Ülkemizdeki santrallerden yıllık ortalama 16 milyon ton uçucu kül elde edilmektedir. Ancak elektrik üretiminin doğalgaz santralleriyle karşılanması sonucu bu değerler yıllık değişmektedir.

Yıldırım (2002)'e göre uçucu kül kimyasal yapısında silika, alümina gibi farklı bileşiklerini barındıran ve yol, alt temel gibi inşaat projelerinde sıkça kullanılan fabrika atık malzemeleridir. Hidrate kireçle reaksiyona girdiğinden dolayı iyileştirme amacıyla kullanılması için gerekli uygun oranlar %10-15 uçucu küle %2-10 oranında kireç katılması gereklidir.

Atanur (1972)'e göre uçucu küllerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için sıkışık-gevşek birim hacim ağırlık, spesifik yüzey, özgül ağırlık ve granülometri deneyleri; stabilite özelliklerinin belirlenmesi için serbest basınç, üç eksenli basınç dayanım deneyleri ve kimyasal özellikleri için ise kimyasal analiz kullanılması gereklidir. Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özelliklerinin oluşmasında kömür çeşidi ve saflığı, yanma sistemi, öğütülme inceliği ve toplama-depolama gibi çeşitli faktörler etkilidir.

Çetin (2011)'e göre zemin stabilizasyonunda kullanılacak uçucu küllerin etkinliğini organik miktarı (LOI), incelik, kimyasal bileşim ve üniformluk etkilemektedir. Uçucu küller, çimento ve kireç gibi kimyasal ve mekanik yöntemler için yüzey stabilizasyonunda etkili bir katkı maddesidir. Kullanım alanı genel olarak şişme ve taşıma gücü sorunu teşkil eden zeminlerdir. Zemin stabilizasyonunda mukavemeti artırır, ek kazı ve dolgu maliyetlerini minimuma indirir, yapım hızını artırır ve taşıma gücünü artırır ve bundan dolayı dolgu kalınlığını azalır. Bazı zemin iyileştirmelerinde ise çimento veya kireçle karıştırılarak daha iyi sonuç elde edilebilir.

2.3.2 Derin Stabilizasyon

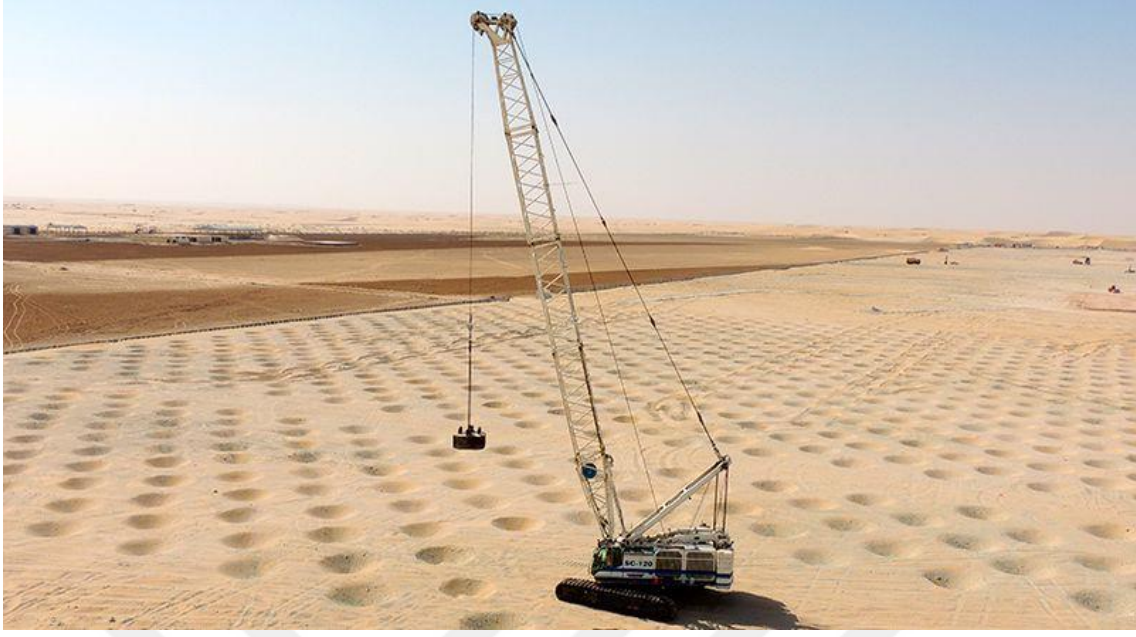
Derin stabilizasyonda, iyileştirme yapılacak proje sahasındaki zeminin kalınlığı 1 m'den birkaç 10 m'ye kadar göz önüne alınabilir. Derin zeminlerdeki iyileştirme işleminde iyileştirme yöntemini kohezyonlu zemin ve kohezyonsuz zemin olarak 2 ayrı başlık üzerinde değerlendirilir. Derin stabilizasyonda iyileştirme sonrası kaliteyi belirlemek için proje sahası içerisindeki bazı noktalarda standart penetrasyon, koni penetrasyon ve presiyometre gibi deneylerle kontrol sağlanır.

2.3.2.1 Dinamik Kompaksiyon

Uzuner (2013)'e göre ağır tokmaklama olarakta adlandırılan bu yöntemde ağırlığı 50-400 KN olabilen bir ağırlık, 5-40 m yükseklikten vinç vb aletler yardımıyla yaklaşık 1 m aralıklarla iyileştirme yapılacak olan zemin yüzeyine düşürülür. Ağırlık betonarme dikdörtgen formunda olup dış yüzeyi saca kaplanmış şekildedir.

Ayan (2009)'e göre çoğunlukla yerleşim bölgelerinde tercih edilen bu yöntemde atık malzemeler ile yapılan doldurma işlemleri ve çakıllı malzemelerin kullanımıyla geçerli sonuçlar elde edilmiştir. Loos (1936)'a göre ise bu yöntem ilk defa 1930'lu yıllarda Almanya'da otoyolların yapımı esnasında kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntem aynı şekilde İngiltere'de 1957'li yıllarda Road Araştırma Laboratuvarında test edilerek kullanılmaya başlanmıştır.

Dinamik kompaksiyon yöntemine ait uygulama alanı ve aracı Resim 2.1'de verilmiştir.



Resim 2.1 Derin dinamik kompaksiyon yöntemi (İnt. Kayn. 7).

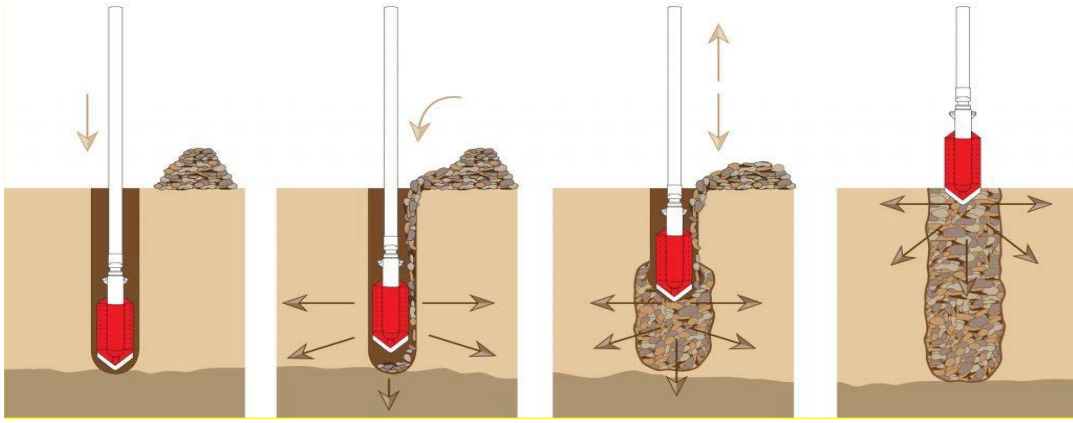
Leonards vd. (1980)'e göre dinamik kompaksiyonun stabilizasyonu gerçekleştirecek zemin alanının 5000 m²'den, ince daneli zeminlerde ise 15000 m²'den fazla olması durumunda diğer yöntemlere göre ekonomik olabileceği belirlenmiştir.

Han (1998); Liang ve Xu (2011)'e göre derin dinamik kompaksiyon plastisite indisi 8'den büyük ve doygunluk derecesi yüksek kil zeminler için uygun görülmemektedir. Ancak bazı ülkelerde kil zeminlerin iyileştirmesinde bu yöntemin kullanıldığı görülmektedir. Menard (1977)'e göre bu yöntemin kohezyonsuz zeminler için kullanılabilirliği fazla olmasına rağmen kohezyonlu zeminler için de uygun sonuçlar elde edilmiştir. Önalp (2002); Uzuner (2000); Das (2002); Tunç (2002)'e göre bu durumda kohezyonlu zeminlerde elde edilebilecek iyi sonuçlar için zemin yapısını bozacak enerji, uygun bir zaman dilimi içerisinde artan boşluk suyu basıncı ve suyun hareketleri için çatlak kanallarının oluşmuş olması gerekmektedir.

2.3.2.2 Derin Vibrasyon (Vibro-flotasyon)

Öksüz (2006)'e göre vibroflotasyon yönteminde 1,5 ile 2,5 m uzunluğunda, 0,3 ile 0,5 m çapında, büyük silindirik şeklinde vibroflot adı verilen vibratör kullanılır. Vibroflotasyon yönteminde ilk olarak vibroflot vinç aracılığıyla proje sahasına getirilir ve vibratörün alt

başlığında bulunan yüksek titreşimli ve basınçlı su sıçratılarak kendi ağırlığıyla zemin içerisine yönlendirilir. Planlanan zemin derinliğine ulaşıldığında su hızı azaltılarak cihazın etki yönü ters yönde değiştirilir. Yüksek basıncı bulunan bu suyla birlikte zemin dolgu malzemesinin su doğrultusundaki alana yönelmesine sebep olur. Bu işlem tekrarlandığı süreçte cihaz etrafında 3 m'ye kadar alan sıkışması oluşur. Vibroflot zemin içerisinden kademe kademe çıkarılır ve işlem yinelenerek devam eder. Bütün uygulama basamakları Resim 2.2'de verilmiştir. Bu metot sayesinde zeminin 15 metre derinliklerine kadar zemin sıkıştırılması gözlenmektedir.



Resim 2.2 Vibroflotasyon uygulama basamakları (Das 2002).

Bu metodun uygun sonuçlar verdiği zeminlerin sıkıştırılmamış kumlu ve suya doymun kaba taneli zeminler olduğu gözlemlenmiştir. Siltlerin zemin içindeki yoğunluğu arttıkça, kompaksiyon etkinliği azalmaktadır. İçeriğinde yüksek oranlarda çakıllı kum ya da çimentolaşmış kum bulunan zeminleri bu yöntem ile iyileştirmek hem uygulanabilirlik hem de ekonomik açıdan oldukça zordur.

Önalp (1983)'e göre sıkıştırma yönteminin farklı bir şekilde direk güç kompaksiyonudur. İnilecek zemin çukuruna vibroflot aracılığıyla yerleştirilen borunun uç kısmına kum malzemesi bırakılır ve daha sonra basınçlı hava sisteme verilir. Havanın zemine verildiği anda kaplama borusu çekilir. Vibroflotla birlikte tekrar ittirilen boru zemindeki kumlu malzemeyi sıkıştırır. Gerçekleştirilen işlemler sonucunda 60 ve 80 cm uzunluğunda kazıklar oluşur.

2.3.2.3 Kompaksiyon Kazıkları

Kompaksiyon kazıklarının amacı, gevşek kum zeminlere çakılarak kumun sıvılaşma riskini azaltmak ve zemin içerisinde bulunan siltlerin taşıma gücünü artırmak, zemini sıkılaştırmaktır.

Öztoprak (2016)'e göre kompaksiyon kazık yöntemi 1950'li yıllarda Japonya'da geliştirilmiş ve günümüz dünyasında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Killi zeminlerin yanı sıra gevşek kumlu zeminleride iyileştirmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu yöntemde su ihtiyacı az olan kumlu zeminlerde en iyi sonuç elde edildiği gözlemlenmiştir. Kil içerikli olan zeminler için yeteri düzeyde uygun sonuç elde edilememektedir. Kompaksiyon kazıkları, gevşek kumlu zeminlerde yoğunluk değerlerini artırır. Ayrıca stabilizasyon amacıyla zemine yerleştirilen çelik kazıklar stabilizasyon sonrasında zeminin iç kısmında bırakılır.

Tumluer (2006)'e göre zeminde sıkıştırma işlemi kazıkların çakılması sırasında oluşan titreşim ve deplasman sayesinde gerçekleşir. Kazıkların çakıldığı zeminde kalması sebebiyle bu yöntem pahalı bir yöntemdir. Kazıkların istenilen düzeyde sıkıştırma sağlayabilmesi için kısa mesafede çakılması gereklidir. Çakılan kazıkların aralarında 1,0-1,5 m açıklık bırakılması sıkıştırma işlemi için gereklidir.

2.3.2.4 Patlayıcılar

Demiröz ve Karaduman (2009)'a göre bu metot gevşek zeminlerdeki zemin içeriğini oluşturan malzemenin daha küçük parçalara ayrılarak sıkıştırılmasını sağlayan zemin iyileştirme yöntemidir. Stabilize edilecek zemin içerisine yerleştirilen belli sayıdaki patlayıcılar ardışık şekilde gerçekleşen ateşlemelerle birlikte patlatılır. Patlama sırasında oluşan hızlı basınç dalgaları sayesinde zeminde sıkışmalar meydana gelir.

Çetin (2006)'a göre patlayıcıların kullanılmasıyla gerçekleştirilen zemin iyileştirilmesi eskiden beri sıkça kullanılan bir yöntem olup, zemin içerisine belli aralıklarla yerleştirilen patlayıcıların patlatılması sonucu oluşan basınç dalgalarının zemini parçalara ayırıp gevşek daneli zeminlerin sıkıştırılması işlemidir. Bu yöntemin diğer yöntemlere oranla etkin, kolay ve ekonomik olması sebebiyle her zaman kullanılabilir olmuştur. Patlayıcı

ile zemin iyileştirmesi yöntemi dinamit ve TNT ile yapılarak 30-40 m derinliğe kadar kullanılabilir. Patlamanın etkinliğini önceden kestirmek zor olduğu için iyileştirme düzeyini de tahmin etmek oldukça zordur.

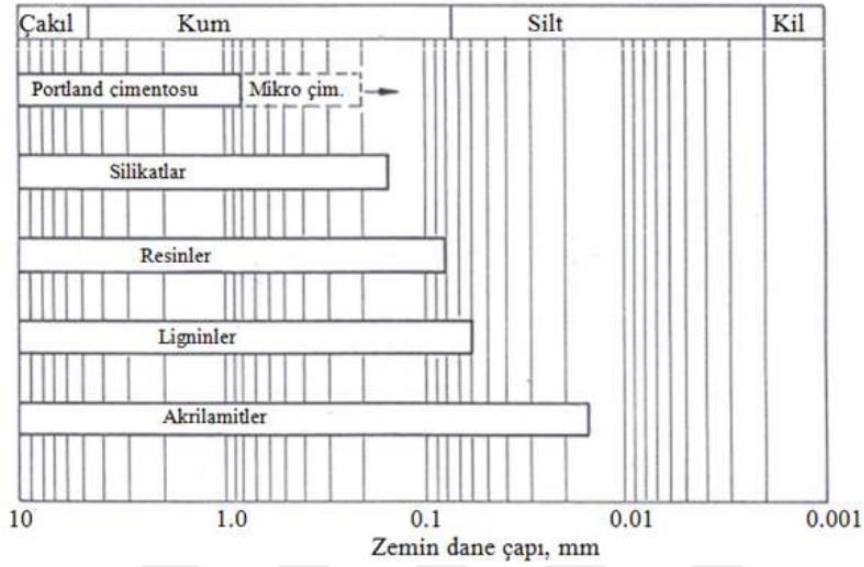
Ünlü Şahan (2016)'a göre patlayıcı mazleme olarak çoğunlukla dinamit, jelatin dinamit, TNT ve ammonit kullanılır. İyileştirmeye yapılacak zemin alanına ulaşmak için farklı bölgelere patlayıcı yerleştirilir. Daha önce yapılan çalışmalarında aralıklı olarak küçük patlamaların tek seferde gerçekleştirilen patlamaya göre daha etkili olduğu saptanmıştır. Gevşek zeminlerde sıkı zeminlere göre daha az miktarda patlayıcı kullanılmalıdır.

Ünlü Şahan (2016)'a göre patlama sırasında oluşacak basınç dalgaları sebebiyle zeminlerde sıvılaşma gözlemlenebilir. Gevşek zeminler göçer ve boşluk suyu basıncı düşerek zeminde sıkılaşma gerçekleşir. Patlama sonrası gerçekleşen göçme sırasında gaz, su çıkışları ve kum zeminlerde kaymalar meydana gelebilir. Patlamalar sonrası üst zeminde sıkışma meydana gelmediğinden dolayı silindir vasıtasıyla sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmelidir.

2.3.2.5 Enjeksiyon

Demiröz ve Karaduman (2009)'a göre zemin enjeksiyonu, genellikle akışkan formdaki malzemelerin yüksek basınçla birlikte zemin içerisindeki boşluklara enjekte edilmesi işlemine verilen isimdir. Proje üst yapılarının yüklerini zeminin sorunsuz bir şekilde taşıyabilmesi için zeminin mühendislik koşullarının uygun olması gerekmektedir. Bu amaçla zeminin geçirimsizliğinin azaltılması, kayma mukavemetinin artırılması ve enjeksiyon işlemi sayesinde zemin danelerin arasındaki bağ kuvvetlendirilip deformasyon direnci artırılır. Bu stabilizasyon yönteminde zeminin gerilme-deformasyon ve dayanım gibi mekanik özellikleri ile geçirimsizlik gibi hidrolik özellikleri iyileştirilerek stabilizasyon elde edilir. Zemin enjeksiyon yöntemi özellikle son 15-25 yıl içerisinde tünel kazımı sırasında zemin yüzeyindeki veya yakın çevredeki yapılarda meydana gelebilecek zararlı oturmaların engellenmesinde, deprem anında sıvılaşabilecek gevşek, suya doygun kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşma potansiyellerinin azaltılmasında ve sorunlu zeminlerin taşıma kapasitesinin artırılması amacıyla kullanılmıştır.

Enjeksiyon işleminde en çok kullanılan kimyasal maddeler silikatlar, kromlignin, reçine akrilamid ve poliüretandır. Enjeksiyon yönteminde kullanılan enjeksiyon malzemelerinin zemin dane boyutuna göre uygulanabilirliği Şekil 2.2’de verilmiştir.



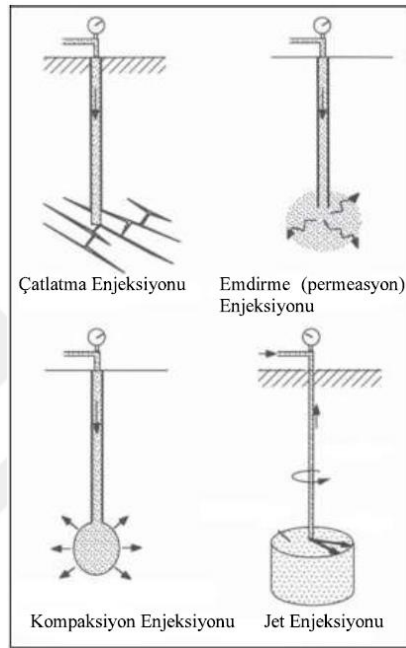
Şekil 2.2 Çeşitli enjeksiyon malzemelerinin zeminlerin dane çaplarına göre girebilme limitleri.

Ünlü Şahan (2016)’a göre enjeksiyonda kullanılacak daneli süspansiyonlar çimento, kil, bentonit ve kum ile birlikte hazırlanan akışkan formda sıvı ortamda küçük katı parçacıkların yer aldığı harçlardır. Bunlara örnek en basit enjeksiyon harcı şekili su ve çimento karışımı harçtır. Bu harç karışımı büyük boşluklu, gevşek ve iri daneli zeminlerde etkili bir kullanım sergilemektedir.

Kimyasal harçlar daneli süspansiyonların yanı sıra Newton sıvıları veya organik reçine olarak da tanımlanan viskozite değerleri suya yakın organik monomerlerden yapılan harçlardır. Kimyasal enjeksiyon malzemesi yer altı sularına karışarak çevreye zarar vermemesi için zehirsiz olmalı, enjeksiyon işlemi süresi boyunca pompalama koşulların aynı düzeyde kalması için özkütle ve viskozitesi değişmemeli, jelleşme süresi dolduğunda ani katılaşma olmalı, zemin içerisinde minerallerden etkilenmemeli ve rekasiyona girerek özelliklerini kaybetmemeli, kolay temin edilebilen ve düşük maliyetli bir malzeme olmalı, zeminin özelliklerine uygun olmalı, enjeksiyon işlemi sırasında pompaya, borulara ve operatöre zarar vermemeli, saklanma koşullarına uygun parlayıcı, yakıcı ve patlayıcı özellikte olmamalıdır.

Kimyasal harçların viskoziteleri düşük olması ve katı parçacıklar içermemesi sebebiyle zemin içindeki küçük boşluklara kadar enjekte olabilirler. Daneli süspansiyonlar, kimyasal enjeksiyona göre daha ucuzdur. Kil zeminlerde ise kimyasal harçlarla stabilizasyon yapılamamaktadır.

Enjeksiyon tekniklerinin şematik gösterimi Şekil 2.3’te verilmiştir.



Şekil 2.3 Enjeksiyon tekniklerinin şematik gösterimi (Tunçdemir 2004).

2.3.2.6 Geotekstiller

Geosentetikler, geoteknik projelerde kullanılmak amacıyla üretilen, endüstriyel malzemelerdir. Geosentetik malzemeler kullanım özelliklerine göre çeşitli şekillerde üretilir; geotekstil, geogrid, geonet, geomembran, geokompozit, geosentetik kil örtü (GCL), geohücre, geoköpük. Petek modelinde üç boyutlu olarak üretilen geohücre ve kübik blok formunda üretilen geoköpük hariç diğer tüm geosentetikler iki boyutlu ya da düzlemsel şekilde üretilir. Geosentetikler ayırma, filtreleme, drenaj, güçlendirme, bariyer ve erozyondan koruma işlemine göre amaçları bakımından sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma Çizelge 2.11’de verilmiştir.

Çizelge 2.11 Geosentetiklerin fonksiyonları (Han 2015).

Sınıfı	Ayırma	Filtreleme	Drenaj	Güçlendirme	Erozyondan koruma	Bariyer
Geotekstil	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Geogrid				✓		
Geonet			✓			
Geomembran	✓				✓	✓
GCL	✓				✓	✓
Geohücre				✓	✓	
Geokompozit	✓	✓	✓	✓	✓	✓

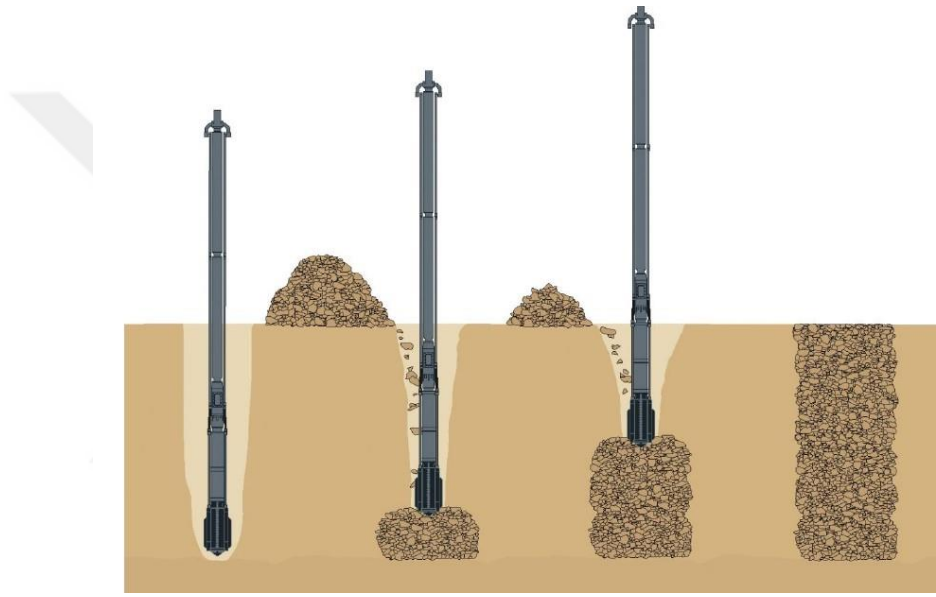
Geotekstillerin kullanım amacı genel olarak kıyı koruması, zemin ve taşların sıkıştırılması, su altı şev ve dalga tesirlerinden koruma, düşey perde, kapiler koruma, erozyon kontrolü, hendek drenajı olarak tanımlanabilir. Genel amaçlar dışında geotekstilller, geomembranların yırtılmasını engellemek amacıyla geomembranla birlikte kullanılır ve geomembranın tamamlayıcısı olarak amacına uygun bir şekilde çalışmasına olanak sağlarlar.

Geosentetikler iri daneli ve ince daneli zemin arasına ayırma amacıyla yerleştirilerek üst yapıdan kaynaklı oluşan dinamik veya statik yükten dolayı meydana gelen malzeme karışmasını önler. Ayrıca süreklilik, esneklik, deforme olabilme, permeabilite ve yüksek çekme dayanımı özelliklerinin gerekliliği olan suyun olağan hareketine engel olmaksızın farklı zemin özelliklerine sahip iki zemini ayrı bir şekilde çalıştırır. Bu ayırma özelliği sayesinde genellikle yol inşaatlarında iki farklı tabakayı birbirinden ayırdığı için yolların servis ömrünü ve taşıma kapasitesini artırdığından tercih edilir.

2.3.2.7 Taş Kolonlar

Demir (2007)'e göre taş kolonlar ilk defa 19. yy. 'da Fransa'da doğal zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Avrupa'da 1950'den, Amerika'da 1972'den sonra kullanılmaya başlanmıştır. Durgunoğlu vd. (1992)'e göre ise Türkiye'de taş kolon kullanımı ise ilk defa 1990'lı yıllarda Borçelik Gemlik Soğuk Hadde Fabrikası'nda gerçekleşmiştir.

Özdemir (2007)'e göre taş kolonların kullanıldığı zeminler genel olarak yumuşak ve orta katı kil zeminlerde, geoteknik açıdan sorunlu zemin tabakası kalınlığının genellikle 10 m'den az olduğu zeminler olarak tanımlanmıştır. Taş kolon yöntemi sonrasında oturma problemleri %50-60 oranında azaltılabilmekte ve taşıma kapasitesinde ise çok daha yüksek değerler elde edilmektedir. Ayrıca bu yöntem az kohezyonlu ince daneli (killi siltli) zemin çeşitlerinde sıvılaşma probleminde de kullanılmaktadır. Taş kolon uygulaması Resim 2.3'te verilmiştir.



Resim 2.3 Taş kolon uygulaması (İnt. Kayn. 9).

Ünlü Şahan (2016)'a göre zeminin taş kolon sonrası ilişkisini etkileyen faktörler arasında zeminin drenajsız mukavemeti, yatay jeolojik gerilme, radyal gerilme-birim boy değiştirme özellikleri, başlangıçtaki kolon boyutu, kolon malzemesinin özellikleri yer almaktadır. Uygulama sonrası taş kolon taşıma kapasiteleri genellikle 200-350 kN aralığında ölçülmektedir.

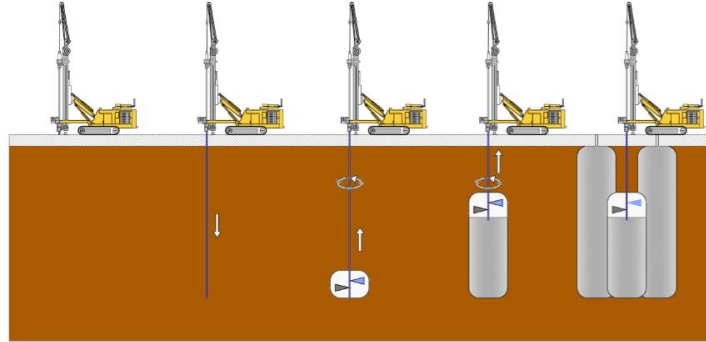
2.3.2.8 Jet Grout

Karol (2003)'e göre Japonya'da 1965 yılında ortaya çıkan ve stabilizasyon özelliği bulunan akışkan formda malzemenin zemin içerisine pompalanmasıyla zemin kütlelerini kesip sürekli ve istikrarlı kolonlar oluşturma işlemine jet grout adı verilir. Ünlü Şahan (2016)'a göre jet grout yöntemi, zemin stabilizasyonu veya yapı yükünün daha derindeki

sağlam zemin katmanlarına ulaştırılması amacıyla iyileştirmesi planlanan zeminderinliğine kadar zemine delgi işlemi yapılması ve yüksek basınç altında genellikle su ve çimento enjeksiyonuyla kolonlar oluşturulma yöntemidir. Yüksek basınç altında yapılan enjeksiyon, zeminle karışarak homojen ve sürekliliği olan bir yapı özelliği gösteren kolonlar meydana getirir.

Welsh vd. (1986) tarafından yapılan çalışmalarda ise jet grout işlemi yüksek basınç uygulayan su jetleriyle kesilmeye uğramış zeminin yerine eşzamanlı ve kontrollü bir şekilde yerleştirilen çimento enjeksiyonu olarak tanımlamışlardır. Jet grout yönteminde enjeksiyon malzemesi, sorunlu zemine yüksek hızda enjekte edilir, zeminin doğal yapısını bozar ve zemin ile birlikte içerisine uygulanan enjeksiyon karışımı birleşerek yeni zemin özelliklerine sahip malzeme oluşturur. Bu yeni oluşan malzemeyle birlikte zeminin elastisite modülü ve taşıma gücü artış gösterirken zemin geçirimsizliği azalmaktadır. Bu oluşan yeni malzeme homojen ve sürekli yapıda olduğu için karakteristik özellikleri önceden tespit edilebilir.

Jet grout yöntemine ait uygulama aşamaları Resim 2.4'te verilmiştir.



Resim 2.4 Jet grout uygulama aşamaları (İnt. Kayn. 8).

Ünlü Şahan (2016)'a göre jet grout yöntemi alüvyon zemin, zemin kil, silt, kum ve çakıl dahil tüm dane boyutundaki zemin stabilizasyonlarında kullanılabilir. Tüm zemin çeşitlerinde uygulanması sebebiyle geniş kullanım alanlarına sahiptir. Bu kullanım alanları amacına göre sıvılaşma sorununun önlenmesi, temel takviyesi, kazı tabanından su gelmesini önlenmesi, şev stabilitesi, geçirimsizlik perdesi olarak sınıflandırılabilir.

2.3.2.9 Derin Karıştırma Yöntemi

Kayabalı ve Mollamahmutoğlu (2004)'a göre stabilizasyon yöntemlerinde zeminin kayma mukavemetinin arttırılması, geçirirmliliğinin azaltılması ve zararlı maddelere karşı dayanıklılığının geliştirilmesi amacıyla kullanılan yöntem derin karıştırma yöntemidir. Bu yöntem stabilizasyon malzemesi ile sorunlu zemini jet ve burgular yardımıyla fiziksel olarak karıştırarak uygulanır.

Kayabalı ve Mollamahmutoğlu (2004)'a göre derin karıştırma yöntemi uç kısmında palet bulunan, ortası delik ve içi boş bir burgu aleti ile veya kanatlı karıştırıcılar yardımıyla sorunlu zeminle stabilize edici bağlayıcı malzemeleri karıştırıp rijit kolonlar elde etme işlemidir. İyileştirilmiş bir tabaka elde etmek için yapılan kolonların birlikte bir bütün gibi çalışması sağlanabilir.

Doru (2014)'a göre derin karıştırma yöntemi sonrasında, zeminin kayma mukavemetinin artması, geçirirmliliğinin azalması ve zarar verebilecek malzemelere karşı dayanıma sahip olmaları istenir. Zemine sağlamlık kazandıracak malzemeler olarak sönmüş kireç, cüruf, çimento ve çeşitli katkı malzemeleri kullanılabilir. Zemin içerisine uç kısmı delik burgu gövdesi indirildikten sonra boru içerisinden pompalan bağlayıcı malzeme zemine karıştırılır. Kullanılması amaçlanan bu malzemelerin stabilizasyon çalışmalarında ortalama %20 ile %30 oranlarında karıştırılmasının uygun olduğu belirtilmiştir.

Bagherinia (2013)'a göre bu yöntem sonrası elde edilen kolonlar uygulama şekillerine göre duvar tipi, kafes veya blok şeklinde meydana gelebilir. Elde edilen kolon çapları yaklaşık 0,6 m - 1,2 m, derinlikleri ise yaklaşık 40 metre olarak ölçülmüştür.

Derin karıştırma metodu ile kolon imalatı yapılmadan önce iyileştirme düzeyinin optimum şekilde gerçekleşmesi için arazi ve laboratuvar deneyleri ile kullanılacak sistem enerjisi ve sorunlu zemin türüne uygun bağlayıcı katkı malzemesinin belirlenmesi gereklidir.

2.3.2.10 Kireç Kazıkları

Horne (1964)'e göre kireç kuyusu veya kazığı yöntemi eskiden beri Çin'de kullanılmakta ve sönmemiş kirecin (CaO) kuyular içerisinde sıkıştırılmasıyla gerçekleşir. Bu yöntem özellikle su içeriği %50'den fazla ince siltli ve siltli kil zeminlerde etkili sonuçlar vermiştir.

Demiröz ve Karaduman (2009)'a göre tepkime sırasında meydana gelen hidrasyon sonucunda, kirecin kendi hacminde yüksek bir artış meydana gelir ve bu hacim artışı yöntemin uygulandığı kuyu içerisinde 1250 ile 1400 kPa aralığında yüksek basınç oluşturur. Bu yüksek basınç ise zeminde radyal oturmalarla sebebiyet verir. Günümüzde gerçekleşen çalışmalarda 10 metre derinlik seviyesinde yapılacak kuyu için kazık genişliği 30 santimetre olacak şekilde 1-2 m aralıklarla zemine yerleştirilir.

Ayan (2009)'a göre proje sahasında stabilizasyon veriminin kaybolmaması için kireç kazıkları sırasıyla kum kazıkları ile değiştirilir. Bu şekilde yapılan stabilizasyon işlemi daha ekonomik şekilde sonuçlanır. Bu yöntem sayesinde su ve kum zeminden kazıklar yardımıyla uzaklaştırılır. Handy ve Williams (1967)'e göre kireç kazıkları, uygulanan zeminin kayma direncini ve şevdeki hassasiyetini olumlu yönde etkiler.

2.3.2.11 Ön Yükleme Yöntemi

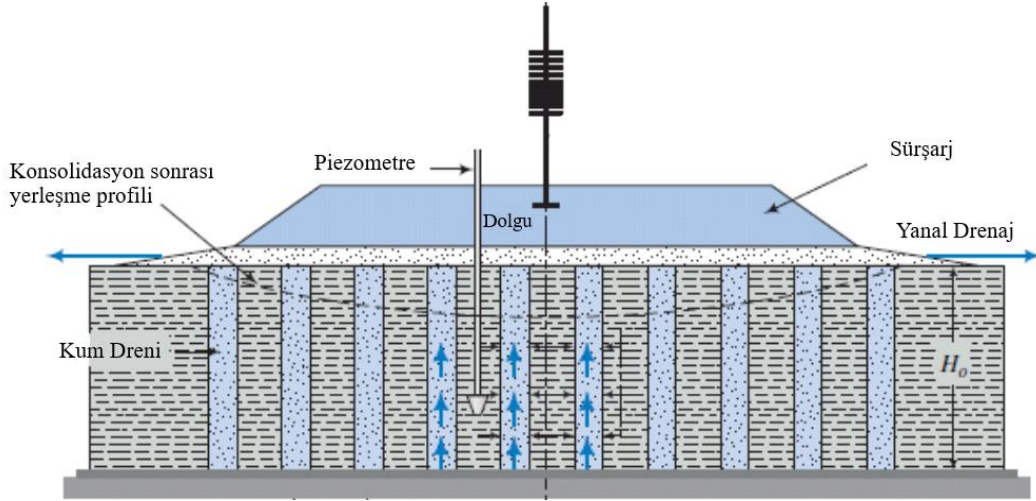
Uzuner (2013)'e göre kohezyonlu ve suya doygun sorunlu zemin üzerine kum, çakıl malzemeleriyle dolgu yaparak ön yükleme yapılması yöntemidir. Bu iyileştirme yönteminin amacı zemin dayanımının artırılarak oturma değerlerinin azaltılmasının sağlanmasıdır. Ön yükleme yöntemi sayesinde proje sahası üzerinde yapılması planlanan yapının inşası öncesinde yapının zemine uygulayacağı yükten daha fazla yük zemine uygulanır. Bunun sonucunda zeminde oluşacak gerilmeler ve oturmalar öngörülerek zemin iyileştirilir. Nihai oturma gerçekleştiğinde zemin üzerine yerleştirilen dolgu malzemeleri kaldırılarak yapı inşa edilebilir hale getirilmektedir.

Demiröz ve Karaduman (2009)'a göre Önyükleme yöntemi ile hızlandırılan oturma süreci yapının bulunduğu zeminin killi, yumuşak ve aşırı sıkışabilir halde olması durumunda çok başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir. Ayrıca önyükleme sırasında bekleme süresini daha da azaltmak için zemin içine düşey kum drenaj kolonları ya da yapay drenaj levhaları yerleştirilerek yöntemin başarı oranı yükseltilebilmektedir. Bu durum zemin içerisindeki suyun hem düşey yönde hem de yatay yönde hareket ederek drenaj kanalları aracılığıyla zemin içerisinde uzaklaştırılmasıyla gerçekleşir. Böylece zemin tabakasının oturma süreci oldukça kısalmır. Önyükleme yöntemi diğer yöntemlere göre daha ekonomik olmakta ancak zemin oturma sürecinin tamamlanma süresi daha uzun olmaktadır. Önyükleme yönteminde yumuşak zeminde gerçekleşecek oturmaya hızlandırmak için yerleştirilen dolgu yükü drenaj işleminin kolay gerçekleştiği granüler malzemeler (kum ve çakıl) olmalıdır. Önyükleme sırasında meydana gelecek oturma esnasında sıkışan zemin içerisindeki suyun hemen dışarıya tahliye edilmesi gerekmektedir. Bu yöntem genellikle organik içerikli veya içerisinde organik madde bulunmayan tüm killi zeminlerde, bataklık zeminlerde ve hatta içeriğinde %20-%3000 su bulunduran zeminlerde bile başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir.

2.3.2.12 Kum Drenleri Yöntemi

Demiröz ve Karaduman (2009)'a göre kum drenleri, zemine çakılmış bir kazık aracılığıyla ve zemini delme veya burgu yardımıyla delip zemini çıkararak oluşturulan temiz kum filtresi görevi gören kolonlardır. Önyükleme ile gerçekleşmesi planlanan konsolidasyon oturmaları çok uzun sürede tamamlanmaktadır. Oturma sürecini hızlandırmak için düşey kum drenleri zemin içerisinde inşa edilerek zemindeki suyun dışarıya tahliyesi hızlandırılır. Dren kuyularına konacak kum filtrelerin drenaj özelliği yüksek ve kapiler boşluğu sahip uygun bir dane boyutunda olmalı ve yerleştirilmeleri sırasında yeteri düzeyde sıkıştırılmalıdır.,

Kum drenleri uygulamasına ait şematik gösterim Resim 2.5'te verilmiştir.



Resim 2.5 Konsolidasyonu hızlandırmada kullanılan kum drenleri (İnt. Kayn. 10).

Menard ve Boise (1975)'e göre düşük permeabiliteye sahip killerde oturma hızı, bu yöntem sayesinde kil zemin içerisindeki drenaj suyunun tahliye yolunu kısaltarak artırılabilir. Uygulanan bu yöntemle birlikte konsolidasyonu hızlandırma amacıyla ek dolgular da yapılabilir.

Demiröz ve Karaduman (2009)'a göre kum drenleri konsolidasyon oturmalarına tek başına yeterli olamayacağı için önyükleme yöntemiyle birlikte uygulanmaktadır. Uygulama aşamasında kum drenler genellikle 30-45 cm çapında ve yerleşiminde kare veya üçgen şekiller oluşturacak şekilde 1.5-3 metre belli aralıklarla dizayn edilirler.

2.3.2.13 Vakum ile Ön Yükleme Yöntemi

Terashi ve Juran (2000)'a göre vakum uygulaması yöntemiyle gerçekleştirilecek oturma suya doygun yumuşak kil zeminlerin dolgu ile yüklenecek göçmesine sebep olmaksızın zemin stabilizasyonunun gerçekleşmesini sağlayan etkili bir yöntemdir. Stabilizasyonu planlanan zeminin etrafı hava geçirmez bir membran sayesinde kaplanarak ve sonrasında çift venturi vakum pompası kullanılarak bu membran altında vakum oluşması sağlanır. Bu yöntem ile 4.5 m yüksekliğinde yapılacak normal ek dolgunun sağlayacağı oturma düzeyleri eşdeğer olacaktır.

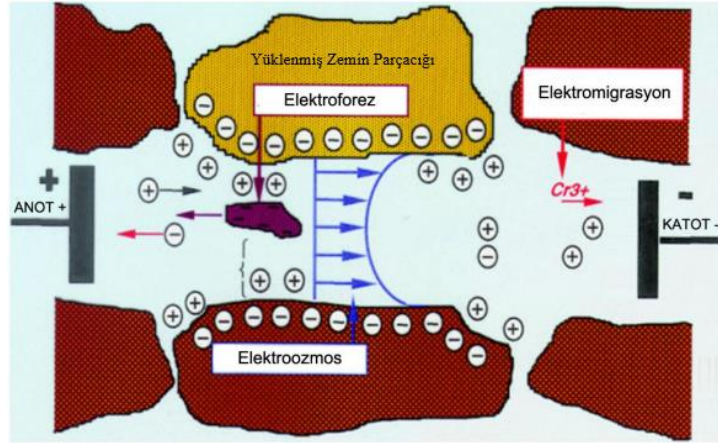
Terashi ve Juran (2000)'a göre vakum uygulamasıyla gerçekleşecek konsolidasyon, normal mekanik ön yükleme yönteminde olduğu gibi toplam gerilmeleri artırarak zemin kütleindeki etkin gerilmeleri artırmak şeklinde olmamakla birlikte, toplam gerilmeyi sabit tutup oluşacak boşluk suyu basıncını azaltma yoluyla sağlanmaktadır.

2.3.2.14 Elektro-Osmoz Yöntemi

Sağlamer (2011)'e göre elektro-kinetik olarak tanımlanan elektro-osmoz yöntemi ince daneli olan zeminleri iyileştirmek amacıyla zemin içerisine doğru akım uygulanarak zemindeki su seviyesinin azaltılmasıyla zemindeki oturmaları hızlandıran bir metottur.

Uzuner (2013)'e göre ince daneli kohezyonlu zeminlerde oturma, mukavemet ve deformasyon özelliklerinin iyileştirilmesi için zemine doğru akım uygulanarak yer altı su düzeyinin azaltılması ile konsolidasyon işleminin hızlandırılmasıdır. Bunun için zemin içerisine katot ve anot görevi gören metal çubuklar yerleştirilir ve bu çubuklar arasında doğru akım oluşturularak zemin içerisinde inşa edilen kuyulardan su tahliye edilir.

Ünlü Şahan (2016)'a göre anottan katota doğru oluşacak akım esnasında negatif boşluk basıncı meydana gelir ve toplam gerilme sabit kalacağından dolayı efektif gerilme artarak oturmaya ortam oluşturur. Rittirong ve Shang (2016)'e göre konsolidasyon miktarı anotta en fazla, katotta ise en azdır. Katotun kendisinde ise oturma gözlemlenmeyecektir. Elektro-osmoz yöntemi zemin için daha düşük bir su içeriği, daha etkin sıkışabilirlik, daha yüksek bir dayanım sağlamaktadır. Suyu doymun bir kil zemine uygulanan doğru akım zemin içerisindeki iyon ve mineral değişimine yol açabilecek elektrokimyasal bir sertleşmeden dolayı dayanımda ek bir artış, plastisitede de bir azalış gözlenebilmektedir. Elektro-osmoz uygulamasına ait şematik gösterim Resim 2.6'da verilmiştir.



Resim 2.6 Elektro-osmoz yöntemi (Mosavat vd. 2012).

2.3.2.15 Isı ile Stabilizasyon

Kayabalı ve Mollamahmutoğlu (2004)'a göre bir diğer adı termal işlemler olan ısı işlemler, zemin kayma direncini artırmak, geçirimsiliği azaltmak veya deformasyon modülünü arttırmak için sorunlu zeminin ısıtılarak veya zemin suyunun dondurulmasıyla gerçekleştirilen stabilizasyon işlemlerdir. Bu stabilizasyon yöntemlerin ekonomik olmaması sebebiyle kullanımı tercih edilmemelidir. Isıl işlem ile zemin stabilizasyonu ısıtma ve dondurma metodu olmak üzere iki farklı şekilde uygulanabilir. Dondurma metodu geçici bir metot olmasının arağmen ısıtma metodu kalıcıdır. Ancak ısıtma metodu ekonomik ve pratik bir işlem olarak tanımlanmaz.

Terashi ve Juran (2000)'a göre ısıtma işlemi bir diğer adıyla camlaştırma işlemi zemin bileşenlerini kristal ya da cam formunda ürünler haline getirir. Bu metotta zemin danelerini ısıtarak zeminin fiziksel özelliklerini modifiye etme amacıyla elektrik akımı kullanılır. Elektrik akımı haricinde hava sıcaklığının normal seyrettiği anlarda bile ince daneli zeminlerin özellikleri desikasyon (kuruma) yoluyla iyileşme göstermektedir. Kuruma işlemi birçok kez ıslah edilmiş çamur zeminlerin yüzeylerinde kuru kabuk oluşum göstermektedir. Normal hava sıcaklığıyla ıslah edilen zeminin ıslah süreci çok yavaş olmasından dolayı kurumuş tabaka kalınlığı birkaç metreyi bulmaktadır. Zeminin yapay bir şekilde ısıtılma işlemi ise diğer metoda göre çok daha verimli olup iyileştirme miktarına göre zemine uygulanacak sıcaklık 300° ile 1000° C arasında değişmektedir.

Ayan (2009)'a göre ısıtma ile zemin stabilizasyonu genellikle doğu blok ülkelerinde kullanılmıştır. Romanya ve Rusya'da ise kullanıma yönelik bazı teknikler geliştirilmiştir. Geliştirilen rus tekniğine göre iyileştirme uygulanacak sondaj kuyusunda benzin veya gaz sıvı yakıtın yakılmasıyla oluşacak yüksek sıcaklık sayesinde zeminin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu sondaj kuyuları 3 m aralıklarla ve 15 m derinlikte açılır.

Dondurma metodu genel olarak yer altı su seviyesinden düşük derinliklerde akma ve göçme eğiliminde olan zeminlerde kullanılan ve tünel, açık kazı ve yer altı kazılarının zemin durabilitesini sağlayan ayrıca yer altı suyunun da kontrolünü mümkün kılan bir yöntemdir. Zemin içerisine 1,2-2 m aralıklarla yerleştirilen borular yardımıyla CO₂, CaCl₂, MgCl₂ veya sıvı nitrojen (NL₂) pompalanarak zemin sıcaklığı düşürülür. Sıvı nitrojen ve sıvı karbondioksit kullanımı diğer gaz ve sıvılara göre daha hızlı dondurma işlemi gerçekleştirdiği için tercih edilir. Genel olarak dondurma metodunun uygulanabilmesi için su içeriğinin %10'dan fazla olması ve kil zeminler hariç her zemin türü olması gerekmektedir. Bununla birlikte yer altı suyunun hareketli olması dondurma metodu için istenmeyen bir durumdur. Ayrıca bu metod maliyet olarak yüksek bir zemin iyileştirme yöntemidir.

3. MATERYAL ve METOD

3.1 Materyal

3.1.1 Zemin

Deneyisel çalışmalarda kullanılacak olan ince daneli zemin numunesi Afyon Kocatepe Üniversitesi kampüs içerisinde işlem görmemiş bir alandan temin edilmiştir. Alınan zemin numunesi çuvallar içerisinde örselenmiş biçimde laboratuvar içerisinde oda sıcaklığında saklanmıştır.



Resim 3.1 Deneyde kullanılacak örselenmiş zemin numunesi.

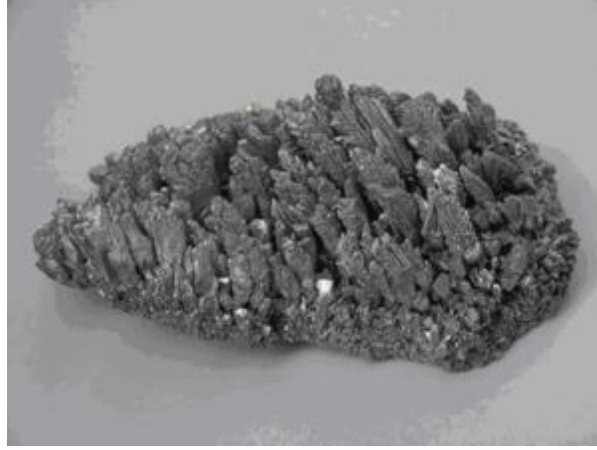
Zemin numunesine ilk önce ASTM standartlarına göre elek analizi uygulanarak dane çapı dağılımı elde edilmiştir. Zemin numunesine ait elek analizi ve kompaksiyon değerlerinin yer aldığı fiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Zemin numunesinin fiziksel özellikleri.

Zemin Özellikleri	Değer
0,075 mm > (%)	8,02
4,76 mm > (%)	96,59
Zemin Grup Sembolü	SC
Likit limit (%)	35,96
Plastik limit (%)	21,9
Plastisite İndisi (PI)	14,06
Özgül ağırlık (kN/m ³)	2,57
δ_{dmax} (g/cm ³)	1,6
Wopt (%)	18,6

3.1.2 Magnezyum

Magnezyum, sembolü "Mg" ve atom numarası 12 olan kimyasal bir element olmakla birlikte periyodik tabloda ikinci sütunda bulunan (grup 2 veya alkali toprak metaller) diğer beş element ile fiziksel özellikleri bakımından değerlendirildiğinde benzerlik gösteren parlak gri renkte ve katı yapıda bir elementtir. (İnt. Kayn. 3)



Resim 3.2 Magnezyum elementi (İnt. Kayn. 11).

Magnezyum, hayatın devamı element ve mineral özellikleri itibari ile önemli maddelerden biri haline gelmiştir. Magnezyum alaşımları endüstride, mineralleri ise insan vücudunda büyük bir kullanıma sahiptir. (İnt. Kayn. 6)

3.1.2.1 Özellikleri

Magnezyum, periyodik tabloda bulunan tüm toprak alkali metal grubu içerisinde en düşük erime noktasına (649.85 °C) ve en düşük kaynama noktasına (1089.85 °C) sahip elementtir. Bu element havayla teması sırasında hafifçe kararır, ancak saklanması için diğer ağır alkali toprak metaller gibi oksijensiz bir ortama gerek duymaz. Bunun sebebi magnezyumun dış yapısında koruyucu bir oksit tabaka bulunmaktadır. Alüminyumdan 3 kat daha yoğun olmasının yanında en hafif metallerin arasında yer bulur. Kristal yapısı itibariyle hekzagonalıdır. Toz halde bulunan magnezyum havada kolayca tutuşabilir ve etrafına parlak bir ışık yayar. (İnt. Kayn. 6)

Magnezyum elementi, miktarına göre evrende en çok bulunan dokuzuncu Dünya'da ise en çok bulunan dördüncü elementtir. Dünya kütlelerinin %13'ünde ve gezegenin mantosunun büyük bir bölümünde varlık gösterir. Deniz suyunda çözünmüş halde bulunan sodyum ve klordan sonra en yaygın üçüncü elementtir. Saf hali doğada bulunmaz. Gezegenimizin yerkabuğundaki minerallerin yaklaşık yüzde 3'ü magnezyum elementi içerir. (İnt. Kayn. 2) Magnezyum kaynağı olarak magnezit ve dolomit gibi mineraller öne çıkar. Dünya üzerindeki en büyük magnezyum kaynağı deniz suyudur. Bunun yanısıra mineral kayaçlar ve asbest (magnezyum hidro silikat) de magnezyum

kaynağı olarak gösterilir. Manyezit, karbonat bileşiği olarak doğada sıklıkla bulunur. Karnalit, kieserit, kainit ve polihalit magnezyum içeren mineraller arasında gösterilmektedir. (İnt. Kayn. 5)

3.1.2.2 Kullanım Alanları ve Rezervleri

Magnezyum, demir ve alüminyumdan sonra en çok kullanılan üçüncü metal olup ana uygulama alanları alüminyum alaşımları, kalıp döküm (çinko ile alaşımlı), demir ve çelik üretiminde kükürdün giderilmesi ve Kroll işleminde titanyumun üretilme işlemleridir. Magnezyum, malzemeleri hafifletmek amacıyla alüminyum alaşımlarına karıştırılır. Örnek olarak, silisyum karbür nanopartiküller ile magnezyum elementinin birleştirilmesiyle yüksek mukavemetli malzeme açığa çıkar. (İnt. Kayn. 6)

Magnezyum, tıptan endüstriyel alanlara kadar gelişmiş birçok alanda geniş kullanımı olan önemli bir elementtir. Hafif olması sanayide birçok üründe tercih edilmesini sağlamaktadır. Çoğunlukla başka metallerle birlikte kullanılarak alaşım maddesi görevi görür. Magnezyum-alüminyum alaşımları hafif ve yüksek mukavemetinden kaynaklı olarak dolayı uçak, füze ve roket gövdelerinde sıklıkla kullanılır. Ergimiş demir ve çelikten kükürt maddesini arındırmak için magnezyum elementi büyük rol oynar. Ayrıca en önemli örneği uranyum olmak üzere çeşitli metallerin tuzlardan arındırılmasında ve döküm demir imalatlarında önemli etken maddedir. İndirgeyici madde rolüyle titanyum, zirkonyum, uranyum ve berilyum gibi metallerin üretiminde etkilidir. Otomotiv sektörünün de aktif olarak kullandığı metallerin başında gelir. (İnt. Kayn. 5)

Magnezyum alaşımlarının endüstriyel alanlarda kullanıldığı bazı sektör ve ürünler örneklerle gösterilmiştir; otomobil koltukları, dizüstü bilgisayarlar, kameralar, elektrikli ev aletleri, havai fişekler, boyalar, plastikler, tuğlalar, hayvan yemleri, gübreler, fotoğraf flaşları, fotoğraf makineleri, nal, beyzbol sopası, kar ayakkabısı, mürekkep, eczacılık, yüksek fırınlar, kâğıt, kibrit, uçak iniş takımları, motor parçaları...(İnt. Kayn. 5)

Ülkemizde her yıl yaklaşık olarak 850 bin ton magnezyum üretilmektedir. Dünya genelinde ise 11 ülkede bulunan 38 maden yatağında yaklaşık 500 milyon ton magnezyum üretimi yapılmaktadır. Magnezyum yataklarının geniş ölçüde bulunduğu

lkeler Şunlardır; Kanada, Brezilya, Norveç, Avusturya, Çek Cumhuriyeti, Yunanistan, Rusya, Sırbistan, Çin, Hindistan, Kuzey Kore, Avustralya, Afrika...(İnt. Kayn. 5)

Türkiye’de magnezit ve dolomit yatakları çoğunlukla Konya-Kütahya-Eskişehir illeri arasındaki bölgede, Erzincan ve Çankırı gibi iller ön planda olmak üzere birçok ilde magnezyum rezervleri bulunmakta ve üretimi yapılmaktadır. (İnt. Kayn. 5)

3.1.3 Magnezyum Cürufu

Çalışma kapsamında yapılacak deneylerde kullanılan magnezyum cürufu, Eskişehir ili Çifteler ilçesi ve Afyonkarahisar ili Emirdağ ilçesi sınırlarında bulunan Esan magnezyum üretim tesisinden temin edilerek Afyon Kocatepe niversitesi geoteknik laboratuvarında oda sıcaklığında saklanmıştır.



Resim 3.3 Deneyde kullanılacak magnezyum cürufu.

Dilek (2015)’e göre magnezyum cürufunun katkı maddesi olarak çimento, beton vb. sektörlerde kullanımının öngörülmesi için yapılan kimyasal analizler sonucu kireç doygunluk faktörü (LSF) ve dolayısıyla alit (C₃S) oranı düşük, yüksek silikat modülüne bağlı olarak sülfat direnci ve sertliği yüksek, erken dayanımda çok düşük performanslı fakat son dayanımda performans gösterebilen klinker özellikte olması gerektiği düŐünülmektedir. Dilek (2015)’e göre magnezyum cürufunun zgl ağırlığı 3,12 g/cm³ olarak llmŐtr.

Deneylerde kullanılmak için hazırlanan magnezyum cürufu elek sisteminde 40 no'lu elekten elenerek kullanıma hazır hale getirilmiştir.

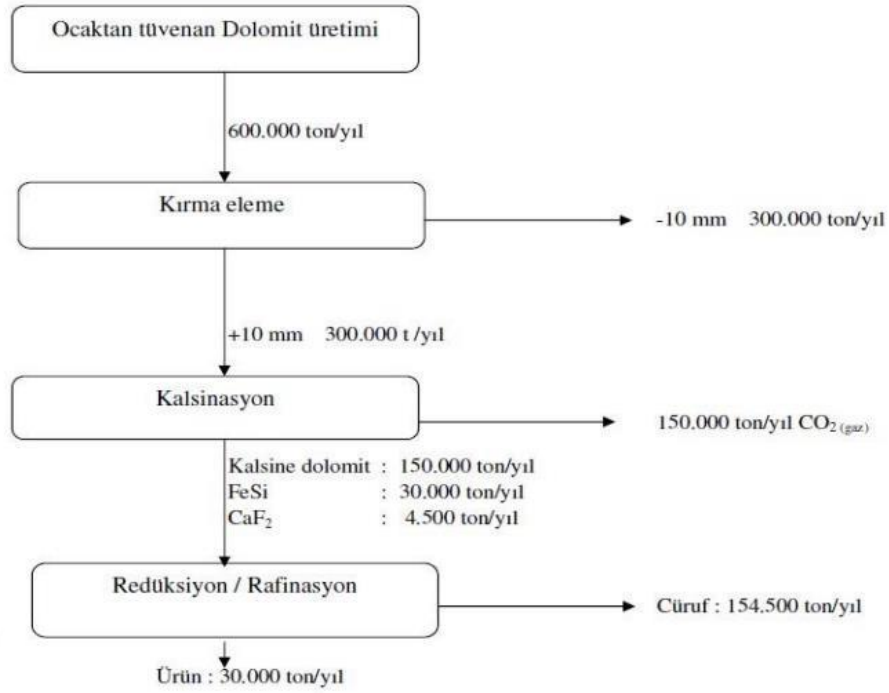
3.1.3.1 Magnezyum Cürufu Üretimi

Dilek (2022)'e göre ham maddesi manyezit veya dolomit olan saf magnezyum metalini elde etmek için dolomit veya manyezit ocaktan çıkartılıp uygun boyutlarda kırıldıktan sonra döner fırında yaklaşık 1250 °C sıcaklıkta kalsinasyon işlemine tabi tutularak kalsine dolomit silosuna aktarılır. Kalsine edilmiş dolomit, yaklaşık %15 FerroSilis ve %2 Kalsiyum Florid takviyesiyle bilyalı değirmende öğütülerek hemen peletleme ünitesine gönderilir. Peletlenmiş malzemeye, redüksiyon ünitesinde yaklaşık 1220 – 1250 °C sıcaklıkta, sıvı faz oluşumu sırasında içerisindeki magnezyum metali için ayrıştırma işlemi gerçekleştirilir. Redüksiyon fırınlarından potalarda elde edilen taç magnezyum metalinin yanında proses yan ürünü olarak da magnezyum cürufu açığa çıkmaktadır. Potalarda biriken taç magnezyum metalinin rafinasyon ünitesinde saflaştırılması işleminden hemen sonra dökümhanede saf magnezyum metal külçeleri oluşturulur. Yan ürün olarak açığa çıkan sıcak magnezyum cürufu ise, stoklama alanında soğumaya bırakılır. Dolomit hammaddesi ve magnezyum cürufunun kimyasal içerikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Dolomit ham maddesi ve magnezyum cürufunun kimyasal özellikleri (Bel 2015).

DOLOMIT (Hammadde)						
Parametre	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Kızdırma Kaybı
Konsantrasyon (%)	31,28	20,38	0,09	0,06	0,06	46,15

MAGNEZYUM CÜRUFU (Yan Ürün)					
Parametre	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
Konsantrasyon (%)	50,5	3,37	19,7	2,79	0,44
Parametre	F	SO ₃	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅
Konsantrasyon (%)	0,25	0,05	0,05	0,03	0,03



Şekil 3.1 Metalik magnezyum üretim şeması (Bel 2015).

Bel (2015)'e göre metalik magnezyum üretim şeması Şekil 3.1'de verilmiş olup saf magnezyum üretiminden sonra açığa çıkan cüruf miktarı yaklaşık 154.500 ton/yıl olarak gözlemlenmiştir.

Dilek (2022)'e göre magnezyum cürufunun çimento ve beton sektörlerinde kullanımına dair kimyasal ve mekanik tüm çalışmalar tamamlanıp detaylı incelendiğinde, cürufun çimento üretiminde bazı koşulları sağladığı bazı koşullara ise uymadığı görülecektir. Bu uygunluğun tespitinde malzemenin kaynağı ve üretim şekli öneme sahiptir. Saf magnezyum metalinin üretiminde ham madde olarak kullanılan magnezyum ve dolomit, kimyasal yapısında % 95 oranında CaCO_3 ve MgCO_3 içerir. Üretim aşamalarında bu ham madde kaynağı kalsinasyon işleminden sonra, yaklaşık 1250 °C sıcaklıkta redüksiyon fırınlarında işlem uygulanarak magnezyum metalleri bileşen içinden ayrıştırılmaktadır. Saf magnezyum üretim aşamalarında ham madde kaynağı ve işlem metodu, klinker üretim aşamalarıyla benzerlikler içermektedir. Ancak redüksiyon fırınlarında gerçekleşen kesikli üretim ve indirgen ortam olarak farklılıklar göstermektedir. Magnezyum prosesi sonrası açığa çıkan cüruf ise kimyasal yapısıyla ve fiziksel özellikleriyle klinkere benzer durumdadır. Redüksiyon fırınlarında oluşabilecek sıcaklık alit (C_3S) minerallerinin oluşması için yeterli gelmemekle beraber döner fırında belit (C_2S) minerallerinin oluştuğu

sıcaklık seviyesindedir. Bu sebeple redüksiyon fırınlarından elde edilen cürufun yüksek belitli çimento klinkeri olarak kullanılması mümkün olabilir. Ancak açığa çıkan cürufun stok alanlarında doğal soğumaya bırakılmasıyla kristal yapısının bozulabileceği göz önüne alınmalıdır.

3.1.3.2 Magnezyum Cürufunun Zararları

Wu, Liu ve Han (2021)'a göre magnezyum cürufu, dolomit, serpantin ve manyezit gibi magnezyum açısından zengin ham maddelerden magnezyum metalinin elektroliz veya termal indirgeme yoluyla elde edilmesi sonucunda açığa çıkan endüstriyel bir katı atıktır. Magnezyum cürufu gri renkte alkali blok veya toz olarak tarif edilebilir. Cüruf nemle karşılaştıktan sonra sonra çok alkali (pH 12 civarında) ve stabil özelliklere sahip bir süspansiyon oluşturur. Buna bağlı olarak, magnezyum cürufu yığılmış toprağın sertleşmesi ve tuzlanması kolaydır. Bu olay toprakta yetişen mahsullerin büyümesini tehlikeye atar ve normal arazi kullanımını olumsuz yönde etkiler. Magnezyum cürufunun düzensiz ve bir plan eşliğinde biriktirilmemiş olması sonucunda yağmur suyuna sızmasıyla nehirlerle ve yeraltı suyu sistemlerine girer. Bu bir su kütlesinin pH'ını değiştirebilir ve su kaynaklarının ekolojik güvenliğini ciddi şekilde etkileyebilir.

Wu, Liu ve Han (2021)'a göre magnezyum cürufu yüksek sıcaklıkta stok sahasına boşaltıldıktan sonra, doğal olarak soğutulan cüruf çok sayıda küçük parçacık içerir ve depolama yerinde tozun yayılmasına neden olur. Tozun yayılması çevreyi kirletir ve aynı zamanda tekrar toplanarak nakliye edilmesini zorlaştırır. Bunun yanı sıra tozun insan vücudu üzerindeki zararları şunlardır: Sert ve keskin şekilli toz, insan solunum mukozasında mekanik hasara neden olabilir. Belirli miktarda tozun uzun süreli solunması, akciğerlerde yavaş yavaş toz birikmesine neden olarak akciğerlerin ilerleyici ve yaygın fibröz dokular üretmesine neden olabilir.

Wu, Liu ve Han (2021)'a göre magnezyum cürufunun çok az bir kısmı geri dönüştürülebilirken çoğu atık olarak atılır. Çok miktarda magnezyum cürufunun birikmesi veya düzenli stoklanması ile magnezyum cürufunda bulunan tehlikeli kimyasallar yağmurda çözülür. Bu tehlikeli kimyasal maddelerin nehirlerle ve göllere karışması, mahsuller ve çevre üzerinde ciddi bir olumsuz etkiye sahip olduğu aşıkardır.

“1999/31/EC sayılı Avrupa Düzenli Depolama Direktifi”, çeşitli kirleticilerin emisyon konsantrasyonu için sabit emisyon limitleri belirlemektedir. Bir kirleticinin atıktaki konsantrasyonu sınırı aŗarsa, atıkların doğrudan düzenli depolanması yasaktır ve atıkların  n iŗleme tabi tutulması gerekir. Ancak atıktaki kirletici madde konsantrasyonu sınırın altındaysa atığın çevreye büyük zarar vermeyeceği ve  n iŗlem yapılmadan doğrudan çöplüğe atılabileceği belirtilmektedir.

3.1.3.3 Magnezyum Cürufu ile Yapılan  alıŗmalar

Wu, Liu ve Han (2021)’a göre ekonomi ve endüstrinin hızla geliŗmesiyle birlikte, kömür ağırlıklı enerji tüketimi verimliliği artırıyor ve maddi anlamda zenginlik yaratıyor. Bunun sonucunda büyük miktarda kükürt dioksit emisyonu oluŗturdu ve  evre üzerinde önemli bir çevresel yüke sebebiyet verdi. Endüstride řu an sıklıkla kullanılan kükürt gidericiler kire taŗı ve dolomittir. Magnezyum cürufu içeriğindeki CaO miktarı %40-50 gibi yüksek bir değerdedir. Bu da magnezyum cürufunun kükürt giderici olarak kullanılması için uygun bir koŗuldur.

Wu, Liu ve Han (2021)’a göre Jilin Mimarlık ve Mühendislik Enstitüsü’nden Luo Feng ve Xiao Liguang yaptıkları  alıŗmalarda, magnezyum cürufu içeren çimentolu malzemelerin ve magnezyum cürufu içeren duvar malzemelerinin hazırlanmasını incelediler. Fang Renyu ve diğ. Çimento klinkerini kalsine etmek için kire taŗı yerine magnezyum cürufu kullandılar. Sonuçlar, yaklaşık 1450  C’lik bir kalsinasyon sıcaklığında ve 30 dakikalık bir kalsinasyon süresinde, kire taŗı içeriğinin %15’i magnezyum cürufu ile deđiŗtirildiđinde standart bir klinker özellikleri sağladığını gözlemlemişlerdir.

Wu, Liu ve Han (2021)’a göre magnezyum cürufu, karıŗık  imento karıŗımı malzemeleri üretmek için kullanılabilir. I eriğinde cüruf kullanılarak üretilen çimentonun kalitesi nispeten stabildir. Ancak magnezyum cüruf miktarının artmasıyla çimentonun erken dayanımı azalma eğilimi gösterir ve priz süresi uzar.

Wu, Liu ve Han (2021)’a göre magnezyum cürufu duvar  imentosu üretiminde de kullanılabilir. Duvarcılık  imentosu, ana hammadde olarak bir veya birden fazla

katkı malzemesinin veya hidrolik özellik gösteren endüstriyel atıkların da öğütülerek uygun oranlarda nitrat çimento klinkeri ve alçı eklenmesiyle elde edilen hidrolik malzemedir. Duvar çimentosu olarak kullanılacak çimentonun mukavemeti düşüktür ve betonarme veya yapısal beton için kullanılması tavsiye edilmez. Bu çimento çeşidi endüstriyel ve sivil yapılarda genellikle duvar, şap harcı ve yastık betonu için kullanılmaktadır. Araştırmalara göre magnezyum cürufunun aktivitesinin diğer cüruflardan daha yüksek olduğunu gözlenmektedir. Duvarcılık çimentosu üretmek için magnezyum cürufu, çimentonun aktivitesini yükseltir, üretimi artırabilir ve çimento üretimine karşılık enerji tüketimini azaltabilir.

Ayrıca magnezyum cürufunun yol yapım malzemesi olarak kullanılabilirliği hakkında çalışmalar yapılmıştır. Magnezyum cürufu, %5 kireç veya %2 çimento ile ıslah edilecek zemine karıştırıldığında, yüksek dereceli veya ikinci dereceli üstyapıların taban tabakası olarak kullanılabilir olduğu gözlenmiştir. Magnezyum cürufunun öğütüldükten sonraki verimliliği daha iyi olacaktır. Magnezyum cürufunun iyi bir yol yapım malzemesi olarak tercih edilebilmesinin ana nedeni, magnezyum cürufundaki kalsiyum ve magnezyum içeriğinin çok yüksek olması ve nispeten yüksek bir aktiviteye sahip olmasıdır. Çimdeki toprakla reaksiyona girerek çözünmez. İçeriğindeki kalsiyum alüminat, karışımın tanecikleri arasındaki yapışmayı artırır. Zamanla, bu nemlendirici maddeler artarak yol yüzeyinin daha fazla taşıma gücü elde etmesini sağlar. (İnt. Kayn. 1)

Dilek (2022)'e göre kimyasal özellik ve mekanik performans açısından klinkerle benzerlik gösteren magnezyum cürufu, gerekli çevresel izinlerin alınması sonrası yapı malzemesi olarak kullanılabilmesi mümkündür. Hammadde kaynağı ve üretim aşamaları incelendiğinde klinkere muadil bir ürün olduğu gözlenmektedir. Çimento sektöründe, katkılı çimento üretiminde puzolanik özellik gösteren katkıları yerine bu malzeme kullanılarak üretim yapılabilir. Ayrıca genellikle sıva harcı ve torbalı satış için üretilen katkılı tip çimentolar yerine CEM I 32,5 tip çimento üretimi gerçekleştirilebilir. Bununla birlikte, cürufun katkı olarak kullanıldığı çimento fabrikalarında karbon salınım miktarı büyük oranda düşecekken, birim çimento üretimi başına kullanılan klinker miktarı da azalacaktır.

Bel (2015)'e göre cürufun çimento yerine beton katkısı olarak kullanılması amacıyla İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Laboratuvarı'nda çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Cüruf kullanımının yapılan genleşme (Le chatelier) deneyine göre maksimum açılmanın 10 mm olması ve aşırı çatlak gözlenmemesi gerektiğinden dolayı beton üretiminde %3 oranından fazla kullanılmaması gerekmektedir. Dayanım açısından incelendiğinde çimentonun ikamesi olarak kullanılan cüruf katkısı %9,5 oranında mukavemetini artırmıştır.

Bel (2015)'e göre cürufun kiremit tuğla üretiminde kullanılması konusunda yapılan çalışmalarda, cürufun kimyasal yapısında bulunan CaO , SiO_2 , MgO bileşikleri ortamdaki nem etkisiyle kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) ve magnezyum hidroksit (Mg(OH)_2) bileşiklerini oluşturur. Bileşiklerin oluşturdukları hacim büyümesi sonucu kireç patlaması meydana gelir ve üretilen yapı malzemesi parçalanır. Bundan dolayı kiremit ve tuğla üretiminde uygun olmadığı gözlemlenmiştir.

Bel (2015)'e göre cürufun ısıtma işlemi görmüş hali ile özellikle ülkemizde karadeniz bölgesinde bulunan asidik tarım arazilerinde pH düzenleyici olarak kullanılabileceği öngörülmüştür.

3.2 Metod

3.2.1 Numune Hazırlama

Çalışmalarda kullanılmak için hazırlanacak olan numuneler çeşitli işlemlerden geçirilmiştir. İnce daneli örselenmiş doğal su muhtevasında bulunan zeminler 1 gün boyunca 105 °C sıcaklıkta etüvde kurutulduktan sonra yapışık halde bulunan zemin daneleri ahşap tokmak yardımıyla birbirinden ayrılmıştır. Ayrıştırılan ince daneli zemin, sınıflandırılmasını belirlemek için elek analizi, hidrometre deneyi ve kıvam limit deneylerine tabi tutulmuştur.

Deneylerde kullanılacak numuneler, doğal zemin ile çizelge 3.3'te belirtilen oranlarda zeminin kuru ağırlığına göre magnezyum cürufu ile her karışım için belirlenen optimum su muhtevası kullanılarak geniş bir kapta homojen bir şekilde karıştırılmasıyla elde edilmiştir.

Homojen bir şekilde hazırlanan karışımlar eksenel basınç deneyinde kullanılmak üzere çapı 5 cm, boyu 10 cm olan silindir kalıplar içerisine 3 tabaka halinde hacim kontrollü olarak sıkıştırılmışlardır. Kalıp içerisindeki zemin numunesi hidrolik numune çıkarıcı yardımıyla dikkatli bir şekilde kalıptan çıkarılmıştır. Herbir katkı oranı için 3'er adet hazırlanan numuneler çap boy ve ağırlık ölçümleri yapıldıktan sonra streç film ile 2-3 kat sarılmıştır. Hava almayacak şekilde sarılan numuneler desikatör veya saklama kapları içerisinde uygun kür şartlarında 1, 7, 28, 56, 112 günlük kür süreleri boyunca bekletilmiştir.

Çizelge 3.3 Eksenel basınç deneyi için hazırlanan numune dağılımı.

Katkı Oranları	Kür Süreleri					
	1 Gün	7 Gün	28 Gün	56 Gün	112 Gün	
Doğal Zemin	3	3	3	3	3	15
Doğal Zemin + %5 Mg Cürufu	3	3	3	3	3	15
Doğal Zemin + %10 Mg Cürufu	3	3	3	3	3	15
Doğal Zemin + %15 Mg Cürufu	3	3	3	3	3	15
Doğal Zemin + %20 Mg Cürufu	3	3	3	3	3	15
Doğal Zemin + %25 Mg Cürufu	3	3	3	3	3	15
Toplam Numune Adedi						90

3.2.2 Tanımlama Deneyleri

3.2.2.1 Dane Boyutu ve Dane Çağı Dağılımı

Zeminler yapısında farklı boyutlarda daneleri bulundurduğundan dolayı dane boyut dağılımı ve zemin sınıflandırması için deneylere tabi tutulmuştur. Sınıflandırma sistemleri çoğunlukla dane çapı büyüklüğü ve kuru ağırlıktaki yüzde değerlerinin saptanmasıyla değerlendirilir. Bu dane çapı dağılımının belirlenmesi için elek analizi ve ıslak analiz (hidrometre deneyi) uygulanmıştır.

Elek analizi deneyi TS 1900-1/2006 standartlarına göre yapılmıştır. Zemin numunesi elek sisteminde sırasıyla 4 no'lu elekten 200 no'lu eleğe kadar yıkamalı bir şekilde elenmiştir. Elenen zemin miktarları eleklerde kalan ve geçen yüzdelere olarak hesaplanmıştır. Çizelge 3.4 elek analizi sonuçlarını vermektedir.

Çizelge 3.4 Elek analizi deney sonuçları.

Elek No	Elek Açıklığı	Elekte Kalan (g)	Toplam Kalan %	Elekte Geçen %
4	4,75	1,35	0,27	99,73
10	2	0,22	0,31	99,69
20	0,85	1,96	0,71	99,29
40	0,425	4,06	1,52	98,48
60	0,25	5,66	2,65	97,35
100	0,15	18,34	6,32	93,68
200	0,075	48,42	16,00	84,00
TAVA	0	419,99	100,00	

3.2.2.2 Hidrometre Deneyi

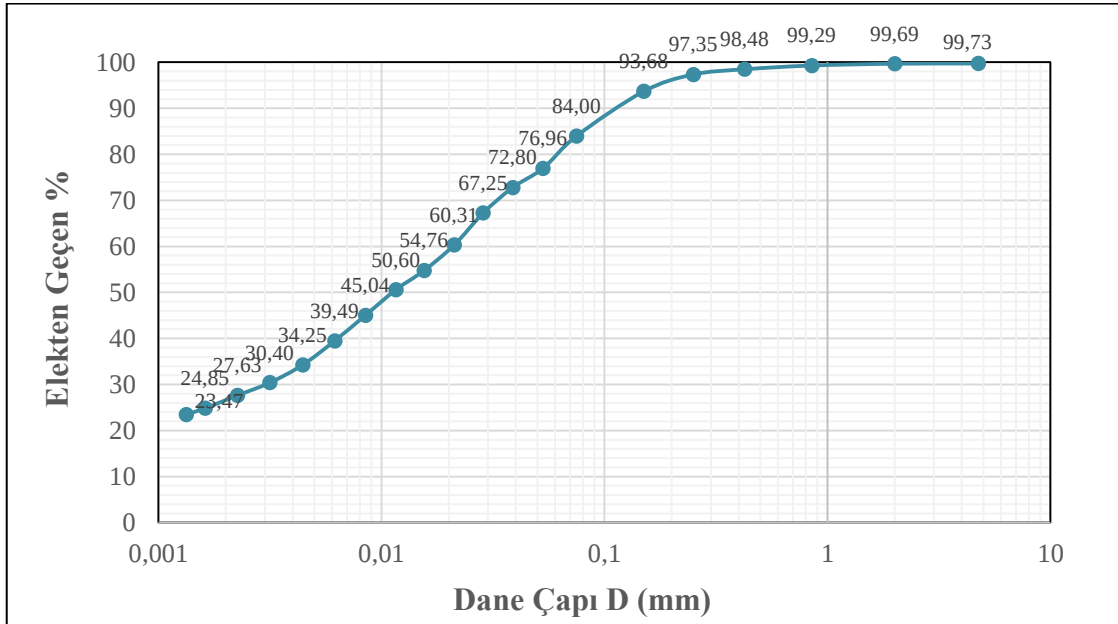
Zemin numunesinin iri dane kısmı (200 nolu elek üstü) için elek analizi yapılmıştır. Bundan dolayı 200 no'lu elekten geçen ve dane çapı 0,075 mm'den küçük olan kısmı için ıslak analiz yapılmıştır. Islak analiz için hidrometre yöntemi (resim 3.4) kullanılmıştır.

Zemin numunesinin elek analizinde 200 no'lu elekten geçen kısımdan 50 gram alınmıştır. 50 gram ince daneli zemin, içerisine yaklaşık 120 ml sodyum hegzametafosfat (NaPO_3)₆ eklenmiş saf suyla birlikte mikser yardımıyla karıştırılarak 1000 ml'lik süspansiyon hazırlanmıştır. Hazırlanan süspansiyon homojen olana kadar çalkalanmıştır. İçerisinde süspansiyon bulunan mezür düz bir zemin içerisinde konumlandırılarak kronometreyle ölçüm işlemlerine başlanmıştır. Belirli aralıklarla okunan değerlere ortam şartlarından kaynaklı düzeltmeler yapılarak dane boyutu dağılımı belirlenmiştir.



Resim 3.4 Dane boyutunun hidrometre deneyiyle tespit edilmesi.

Elek analizi ve hidrometre analizi deneyleri ile elde edilen sonuçlar birleştirilerek zemin numunesine ait dane çapı dağılımı elde edilmiştir. Zemin numunesinin dane çapı dağılım grafiği Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2 Elek analizi ve hidrometre sonuç grafiği ile tane dağılımı.

3.2.2.3 Piknometre (Özgöl Ağırlık) Deneyi

Tane yoğunluğu, TS 1900-1 standartına göre piknometre yöntemi ile belirlenmiştir. Deney öncesi 500 ml hacmindeki piknometre kabının darası tartılmıştır. Daha sonra kap içerisine kurutulmuş ince daneli zeminden 50 gr ilave edilmiştir. İçerisinde zemin bulunan kaba damıtılmış su konularak hava kalmaması için vakum işlemi yapılmıştır. Tamamen havasız ve dolu olan kap tekrardan ölçülerek boşaltılmıştır.

İçi boşaltılan kaba sadece damıtılmış su katılarak aynı vakum işlemi uygulanmıştır. İçerisinde sadece su bulunan kap ağırlığı ölçülerek deney tamamlanmıştır.

3.2.2.4 Atterberg Limit Deneyleri

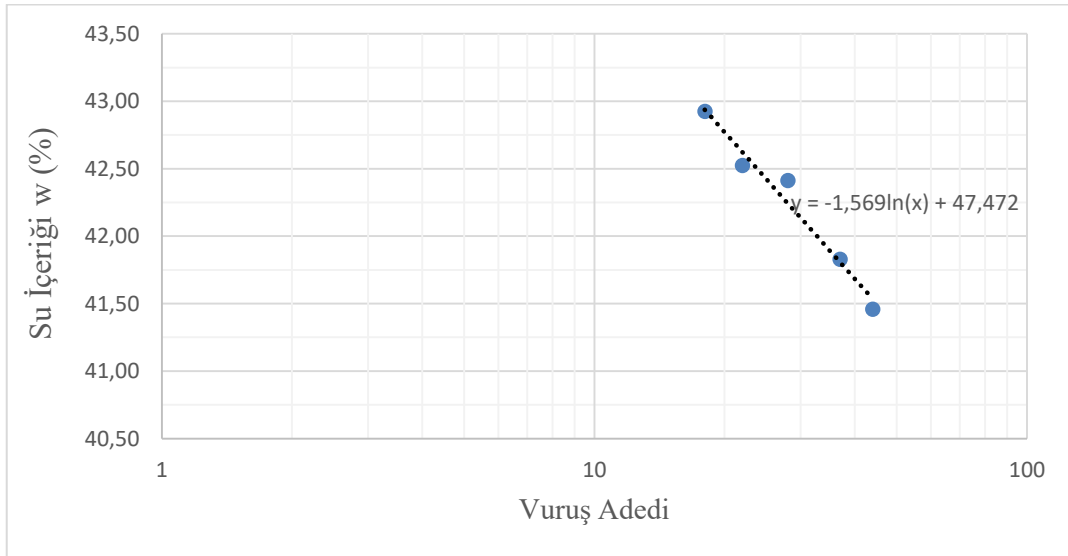
Zeminin su muhtevasına bağlı davranışlarının değişikliği deneysel olarak belirlenmiş olup likit limit, rötre limit ve plastik limit değerleri ile sınırlandırılmıştır. Likit limit zeminin kendi ağırlığı etkisiyle su akabildiği minimum su muhtevasına verilen addır. Plastik limit ise el altında cam yüzey üzerinde zeminin çubuk hali oluşturarak çaplarının 3 mm olduğu ve kopmaların meydana geldiği andaki su muhtevasına verilen addır.

Kıvam limitleri deneyleri, TS 1900-1 standartına göre yapılmıştır. Likit limitin belirlenmesi için casagrande yöntemi uygulanmıştır. Zemin numunesi 40 nolu elekten elenerek yaklaşık 500 gr elde edilmiştir. Elenen zemin numunesi farklı su oranları katılarak karıştırılır. Daha sonra casagrande aleti içerisine karışımdan alınan bir miktar numune, spatula yardımıyla yüzeyi yatay olacak biçimde yerleştirilmiştir. Tas içerisinde yerleşmiş bulunan numunenin ortasından bir oyuk açılarak alet koluyla saniyede 2 kez düşecek şekilde çevrilmiştir (Resim 3.5). Çevrimler sonrasında zemin ortasındaki oyuğun kapanmasının yaklaşık 1 cm olması halinde kolun çevrilmesi durdurulmuştur. Düşüş sayısı kaydedilmiştir. Daha sonra zemin yüzeyinden alınan örnekler küçük kaba konularak önce tartılmıştır ve sonrasında 105 °C sıcaklıktaki etüvde kurutulmuştur. Deneyin devamında farklı oranlarda su muhtevasıyla işlemler tekrar edilmiştir.



Resim 3.5 Casagrande deneyiyle likit limitin tespit edilmesi.

Plastik limitin belirlenmesi için yapılan deneylerde belirli orandaki su ile zemin karıştırılmıştır. Karıştırılan zemin numuneleri cam yüzey üzerinde el altında yoğrularak yaklaşık çapları 3 mm uzunlukları 10 cm boyutlarında silindirler haline gelmiştir. El altında devam eden yoğrulma işlemi sırasında oluşan çatlak ve kopmalar sonrasında zemin numuneleri tartılarak su muhtevasının bulunması için etüve atılmıştır.



Şekil 3.3 Likit limitin belirlenmesi.

Kıvam limitlerinin belirlenmesi için yapılan casagrande deneyi ve elle yoğurma tekniğiyle birlikte elde edilen likit limit değeri 42,42 ve plastik limit değeri 22,17 olmuştur. Bu veriler sonucunda plastisite indisi 20,25 olarak saptanmıştır.

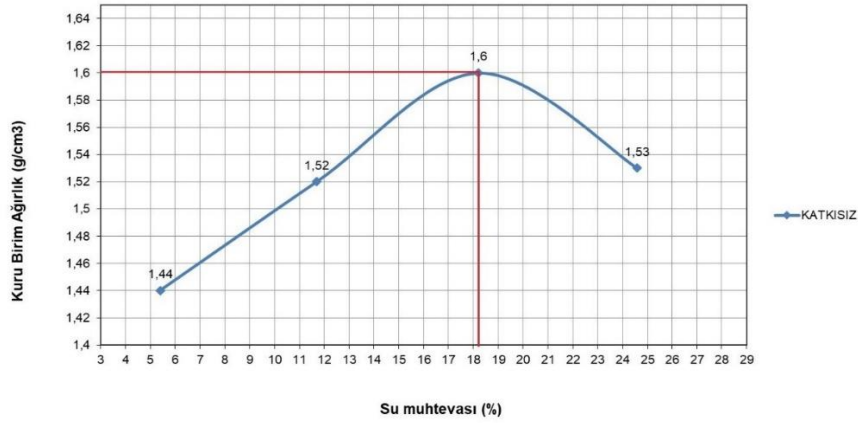
3.2.2.5 Standart Proktor (Kompaksiyon) Deneyi

Kompaksiyon, zeminin tabakalar halinde sıkıştırılarak zemin içerisindeki boşluk oranının azalmasını, zemin mukavemeti, taşıma gücü ve geçirimsizliğinin artırılmasını ve oturmanın azalmasını sağlayan mekanik bir işlemdir. Kompaksiyon deneyinde amaç zeminin kuru birim hacim ağırlığına karşılık gelen su içeriği miktarını bulunmasıdır. Kompaksiyon deneyi standart ve ağır (modifiye) proktor olmak üzere 2 şekilde gerçekleştirilir. Bu çalışmamızda standar proktor deneyi (Resim 3.6) uygulanmıştır.

Deney öncesinde kurutulan zemin numunesi içerisine belirlenen oranlarda katkı malzemesi ve bir miktarda su ilave edilerek karıştırılmıştır. Elde edilen karışım 3 tabaka halinde kalıp içerisinde tokmakla sıkıştırılır. Tokmak her tabakaya 25 defa belirli bir yükseklikten düşürülür. Kalıptan numune çıkarıcı yardımıyla çıkarılan zeminden su muhtevasının tespiti için küçük kaplara çeşitli bölgelerinden numune alınmıştır. Bu işlem artan su miktarlarıyla 5 kez ilave ederek tekrarlanmıştır.



Resim 3.6 Standart proktor deney aleti.



Şekil 3.4 Zemin numunesinin kuru birim hacim ağırlığı-su muhtevası grafiği.

Deney sonunda elde edilen değerlerle Şekil 3.4'te görüldüğü üzere ρ_k -w grafiği oluşturulmuş ve kompaksiyon eğrisi çizilmiştir. Bu çizilen kompaksiyon eğrisinden ρ_{max} ile w_{opt} değerlerine ulaşılmıştır. Zemin numunesinin w_{opt} değeri %18,3 ve ρ_{max} değeri 1,6 g/cm³ olarak tespit edilmiştir.

3.2.2.6 Eksenel Basınç Deneyi

Tek eksenli basınç deneyinde zemine tek yönde uygulanan kuvvetlere karşı gösterdiği dayanım ölçülmektedir. Örselenmemiş veya sıkıştırılmış belirli boy ve çaptaki zemin numunesine düşey basınç uygulanarak numunenin deformasyonuna karşılık gelen maksimum gerilemeye serbest (tek eksenli) basınç dayanımı denilmektedir.

Kompaksiyon deneyiyle elde edilen su muhtevalarına uygun ve söz konusu çalışmada belirlenen %5, %10, %15, %20, %25 oranında magnezyum cürufu ilave edilerek hazırlanmış numuneler, kür süreleri sonunda gerekli ağırlık ve uzunluk ölçümleri yapılarak tek eksenli basınç cihazında deneye tabi tutulmuştur. Silindir numuneler plakaların arasına yerleştirildikten sonra 1 mm/dk hızla düşey basınç uygulanmaya başlanmıştır. Belirli aralıklarla okunan yük ve deformasyon değerleri kaydedilerek yükün en büyük değere ulaştığı anda deney tamamlanmıştır. (Resim 3.7) Deney verileri gerekli hesaplamalar yapıldıktan sonra birim boy kısalmasına karşılık deformasyon-gerilme grafikleri çizilmiş ve çizilen eğrinin tepe noktası numunenin serbest basınç dayanımını göstermiştir.



Resim 3.7 Zemin numunesinin serbest basınç deneyiyle dayanımının tespiti.



Resim 3.8 Zemin numunelerinin gerekli kür şartlarında saklanması.

4.BULGULAR

Çalışma kapsamında Afyon Kocatepe Üniversitesi kampüsünden alınan doğal zemin numunesinin, Eskişehir ili Çifteler İlçesi ve Afyon ili Emirdağ ilçesi sınırlarında bulunan Esan magnezyum üretim tesisinden temin edilen magnezyum cürufuyla çeşitli oranlarda stabilize edilmesinin sonuçları deneylerle belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar doğal zemin numunesinin tanımlanması için tanımlama deneyleriyle başlamıştır. Her katkı oranının ilave edilmesiyle elde edilen karışımlar kıvam limitlerine tabi tutulup likit limit,

plastik limit ve plastisite indisleri elde edilmiştir. Sonrasında doğal zemin numunesi ve %5, %10, %15, %20, %25 oranlarında magnezyum cürufunun kompaksiyon deneyleriyle belirlenen optimum su içerikleriyle karıştırılarak yeni silindirik numuneler hazırlanmıştır. Her bir katkı oranı için 3'er adet hazırlanan numuneler 1, 7, 28, 56, 112 günlük kür süreleri sonrasında eksenel basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Deney sonuçları değerlendirilmek üzere tablo ve grafiklerle açıklanmıştır.

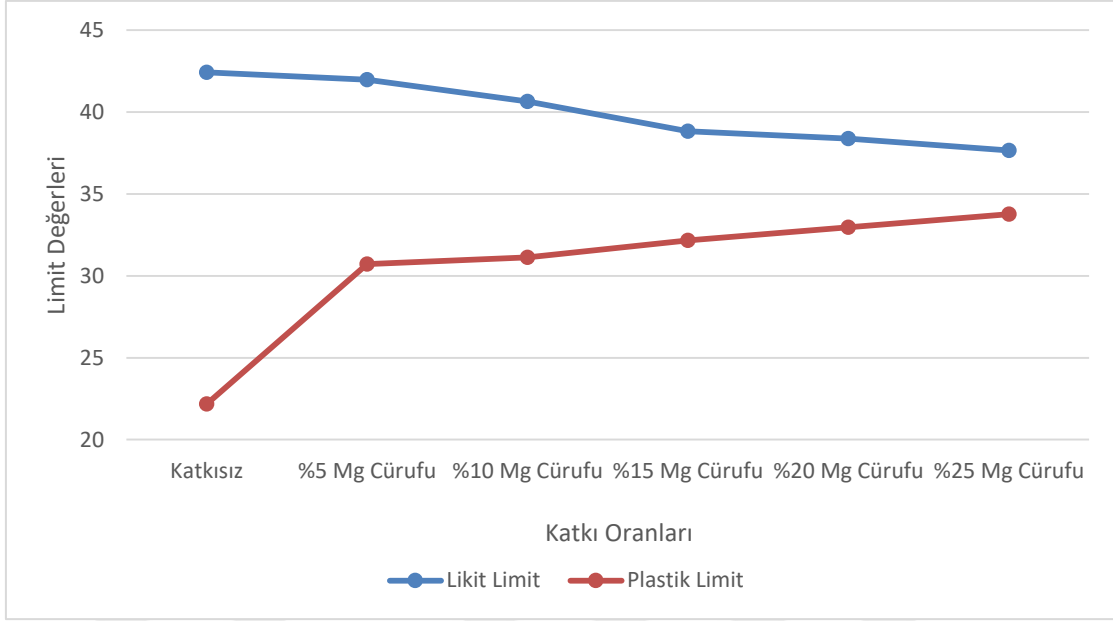
4.1 Kıvam Limit Değerlerinin Belirlenmesi

Çalışma kapsamında yapılan tanımlama deneylerinden birisi olan kıvam limit deneyleri herbir katkı oranındaki karışımlara uygulanarak likit limit, plastik limit ve plastisite limit değerlerine ulaşılmıştır. Elde edilen verilen Çizelge 4.1 'de verilmiştir.

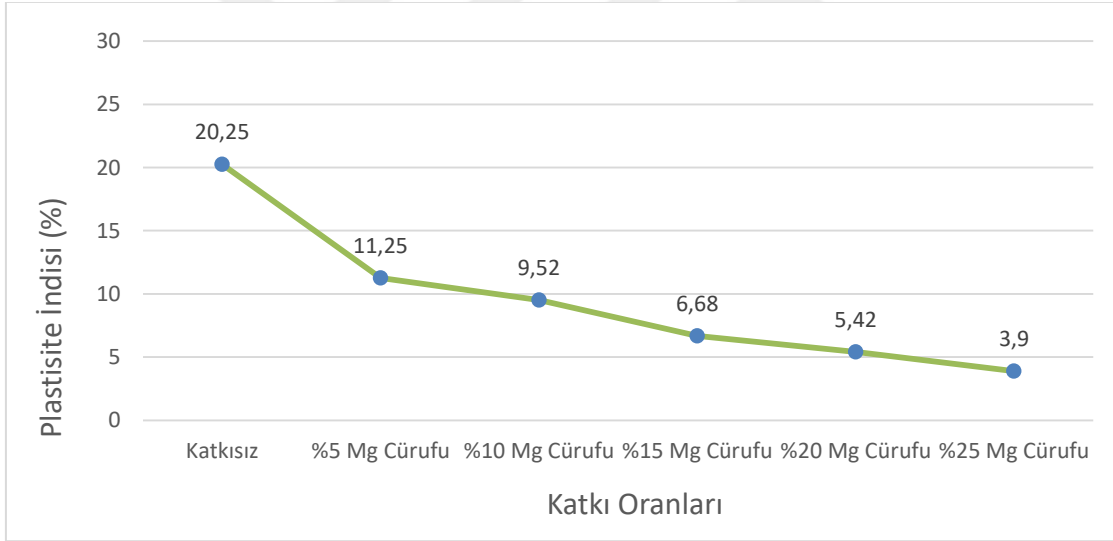
Çizelge 4.1 Numunelere ait kıvam limit değerleri.

Numune Adları	Likit Limit (%)	Plastik Limit (%)	Plastisite İndisi (%)
Katkısız	42,42	22,17	20,25
%5 Mg Cürufu	41,97	30,72	11,25
%10 Mg Cürufu	40,64	31,12	9,52
%15 Mg Cürufu	38,84	32,16	6,68
%20 Mg Cürufu	38,38	32,96	5,42
%25 Mg Cürufu	37,66	33,76	3,9

Kıvam limit deneyleri karışımlar hazırlandıktan sonra kür süresi olmaksızın uygulanmıştır. Katkısız zeminin likit limit ve plastisite indis değeri farklı oranlardaki katkılı karışımlara göre fazladır. Bununla birlikte katkı miktarı arttıkça likit limit değeri ve plastisite indis değeri azalmaktadır. Ancak plastik limit değeri katkı oranına bağlı olarak artmaktadır. Elde edilen değerlerin ulaşıldığı grafikler Ek-1'de gösterilmiştir. Limit değerlerinin grafikleri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'te verilmiştir.



Şekil 4.1 Katkı oranına bağlı kıvam limit değerleri.



Şekil 4.2 Katkı oranına bağlı plastisite indis değerleri.

Ayrıca şekil 4.1 ve 4.2 incelendiğinde katkı oranı arttıkça plastisite indisi azaldığı görülmektedir. Bu durum katkı maddesinin zeminin plastisitesini azalttığını göstermektedir. Şekil 4.1’de katkı oranı arttıkça eğrilerin birbirine yaklaşması plastik bölgenin giderek küçüldüğünü göstermektedir.

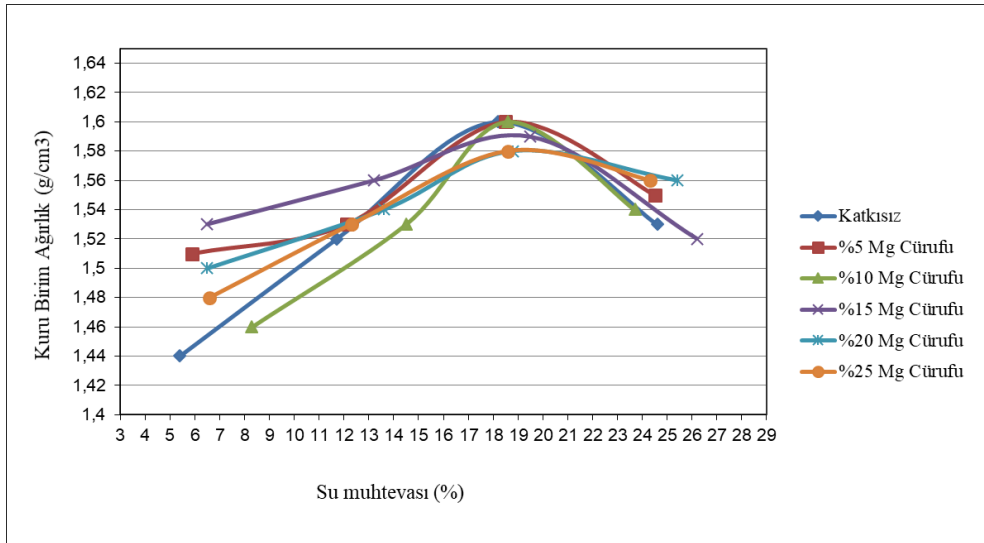
4.2 Kuru Yoğunluk – Su Muhtevası İlişkisinin Belirlenmesi

Doğal zemin numunesinin kompaksiyon özelliklerini belirlemek üzere yapılan deneyler sonucunda zemin numunesinin optimum su muhtevası w_{opt} %18,3 ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri ρ_{max} 1,6 olarak gözlemlenmiştir.

Altı farklı katkı oranlarında karışım hazırlanarak numunelerinin w_{opt} ve ρ_{max} değerleri grafiklerle saptanmıştır. Elde edilen değerlerin ulaşıldığı grafikler Ek-2’de gösterilmiştir. Farklı karışımlara ait yapılan deneylerin w_{opt} ve ρ_{max} değerleri Çizelge 4.2’de verilmektedir. Şekil 4.3’te karışımların kompaksiyon deney sonuçlarından elde edilen eğrileri görülmektedir.

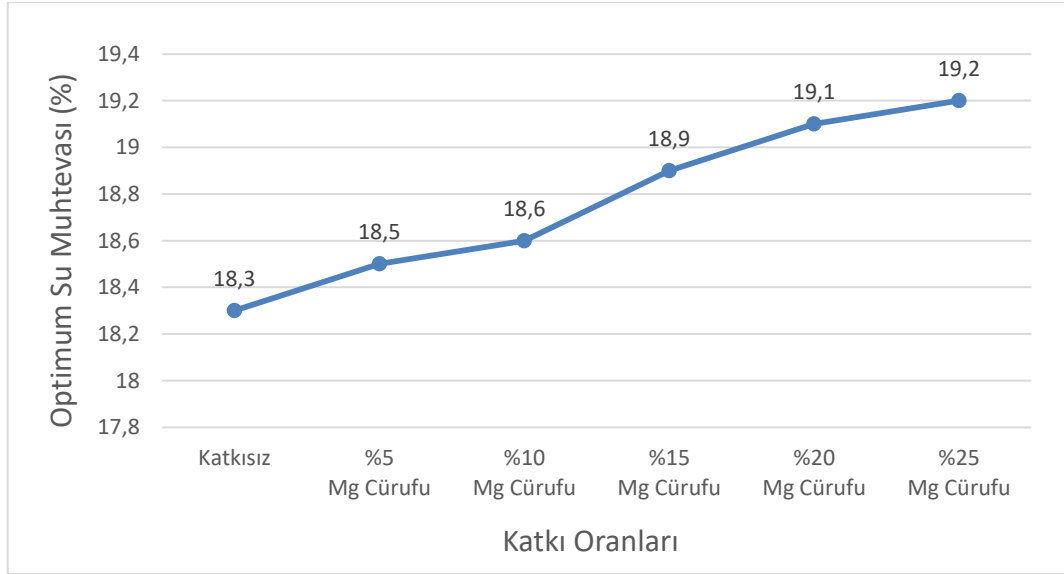
Çizelge 4.2 Numunelere ait kompaksiyon değerleri.

Katkı Oranları	Optimum Su Muhtevası, w_{opt} (%)	Kuru Yoğunluk, ρ_{max} (g/cm ³)
Doğal Zemin	18,3	1,6
Doğal Zemin + %5 Mg Cürufu	18,5	1,605
Doğal Zemin + %10 Mg Cürufu	18,6	1,60
Doğal Zemin + %15 Mg Cürufu	18,9	1,59
Doğal Zemin + %20 Mg Cürufu	19,1	1,58
Doğal Zemin + %25 Mg Cürufu	19,2	1,58

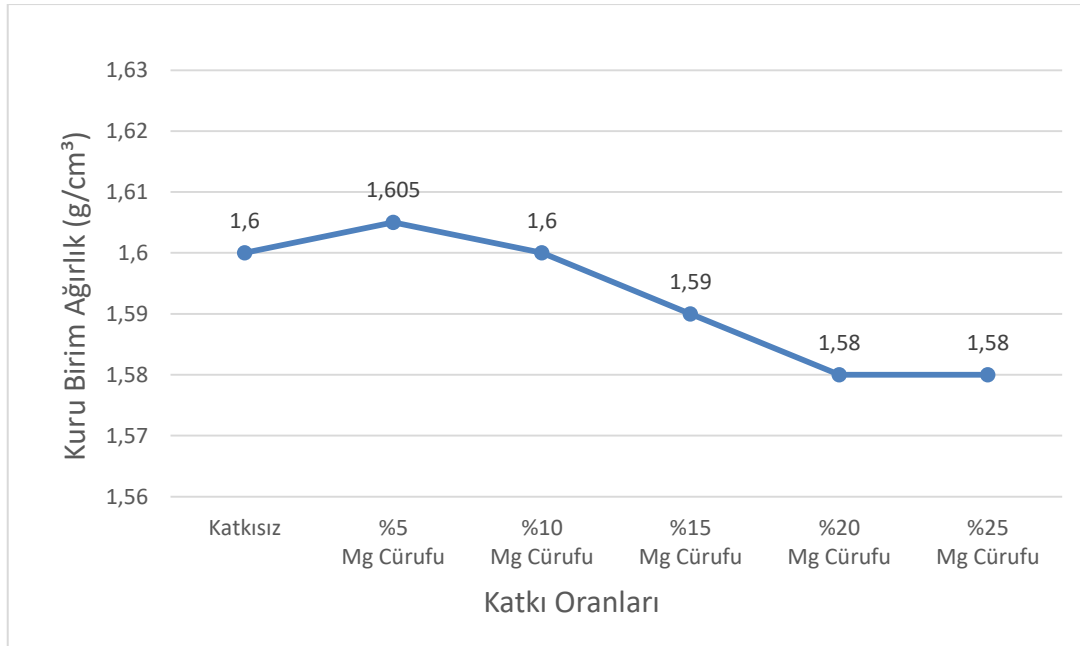


Şekil 4.3 Katkılı ve katkısız numunelerin kompaksiyon eğrileri.

Doğal zemine farklı oranlarda katkı malzemesi olarak magnezyum cürufunun katılmasıyla birlikte deney sonuçları incelendiğinde katkı miktarının artmasıyla optimum su muhtevasının da arttığı ve maksimum kuru birim ağırlığında da azalmalar meydana geldiği gözlemlenmiştir. Su muhtevasının değişimi Şekil 4.4'te, maksimum kuru birim hacim ağırlığının ise şekil 4.5'te açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.4 Farklı katkı oranlarına göre optimum su muhtevaları.



Şekil 4.5 Farklı katkı oranlarına göre kuru birim ağırlıkları.

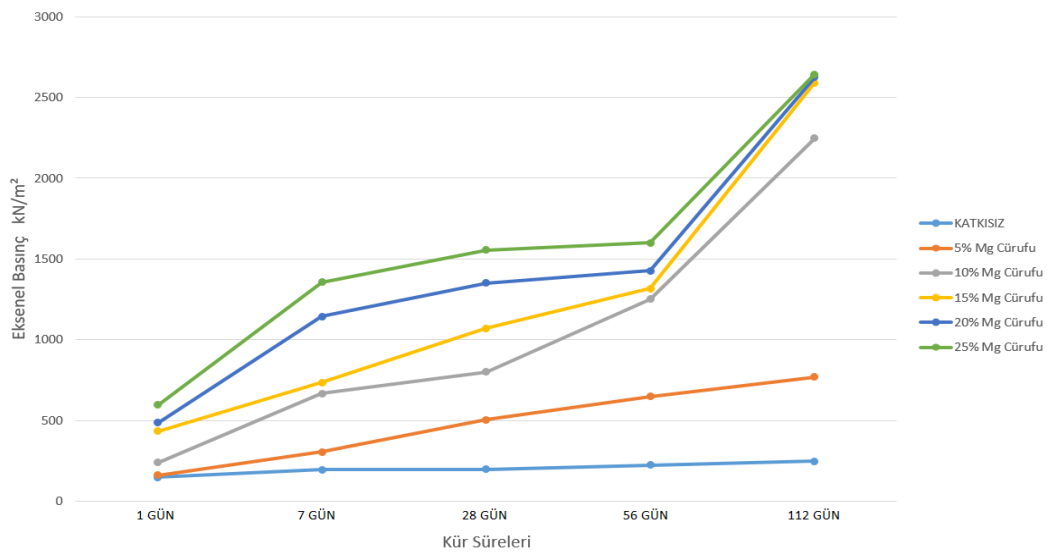
4.3 Eksenel Basınç Deney Değerleri

Yapılan deneysel çalışmalarda serbest basınç dayanımlarının belirlenmesi amacıyla toplamda 90 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin katkı oranlarına bağlı olarak serbest basınç dayanım değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

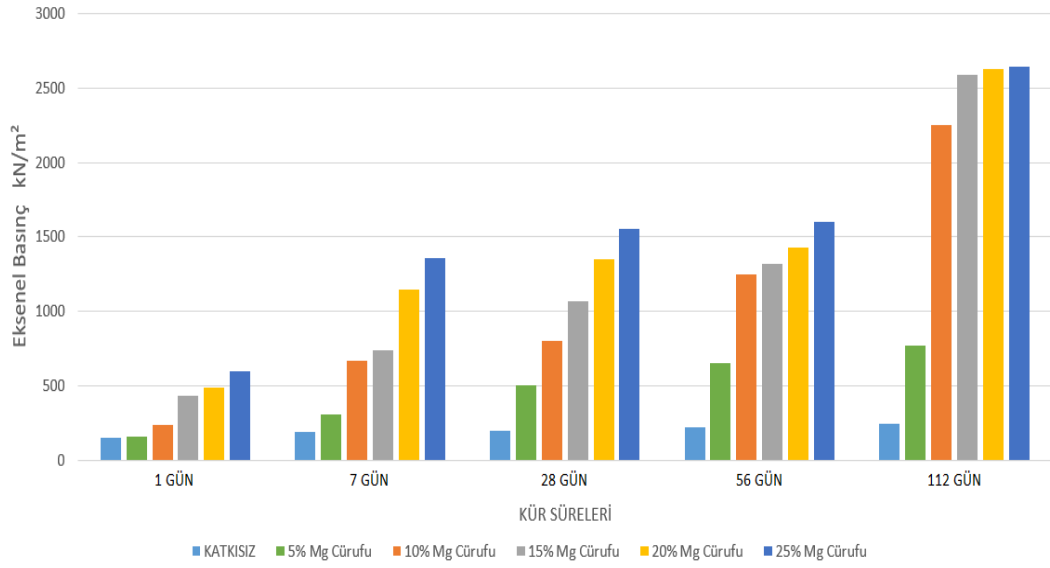
Çizelge 4.3 Numunelere ait serbest basınç dayanımları.

NUMUNE ADI	Qu, Serbest Basınç Dayanımı kN/m ²				
	1 GÜN	7 GÜN	28 GÜN	56 GÜN	112 GÜN
Doğal Zemin	148,49	194,47	197,35	224,63	249,01
Doğal Zemin + %5 Mg Cürufu	161,96	305,05	505,37	648,99	768,57
Doğal Zemin + %10 Mg Cürufu	238,94	666,85	802,03	1251,28	2247,87
Doğal Zemin + %15 Mg Cürufu	433,58	736,05	1069,43	1315,97	2589,63
Doğal Zemin + %20 Mg Cürufu	486,79	1142,99	1350,88	1427,47	2624,27
Doğal Zemin + %25 Mg Cürufu	595,88	1356,02	1555,22	1598,94	2643,45

Yapılan serbest basınç deneyi sonrasında elde edilen veriler ışığında magnezyum cürufu eklenerek hazırlanan numunelerin kür sürelerine bağlı olarak serbest basınç dayanım değerleri Şekil 4.6'da, katkı oranlarına bağlı olarak değişen serbest basınç dayanım değerleri ise Şekil 4.7'de verilmiştir.

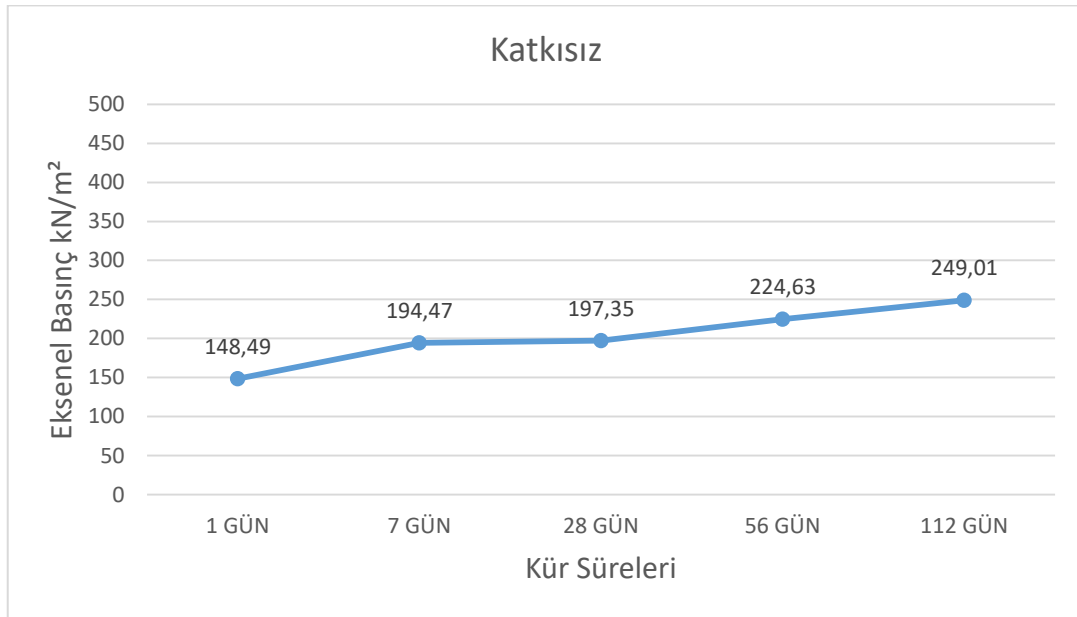


Şekil 4.6 Kür sürelerine göre serbest basınç dayanım grafiği.



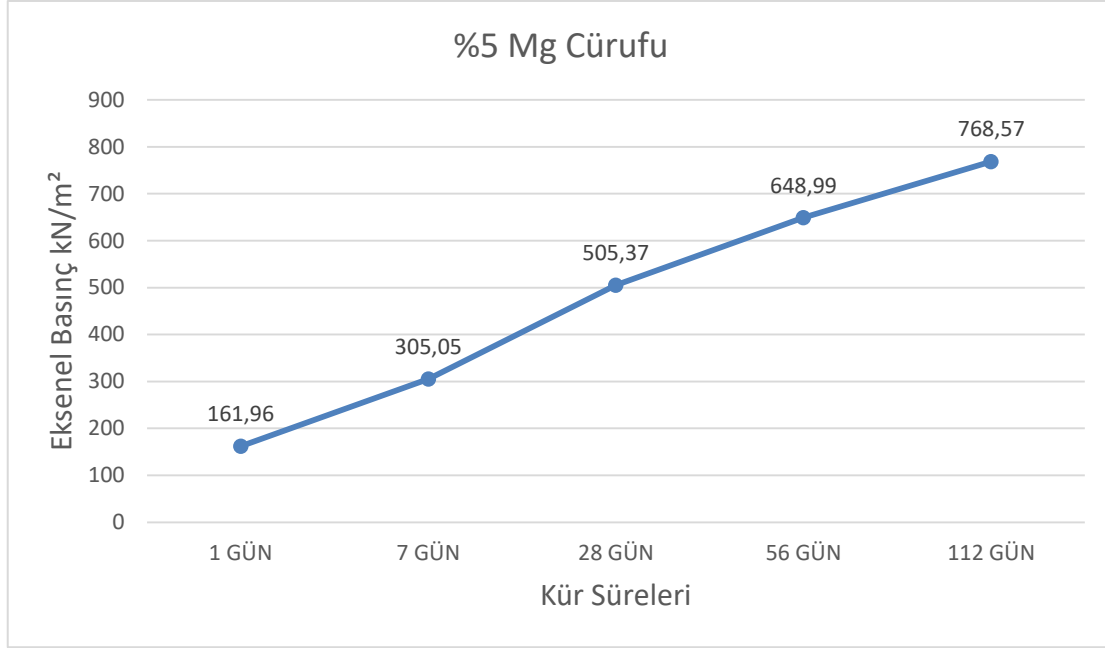
Şekil 4.7 Katkı oranlarına göre serbest basınç dayanım grafiği.

Yapılan serbest basınç deneyi sonrasında katkı malzemesi katılmadan doğal haliyle hazırlanan zemin numunesinde 1, 7, 28, 56 ve 112 günlük kür süresi sonrası önemli bir değişiklik olmamasıyla birlikte kür süresi artışıyla orantılı olarak artış görülmüştür. Doğal zemin numunesinin basınç dayanımı 1 günlük kür süresi sonunda 148,49 kPa ve 112 günlük kür süresi sonunda 249,01 kPa 'a yükselmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 Katkısız numune dayanımlarının kür süresine göre değerlendirilmesi.

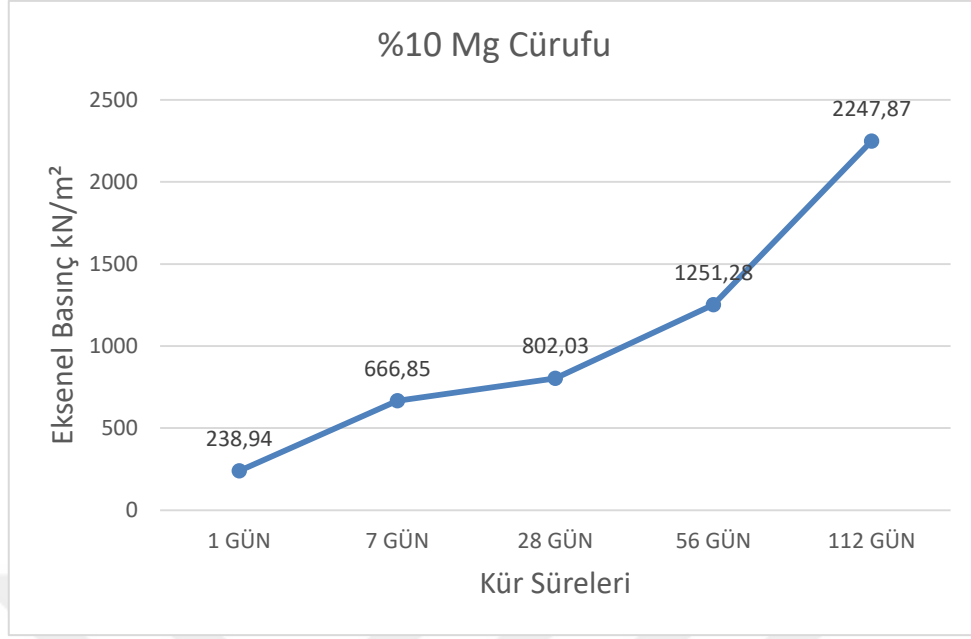
Magnezyum cürufu katkısının zemine %5 oranla ilave edilmesiyle elde edilen basınç dayanımı kür süresine bağlı olarak 112. Gün sonunda 5 kat artarak 768,57 kPa ölçülmüştür. Artış hızı kür sürelerine göre Şekil 4.9’da görüldüğü üzere düzenli bir artış oranı görülmektedir.



Şekil 4.9 Katkı oranı %5 olan numune dayanımlarının kür süresine göre değerlendirilmesi.

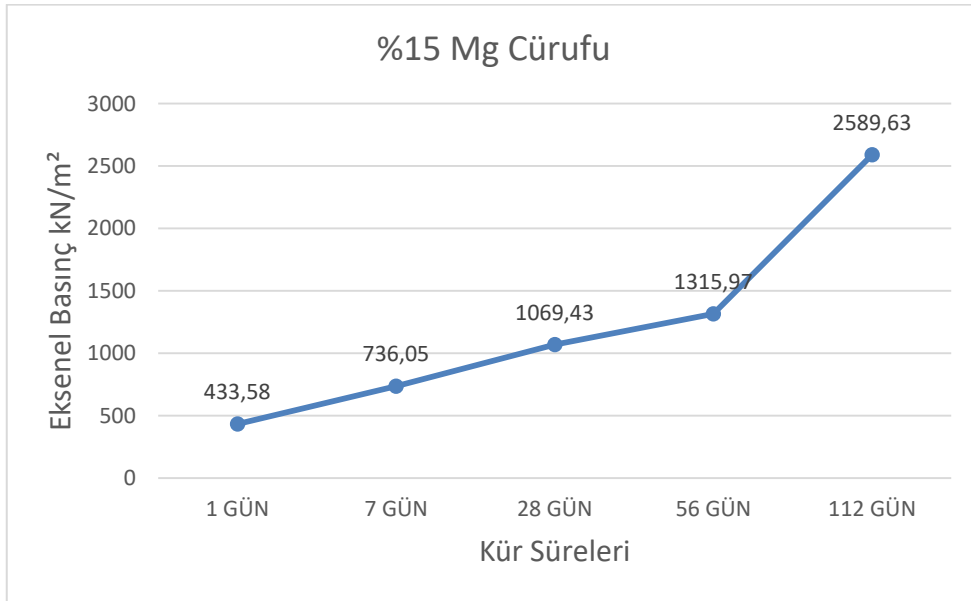
Serbest basınç deneyi sonucunda %10-15-20-25 oranlarında magnezyum cürufu katkı malzemesi ile hazırlanan numunelerin dayanımları incelendiğinde 7 gün ve 56 gün arasında artış hızının durağan olduğu ve 112 günlük ölçümlerde dayanımın hızla yükseldiği gözlemlenmiştir. Kür sürelerinin uzaması dayanımın önemli derecede artmasını sağlamıştır.

Magnezyum cürufu katkısının zemine %10 oranla ilave edilmesiyle elde edilen ve Şekil 4.10’da gösterilen basınç dayanımı kür süresine bağlı olarak 112. Gün sonunda yaklaşık 10 kat artarak 2247,87 kPa ölçülmüştür.

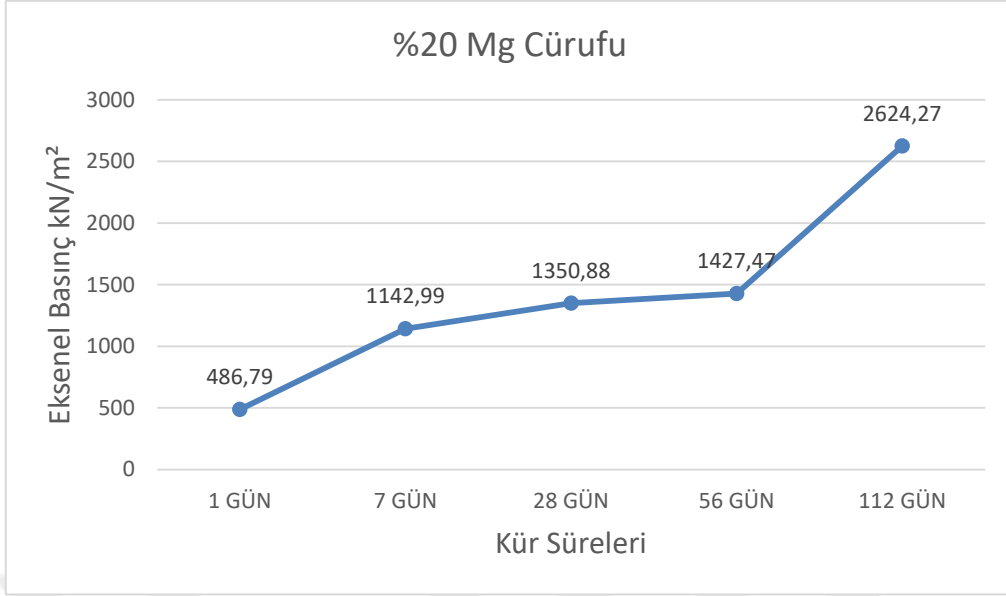


Şekil 4.10 Katkı oranı %10 olan numune dayanımlarının kür süresine göre değerlendirilmesi.

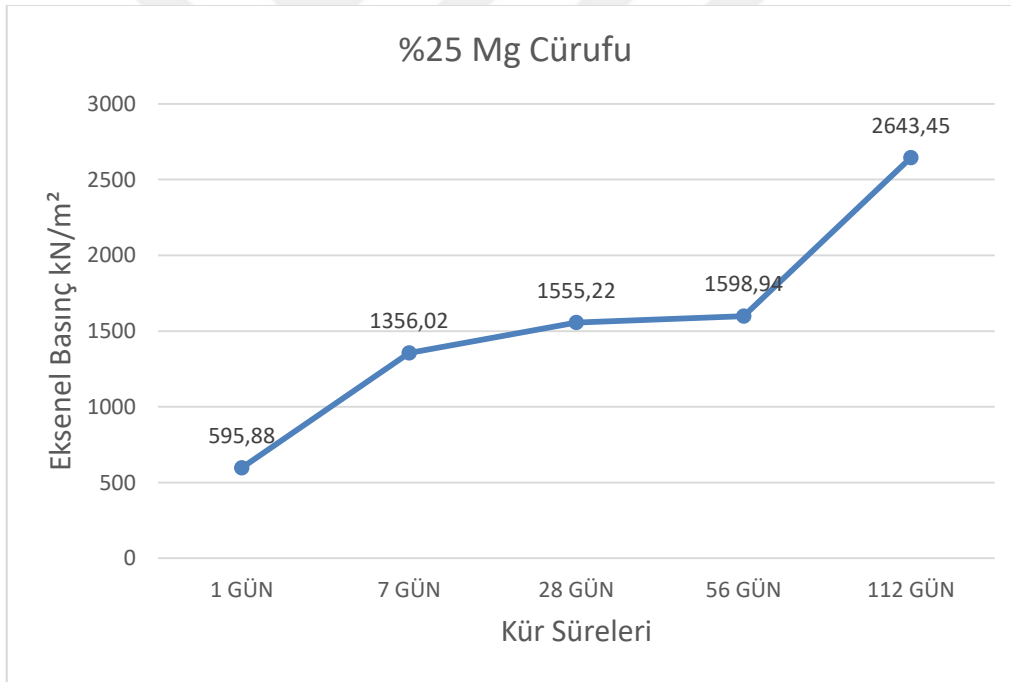
Kür sürelerine bağlı olarak 56. Gün sonuna kadar düzenli bir artış ve 56. Gün sonrasında ani bir yükseliş gösteren %15-%20-%25 katkı oranlarındaki numunelerin dayanımları 112. Gün sonunda yaklaşık 5-6 kat artarak 2589,63 kPa – 2643,45 kPa aralığında ölçülmüştür. Katkı oranlarına ait dayanım grafikleri Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4.11 Katkı oranı %15 olan numune dayanımlarının kür süresine göre değerlendirilmesi.

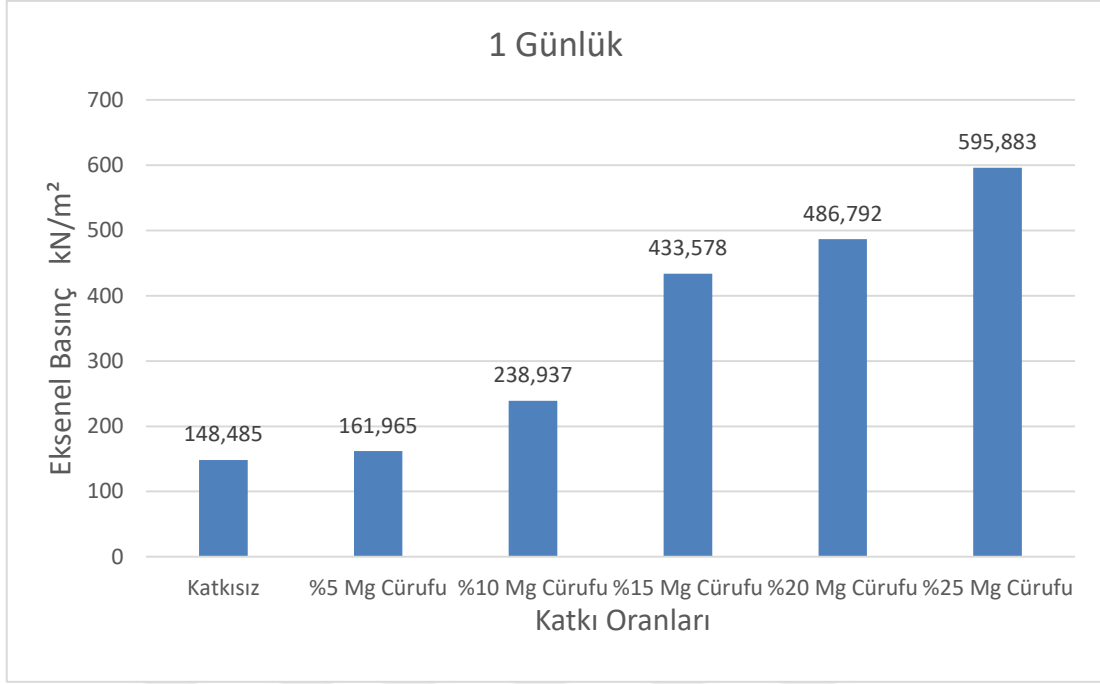


Şekil 4.12 Katkı oranı %20 olan numune dayanımlarının kür süresine göre değerlendirilmesi.

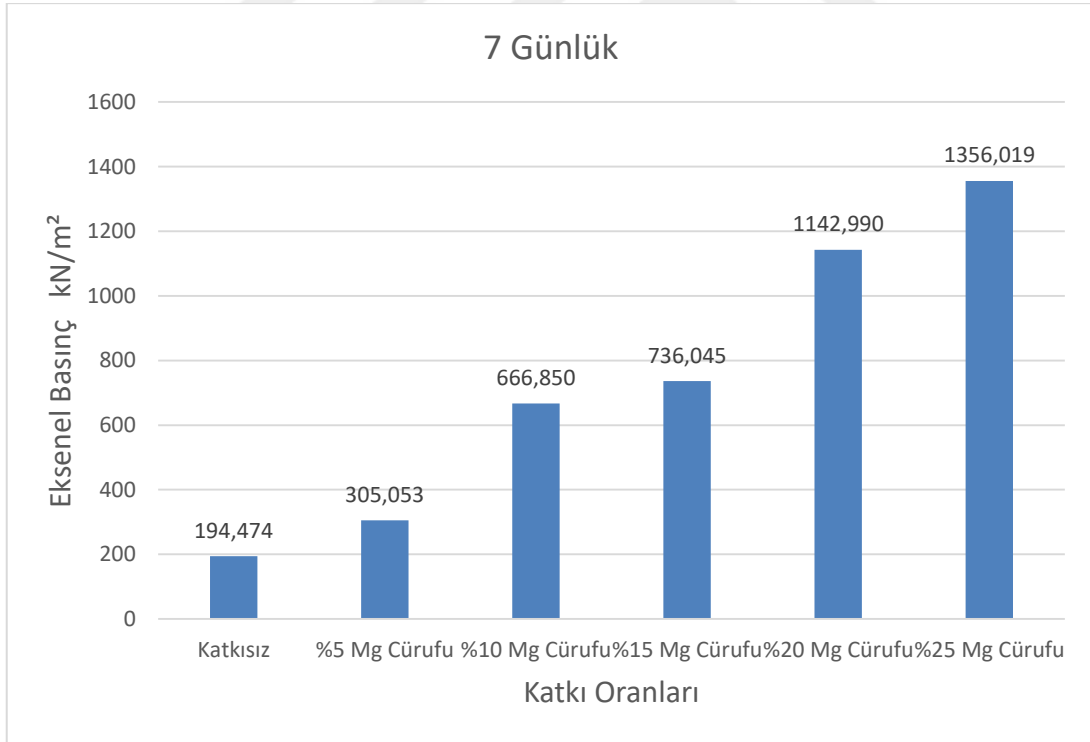


Şekil 4.13 Katkı oranı %25 olan numune dayanımlarının kür süresine göre değerlendirilmesi.

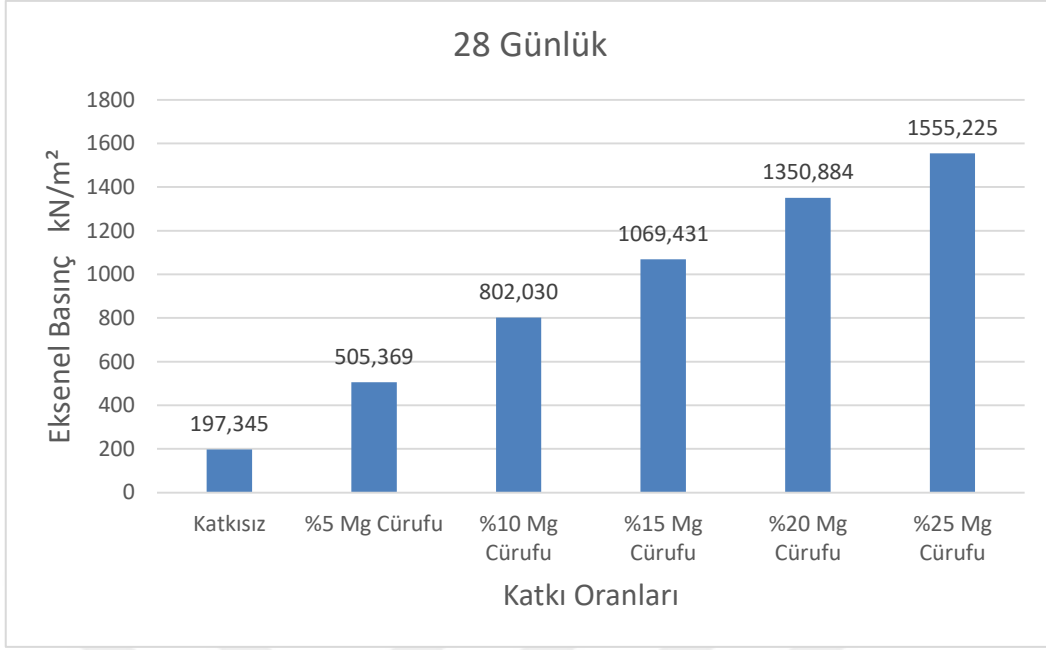
Farklı katkı oranlarına sahip karışımlarda kür sürelerine bağlı dayanım değişiklikleri grafiklerle incelendiğinde 1 gün, 7 gün, ve 28 günlük kür sürelerinde dayanımlarda dengeli bir şekilde artışlar gözlemlenmiştir. Dayanım artışları grafikler üzerinde Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 ile verilmiştir.



Şekil 4.14 Kür süresi 1 günlük numune dayanımlarının katkı oranına göre değerlendirilmesi.

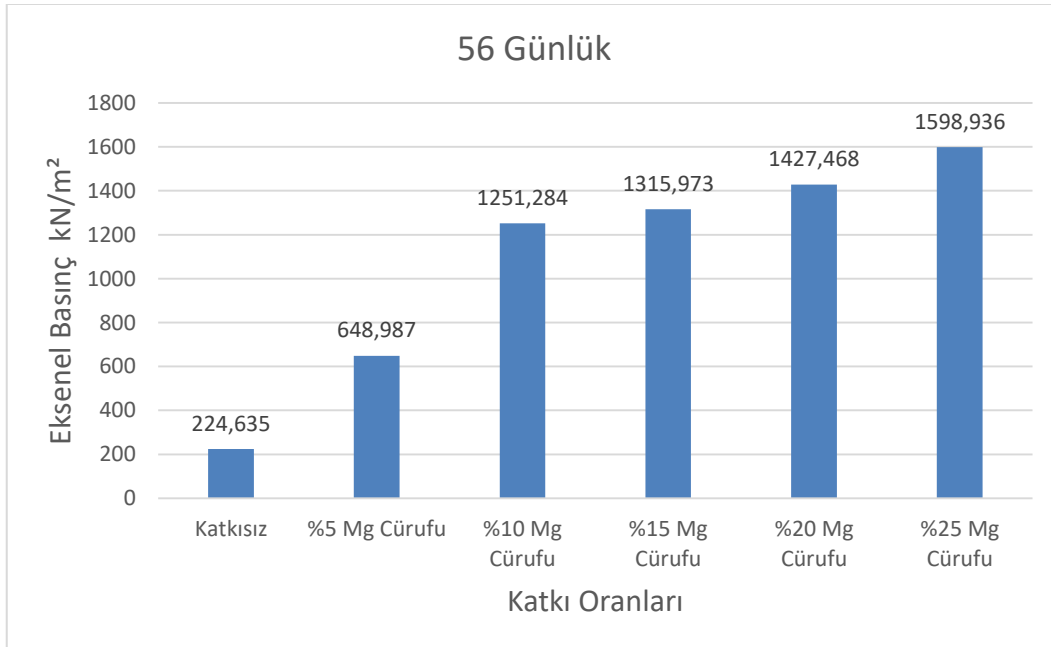


Şekil 4.15 Kür süresi 7 günlük numune dayanımlarının katkı oranına göre değerlendirilmesi.

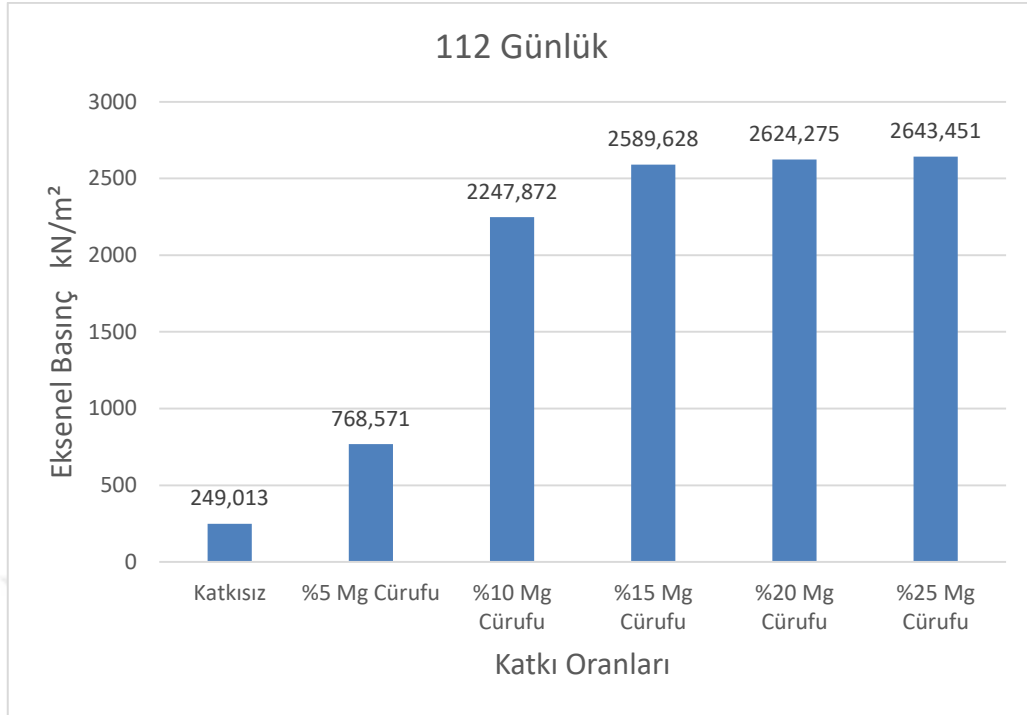


Şekil 4.16 Kür süresi 28 günlük numune dayanımlarının katkı oranına göre değerlendirilmesi.

Kür süreleri 56 ve 112 günlük numunelerin dayanım sonuçlarında %10 katkı oranı ve sonrası artan katkı oranlarında katkısız ve %5 katkı oranına göre ani bir artış söz konusu olmuştur. Dayanım artışları grafikler üzerinde Şekil 4.17 ve Şekil 4.18 ile verilmiştir.



Şekil 4.17 Kür süresi 56 günlük numune dayanımlarının katkı oranına göre değerlendirilmesi.



Şekil 4.18 Kür süresi 112 günlük numune dayanımlarının katkı oranına göre değerlendirilmesi.

4.4 Kür Sürelerine Bağlı Su Muhtevası Değişimi

Numuneler kür süreleri boyunca streç filmle sarılmış şekilde desikatörlerde saklanmıştır. Kür süreleri boyunca su muhtevasının değişmemesi önemlidir. Çünkü katkı maddesi ile zemin taneleri arasında reaksiyon için suya ihtiyaç vardır. Bu nedenle su muhtevasında değişim olup olmadığının belirlenmesi amacıyla kür süreleri sonunda deneyden hemen önce numune ağırlıkları tartılmış ve kür süresi başındaki ağırlıklığı ile karşılaştırılarak su muhtevasındaki değişim belirlenmiştir. Çizelge 4.4 incelendiğinde tüm numuneler için su kaybının % 0.5'ten az olduğu görülmüştür. Bu durum streç film sarılması ve desikatör içinde muhafaza edilmesinin etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca kür süresi boyunca reaksiyon için gereken su miktarının korunduğu ve dayanım artışlarının reaksiyondan kaynaklandığının bir göstergesi olduğu söylenebilir.

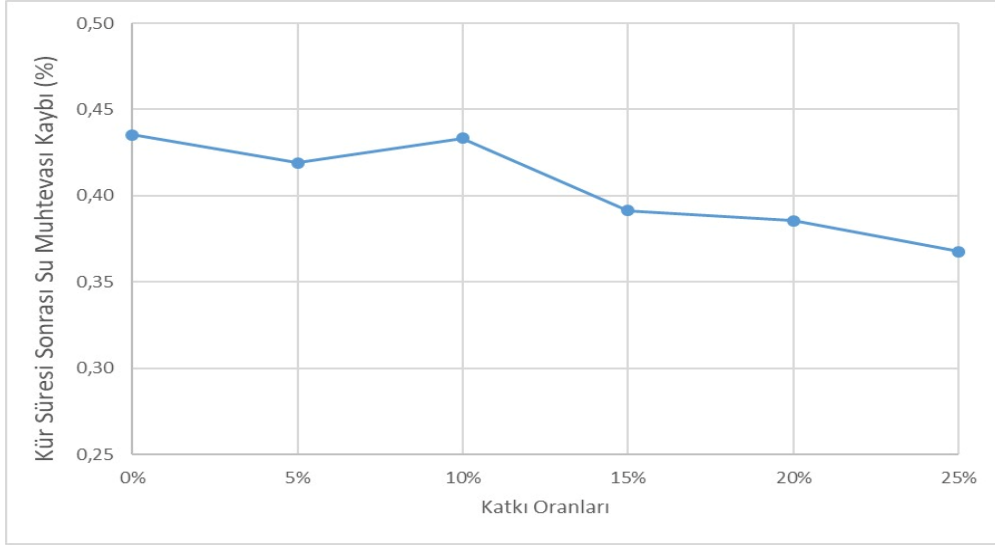
Çizelge 4.4 Numunelere ait serbest basınç deneyleri sonrası su muhtevası kayıpları.

NUMUNE ADI	Su Muhtevası Kaybı (%)					ORT
	1 GÜN	7 GÜN	28 GÜN	56 GÜN	112 GÜN	
Doğal Zemin	0,38	0,42	0,46	0,5	0,47	0,44
Doğal Zemin + %5 Mg Cürufu	0,34	0,38	0,36	0,58	0,46	0,42
Doğal Zemin + %10 Mg Cürufu	0,33	0,43	0,46	0,49	0,42	0,43
Doğal Zemin + %15 Mg Cürufu	0,34	0,4	0,36	0,4	0,47	0,39
Doğal Zemin + %20 Mg Cürufu	0,34	0,37	0,37	0,43	0,43	0,39
Doğal Zemin + %25 Mg Cürufu	0,3	0,37	0,36	0,37	0,44	0,37
ORTALAMA SU KAYBI	0,34	0,4	0,39	0,46	0,45	

Kür süreleri boyunca su muhtevastaki değişimler Şekil 4.19 ve 4.20’de görülmektedir. Numunelerde ortalama su muhtevası değişimi kür düresi arttıkça artma eğilimi gösterirken katkı oranı arttıkça azalma eğilimi göstermektedir.



Şekil 4.19 Kür süresi boyunca su kayıplarının değerlendirilmesi.



Şekil 4.20 Katkı oranlarına bağlı olarak su kayıplarının değerlendirilmesi.

4.5 Elastisite Modülünün Grafiklerle Belirlenmesi

Elastisite modülü, mühendislik tasarımları için önemli bir parametre olup malzemelerin rijitliğini tanımlayan yapısal bir özelliktir. Başka bir deyişle malzemenin şekil değiştirmeye karşı koyabilme kapasitesidir.

Çalışmamızda gerçekleştirdiğimiz serbest basınç deneyi gerilme-deformasyon eğrisinden elastisite modülü elde edilmiştir. Elastisite modülünün belirlenmesi için grafikte nonlineer bir gerilme-deformasyon eğrisi meydana geldiğinden dolayı teğet (tanjant) modülü kullanılmıştır.

Artan katkı oran ve kür sürelerinde numunelerin elastisite modüllerinde artış meydana gelmiştir. Başka bir deyişle katkı oranı ve kür süreleri arttıkça numuneler üzerinde dayanım artmıştır. Elastisite modülü 1 günlük kür süresinde katkısız numunede 87,5 kPa iken 112 gün kür süresine sahip %25 magnezyum cürufu katkılı numunede 3750 kPa değer ölçülerek yaklaşık 40 kat artış meydana gelmiştir. Elde edilen değerlerin ulaşıldığı grafiklerden bazıları Ek-3'te gösterilmiştir. Tüm karışım oranlarındaki numunelerin elastisite modülü değerleri Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5 Numunelere ait elastisite modülü değerleri.

NUMUNE ADI	Elastisite Modülü E (kPa)				
	1 GÜN	7 GÜN	28 GÜN	56 GÜN	112 GÜN
Doğal Zemin	87,50	133,33	140,00	145,00	150,00
Doğal Zemin + %5 Mg Cürufu	156,00	340,91	675,00	725,00	789,47
Doğal Zemin + %10 Mg Cürufu	325,00	638,30	850,00	1750,00	1875,00
Doğal Zemin + %15 Mg Cürufu	675,00	689,66	1852,94	1850,00	2403,85
Doğal Zemin + %20 Mg Cürufu	750,00	1750,00	1875,00	1724,14	3000,00
Doğal Zemin + %25 Mg Cürufu	875,00	1800,00	2000,00	2222,22	3750,00

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada magnezyum üretimi sırasında açığa çıkan magnezyum cürufunun ince taneli zeminin iyileştirmesinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla ince daneli zemin numunesine farklı oranlarda cüruf ilave edilerek karışımlar hazırlanmış ve numuneler farklı sürelerde küre tabi tutulmuştur. Kür süreleri sonunda dayanım deneyleri yapılmıştır. Katkı oranı ve kür sürelerinin etkileri gözlenmiştir.

Deney sonuçları incelendiğinde;

- Kıvam limit deneyleri sonuçlarına göre zemin numunesinin içerisine magnezyum cürufu katılmasıyla likit limit değerlerinin azaldığı, plastik limit değerinin arttığı ve plastisite indisinin önemli oranda azaldığı gözlemlenmiştir.
- Katkı oranının %25 olduğu numunenin katkısız numuneye göre likit limit değerinin %11 azaldığı, plastik limit değerinin %34 arttığı ve plastisite indisinin %80 azaldığı gözlemlenmiştir.

- Kompaksiyon deneyi sonucunda numune karışımlarında magnezyum cürufu katkısının artmasıyla birlikte kuru birim hacim ağırlığının arttığı, optimum su muhtevalarının ise azaldığı gözlemlenmiştir.
- Serbest basınç deneyi için hazırlanan numunelerin kür şartlarında saklanması sırasında numunelerin su muhtevalarındaki değişimler incelendiğinde katkı oranı artarken su muhtevalarındaki kayıp yüzdesel olarak azalmıştır. Ancak kür süresinin uzamasına bağlı olarak su muhtevastaki yüzdesel kayıplar artmıştır.
- Basınç dayanımlarında tüm kür süreleri boyunca en yüksek dayanımı %25 katkı oranında hazırlanan numunelerden elde edilmiştir. 112 günlük kür süresi sonunda 2643,45 kPa dayanım sağlayan numune doğal zemin numunesine göre 10 kat dayanım elde etmiştir.
- Magnezyum cürufunun doğal zemine katılmasıyla hazırlanan numunelerde 7 gün sonunda 7 kata, 28 gün ile 56 gün sonunda 8 kata ve 112 gün sonunda 10 kata varan dayanım artışları gözlemlenmiştir. Bunun sebebi puzolanik bir malzeme olarak değerlendirilebilen magnezyum cürufunun içeriğinde bulunan kalsiyum oksit (CaO) ile belirli bir ısıda suyun tepkimesiyle hidrolik bağlayıcılık kazanarak dayanımda artışların meydana gelmesidir. Bu dayanım artışlarıyla birlikte magnezyum cürufunun ince daneli zeminlerde kullanılabilirliği kanıtlanmıştır.
- Kür süresi boyunca 56 gün bekletilen numunelerde %15 ve sonrası katkı oranları benzerlik göstermektedir. Aynı şekilde 112 günlük numunelerin dayanımlarında da benzerlikler kaydedilmiş olup 56 gün ve 112 günlük aynı katkı oranlarındaki numuneler arasında yaklaşık 1,5-2 kat dayanım artışı gözlemlenmiştir.
- Serbest basınç deneyi sonunda elde edilen gerilme- deformasyon eğrisi eğiminden belirlediğimiz elastisite modülü artan katkı oranları ve kür sürelerine bağlı olarak artmaktadır.

- Serbest basınç deneyi sonunda elde edilen veriler ışığında kür süresinin 112 gün sonrasına uzatılmasıyla dayanım değerlerinin artabileceği gözlemlenmiş olup deney daha uzun kür sürelerinde tekrarlanabilir.
- Bu çalışmada zeminlerde dayanım artışı için 56 gün ve sonrası kür süresindeki dayanımları göz önünde bulundurularak en az %15 cüruf katkısı önerilmiş olup %20 ve %25 katkı oranlarında yaklaşık benzer dayanımlar elde edilecektir.
- Ayrıca magnezyum cüruf katkısının zeminde ve dolaylı olarak yeraltı suyunda yapabileceği ağır metal kirliliği gibi zararlar belirlenmelidir. Çünkü zemin ve yeraltı suyunda limit değerlerin üzerinde oluşacak ağır metal artışları insan sağlığını olumsuz etkileyecek rahatsızlıklar oluşturabilir.

6. KAYNAKLAR

- Aksoy İ H, 1992, Uçucu Külün Geoteknikte Kullanımı, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi, 21-23 Ekim, İstanbul, 248-259.
- Ali M M, 2012, Kireç ve Uçucu Kül İle Stabilize Edilen Şişen Killerde Esneklik Modülü Tayini, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 109s, İstanbul.
- Anon, 2003, Flyash Facts for Highway Engineers, American Coal Ash Association, Technical Report Documentation Page, 1-75.
- Arman A ve Moonfish G A, 1972, Lime Stabilization of Organic Soils, Research Record No. 381, Highway Research Record, 37-45, Washington.
- Atanur A, 1972, Uçucu Küllerin Kimyasal ve Fiziksel Vasıfları ve Yapı Malzemesi olarak kullanılması, T.C. Bayındırlık Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları, 219s, Ankara.
- Ayan E, 2009, Derin Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Uygulamadan Örnekler, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 126s, İstanbul.
- Bagherinia M, 2013, Killerin Derin Karıştırma Yöntemi ile İyileştirilmesinde Doymamış Polyesterin Kullanılabilirliği, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 86s, Erzurum.
- Bel F, 2015, Metalik Magnezyum Üretim Tesisi Cüruf Atığının Değerlendirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 77s, İstanbul.
- Cedergren H R, 1989, Seepage, Drainage, and Flow Nets (3.Baskı), John Wiley and Sons Inc., 232-255, Florida.
- Cömert A T, 2005, Uçucu Küllerin Zemin Stabilizasyona Etkileri, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü ,Yüksek Lisans Tezi, 80s., Sakarya.

- Çakır M, 2001, Uçucu Küllerin Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 74s, İstanbul.
- Çalık Ü, 2012, Perlitin Puzolanik Katkı Olarak Kireçle Birlikte Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 177s, Trabzon.
- Çelik Z H, 2020, Zemin Stabilizasyonunda Pomza Taşının İncelik Etkisinin İncelenmesi, Bayburt Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 107s, Bayburt.
- Çetin A Y, 2011, Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Alternatif Malzemeler ile Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 143s, İstanbul.
- Das B M, 2002, Principles of Geotechnical Engineering. Cengage Learning, Stamford.
- Demir H, 2007, Taş Kolon ve Geopier Uygulaması ile Zemin İyileştirmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 175s, İstanbul.
- Demiröz A, Karaduman M, 2009, Zemin İyileştirme Metotları, Selçuk Teknik Dergisi, Cilt 8, Sayı:3, 176-192.
- Dilek İ G, 2022, Magnezyum Cürufunun Çimento ve Beton Katkısı Olarak Kullanımı, Hazır Beton Dergisi, 73-77.
- Doru H M, 2014, Çimento Stabilize Zemin İyileştirmelerinde Uçucu Kül Kullanımı, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 65s, Şanlıurfa.
- Durgunoğlu H T, Kulaç F H, İkiz S, ve Karadayılar T, 1992, Taş Kolonlar ile Zemin Islahı Üzerine bir Uygulama, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi, 21-23 Ekim, İstanbul.

- Ghabaee S, 2015, Kireç ile Stabilize Edilmiş Bentonitin Kür Süresinin Mukavemet Üzerindeki Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 129s, İstanbul.
- Han J, 2015, Principles and Practice of Ground Improvement. New Jersey : Wiley.
- Handy R L ve Williams N W, 1967, Chemical Stabilization of an Active Landslide, 37 (8), 62-65, Iowa.
- Horne M R, 1964, The Consolidation of a Stratified Soil with Vertical and Horizontal Drainage, International Journal of Mechanical Sciences Vol: 6, 187-197.
- 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.
- Ilıcalı M, Tayfur S, Özen H, Sönmez İ ve Eren K, 2001, Asfalt ve Uygulamaları, İSFALT Bilimsel Yayınları, No:1, 280s, İstanbul.
- Ingles O G ve Metcalf J B, 1973, Soil Stabilization, John Wiley&Sons, New York.
- Karol R H, 2003, Chemical Grouting and Soil Stabilization (3. Baskı), Recised and Expanded, Rutgers University, New Jersey.
- Kavak A, 1996, The Behavior of Lime Stabilized Clays Under Cyclic Loading, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 167s, İstanbul.
- Kayabalı K, 2010, Geoteknik Mühendisliğine Giriş, Gazi Kitapevi, 636s, Ankara.
- Kayabalı K ve Mollamahmutoğlu M, 2004, Geoteknik Mühendisliği Elkitabı, McGraw-Hill El Kitapları, Robert W. Day, Gazi Kitabevi, Fersa Matbaası, 600s. Ankara.
- Kett I, 1998, Asphalt Materials and Mix Design Manual, Noyes Publications, New Jersey.
- Kızılcılık M, 2010, Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Kireç ile Stabilizasyonu, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 129s, Kocaeli.

- Lambe P C, Khosla N P ve Jayaratne N N, 1990, Soil Stabilization in Pavement Structures, Transportation Studies Research. 545-589, Sacramento.
- Leonards G A, Gutter W A ve Holts R D, 1980, Dynamic Compaction of Granular Soils, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 106, 35-44.
- Loos W, 1936, Comparative Studies of the Effectiveness of Different Methods for Compacting, International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 174-179, Massachusetts.
- Mehta P K, 1986, Concrete-Structure, Properties and Materials, Prentice-Hall, 350-400, New Jersey.
- Menard L ve Boise Y, 1975, Theoretical and Practical Aspects of Dynamics Consolidation, Geot, Vol. 25, No: 1, 3- 18, Londra.
- Mitchell J K, 1986, Practical Problems from Surprising Soil Behavior, Journal of Geotechnical Engineering, Vol 112, No. 3, 259-289.
- Mosavat N, Oh E, Chai G, 2012, A review of Electrokinetic Treatment Technique for Improving the Engineering Characteristics of Low Permeable Problematic Soils, Int. J. of Geomate, June, 2012, Vol. 2, No. 2 (Sl. No. 4), pp. 266-272, Japan.
- Nelson J D ve Miller D J, 1992, Expansive Soils-Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John Willey and Sons Inc., 259-261, Londra.
- Öksüz K, 2006, Afşin-Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Zemin Stabilizasyonunda kullanımı, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 102s, Adana.
- Önalp A, 1983, İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi (Cilt 2), Karadeniz Teknik Üniversitesi Yayın No: 3. 1225s, Trabzon.
- Önalp A, 2002, Geoteknik Bilgisi I, Birsen Yayınevi, 379s, İstanbul.

- Öntürk K, 2011, Zemin İyileştirmesinde Polisaj, Kireç ve Uçucu Külün Kullanımı, Sakarya Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 178s, Sakarya.
- Özaydın K, 2012, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Ondördüncü Ulusal Kongresi Sunumu, Yıldız Teknik Üniversitesi, 4-5 Ekim, 55s, İstanbul.
- Özaydın K, 2005, Zemin Mekaniği, Birsan Yayınevi, 261s, İstanbul.
- Özdemir A ve Özdemir M, 2007, Zayıf Zeminlerin İyileştirilmesi ve Son Yıllarda Yaygın Olarak Kullanılan Bazı Zemin İyileştirme Yöntemleri, Sondaj Dünyası, Sayı 3, 8s.
- Öztoprak S, 2016, Zeminlerin İyileştirilmesi: Yöntemlere Genel Bir Bakış, İMO İstanbul Karaköy Şb, Kasım 2016, İstanbul.
- Sağlamer A, 2011, Zemin iyileştirme yöntemleri, ZM11 Sunum Notları, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 76s, Trabzon.
- Terashi M, Juran I, 2000, Ground Improvement-State of the Art, Proceedings of GeoEng2000, 1: 461-519, Melbourne, Australia.
- TS 1900-1, 2006, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuar Deneyleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 1900-2, 2006, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuar Deneyleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tumluer G, 2006, Çimento Katkılı Kumlu Zeminlerin Mukavemeti, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 175s, Adana.
- Tunç A, 2001, Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas Yayın Dağıtım. 325s, İstanbul.
- Tunç A, 2002, Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları, Atlas Yayın Dağıtım, 912s, İstanbul.

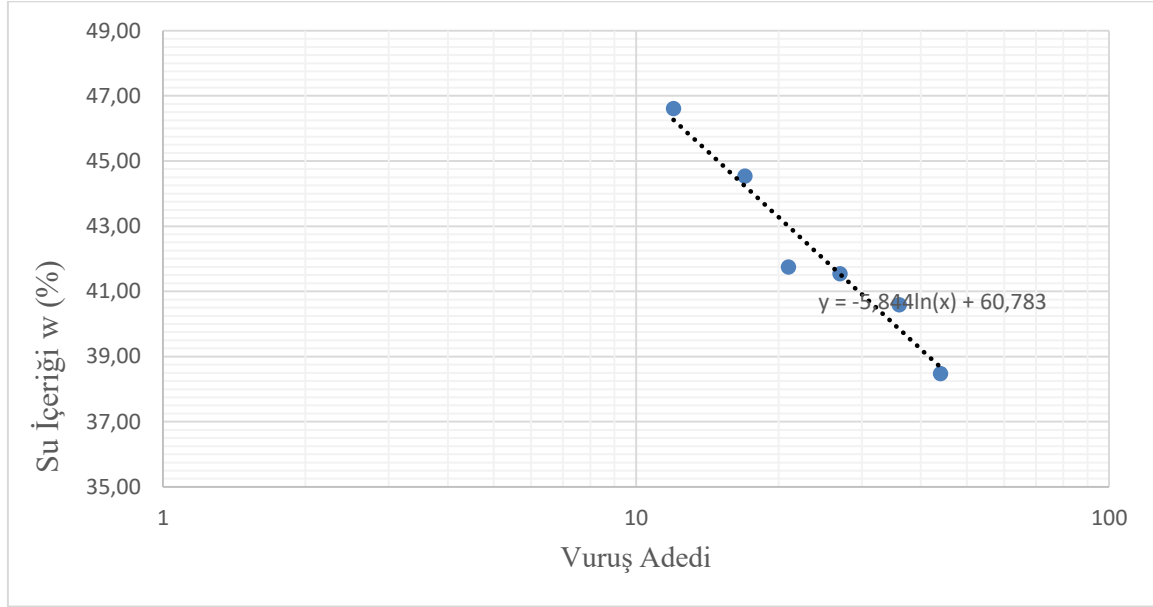
- Tunçdemir F, 2004, Temel Zeminlerinin Enjeksiyon Tekniğıyle İyileştirilmesi, Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi, Sayı 430, 59-64, Ankara.
- Türker P, Bahadır B, Katnaş F, Yeğınobalı A, 2007, Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, TÇMB, 114s, Ankara.
- U. S. Army Corps. of Eng., 2003, Guidelines on Ground Improvement for Structures and Facilities, Research No. 20314-1000, Dept of the Army, Washington.
- Uzuner B A, 2000, Temel Mühendisliğine Giriş (2.Baskı). Derya Kitabevi, 143s, Trabzon.
- Uzuner B A, 2006, Temel Mühendisliğine Giriş, Derya Kitabevi, 305s, Trabzon.
- Uzuner B A, 2005, Temel Zemin Mekaniğı, Derya Kitabevi, 484s, Trabzon.
- Ünal S, Yücel O, Kurt M, Gül S, 2014, Atık’tan Ürün’e Demir-Çelik Cürufu, İleri Teknolojiler Çalıştayı, 14-15-16 Ekim, 255-267, İstanbul.
- Ünlü Şahan M, 2016, Yapım İşlerinde Zemin İyileştirme Yöntemleri, İller Bankası Anonim Şirketi, Uzmanlık Tezi, 84s, Ankara.
- Welsh J P, Rubright R M ve Coomber D B, 1986, Jet Grouting for Support of Structures Session. ASCE Spring Convention, Seattle.
- Wu L, Han F, Liu G, 2021, Comprehensive Utilization of Magnesium Slag by Pidgeon Process, Springer Nature Singapore, 141s, Singapore.
- Yıldırım S, 2002, Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı, Birsen Yayınevi, 466s, İstanbul.
- Yılmaz F, 2015, Tüfit Taşların Zemin Stabilizasyonunda Kireçle Birlikte Kullanılabilirliğinin Standart Deneyler ve Bilgisayarlı Tomografi Tekniğı ile Araştırılması, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 201s, Trabzon.

İnternet Kaynakları

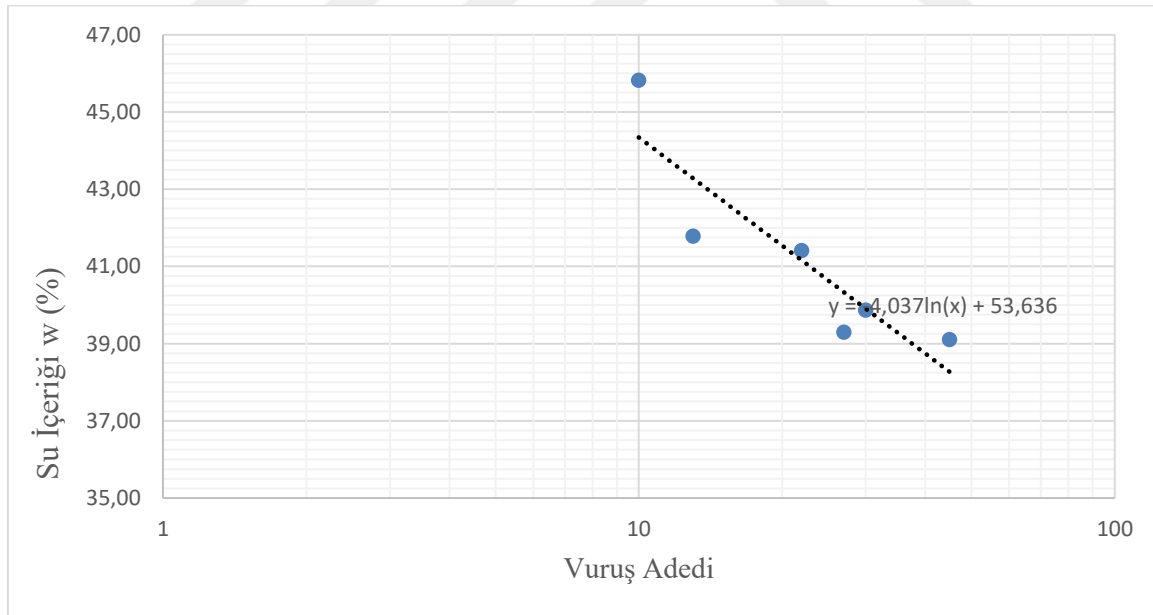
1. <https://www.sialloy.com/blog/Magnesium-slag-Usage.html>, 29.12.2022
2. <https://www.enerjiportali.com/magnezyum-nedir-nerelerde-kullanilir/>, 29.12.2022
3. <https://tr.wikipedia.org/wiki/Magnezyum>, 29.12.2022
4. <http://www.karmabilgi.net/magnezyumun-kullanim-alanlari/>, 29.12.2022
5. <https://www.makaleler.com/magnezyum-nedir-ozellikleri-faydalari>, 29.12.2022
6. <https://evrimagaci.org/magnezyum-9887>, 29.12.2022
7. <https://www.ceyrekmuhendis.com/dinamik-kompaksiyon/>, 27.12.2022
8. <https://taehwa.com.sg/jet-grout-pile/>, 27.12.2022
9. <https://www.ersamuhendislik.com.tr/hizmetler/zemin-iyilestirme-tas-kolon-imalati>, 27.12.2022
10. <https://imb.cu.edu.tr/storage/Ders%20Notlar%C4%B1%20ve%20Yararlı%C4%B1%20D%C3%B6k%C3%BCmanlar/Zemin%20%C4%B0yile%C5%9Ftirme%20Y%C3%B6ntemleri.pdf>, 27.12.2022
11. <https://nanokar.com/blog/etiket/0-dolomit.html>, 27.12.2022

EKLER

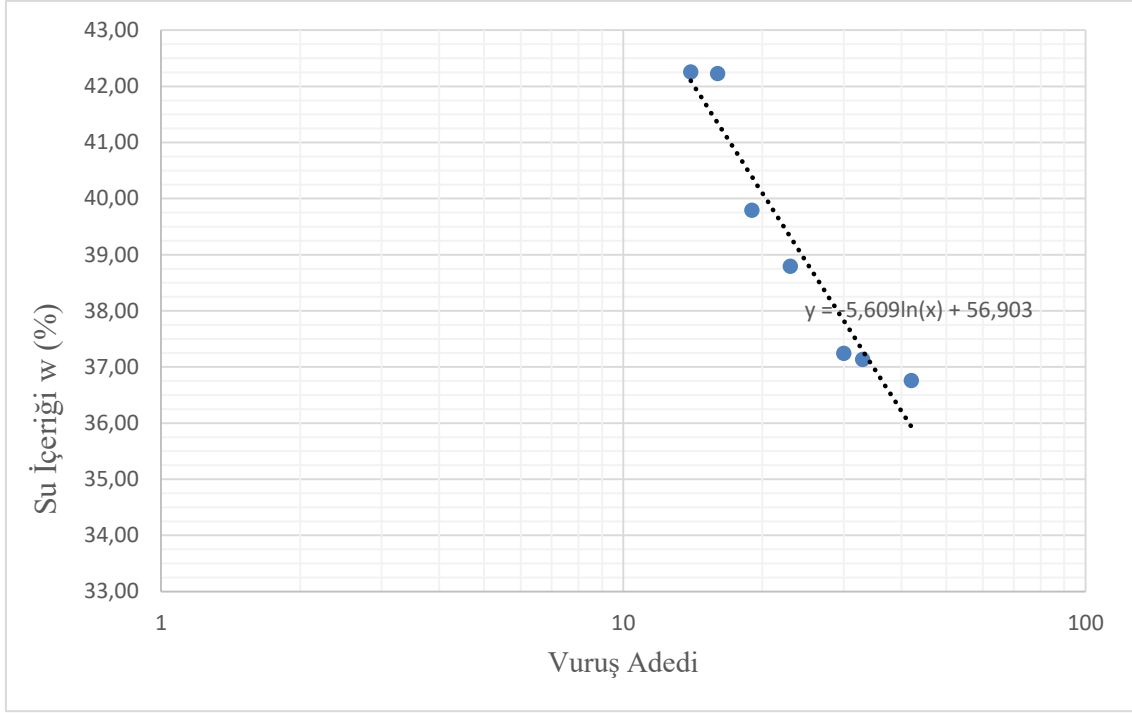
EK 1. Katkı oranlarına göre likit limit deney sonuçları.



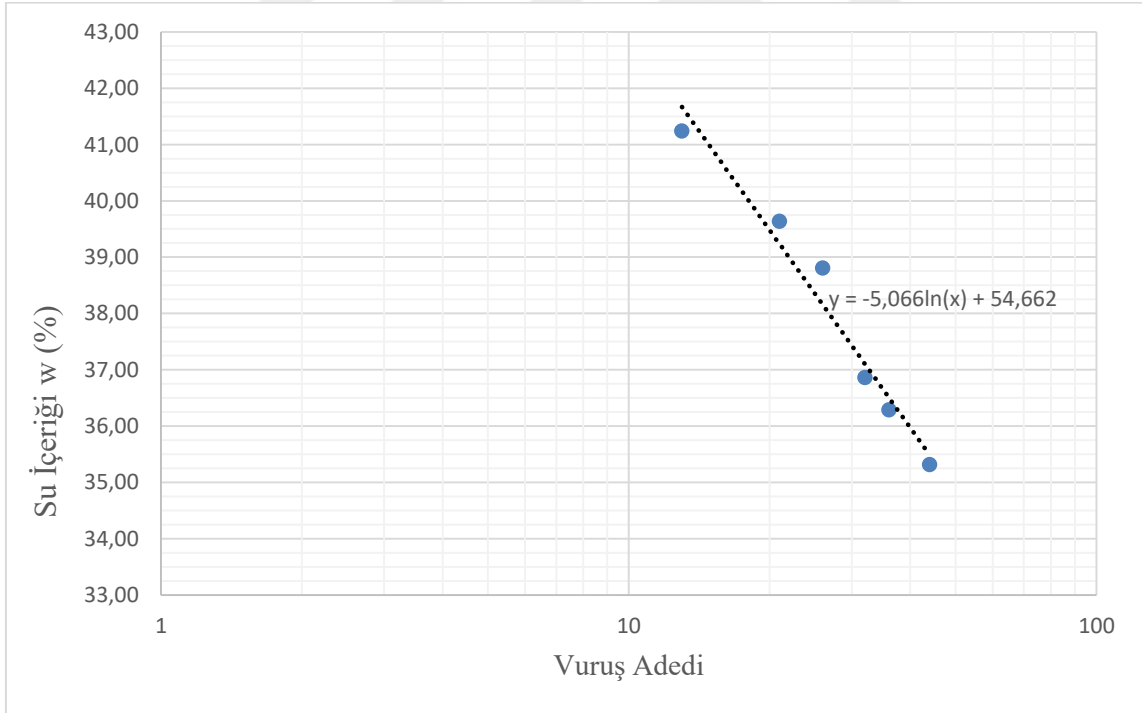
Şekil EK 1.1 %5 katkı oranında likit limit deney grafiği.



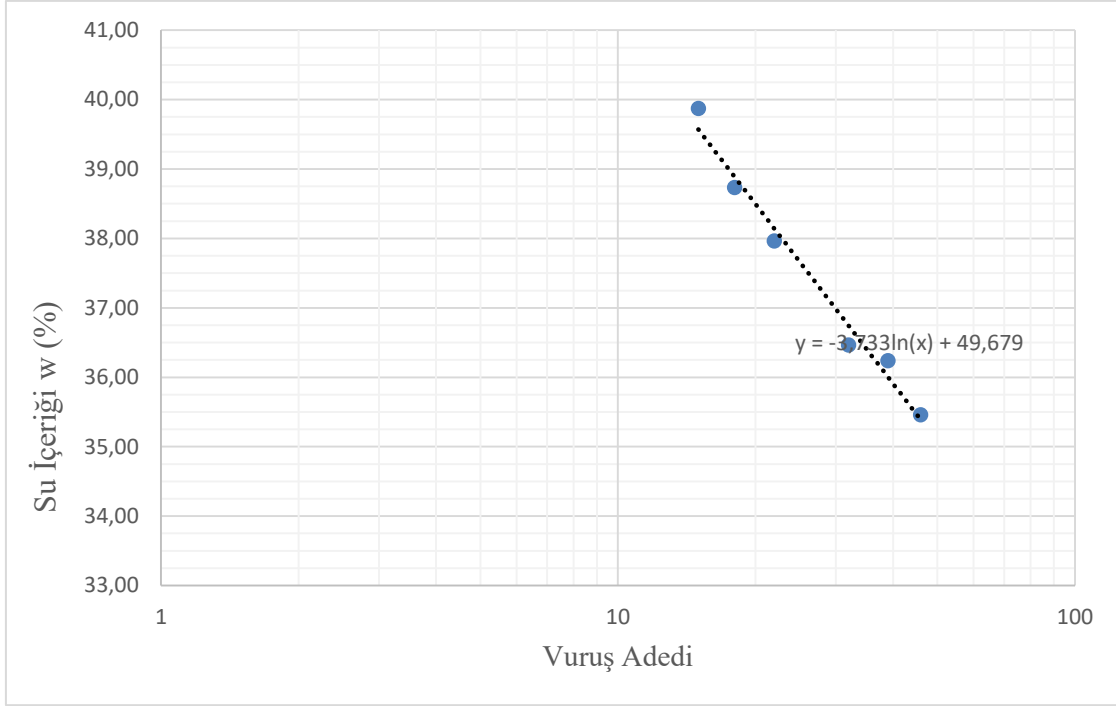
Şekil EK 1.2 %10 katkı oranında likit limit deney grafiği.



Şekil EK 1.3 %15 katkı oranında likit limit deney grafiği.

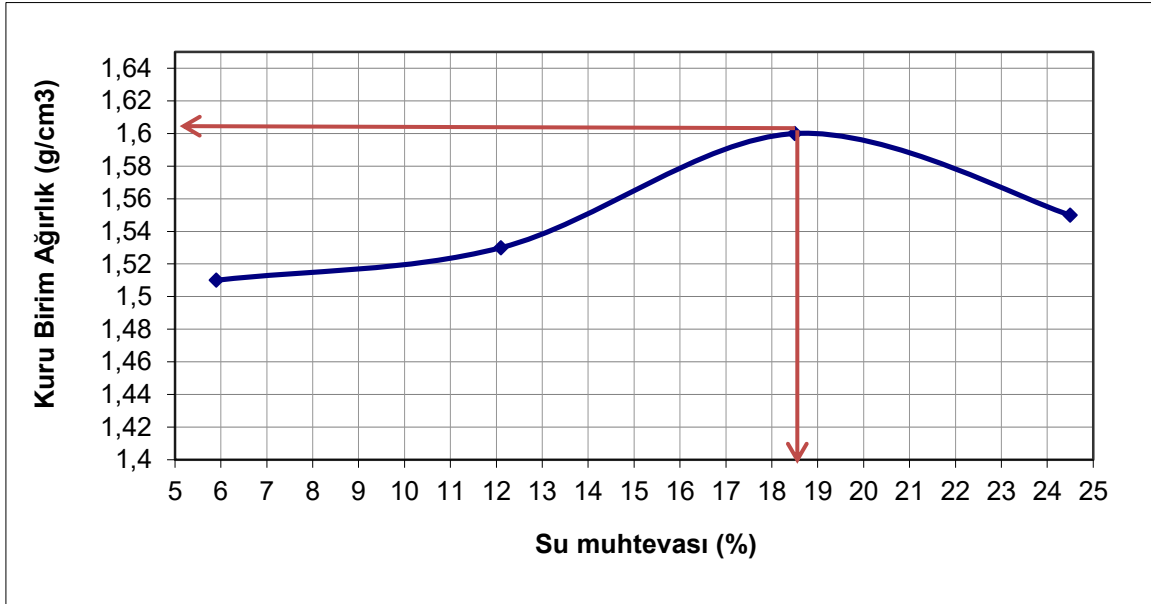


Şekil EK 1.4 %20 katkı oranında likit limit deney grafiği.

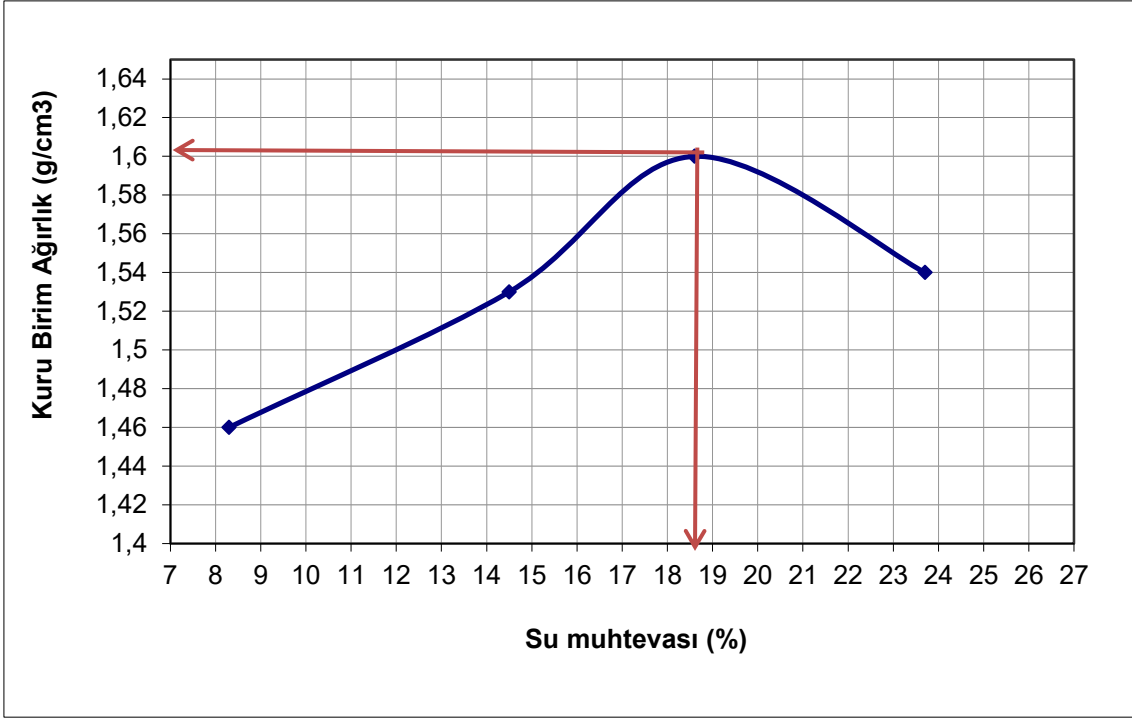


Şekil EK 1.5 %25 katkı oranında likit limit deney grafiği.

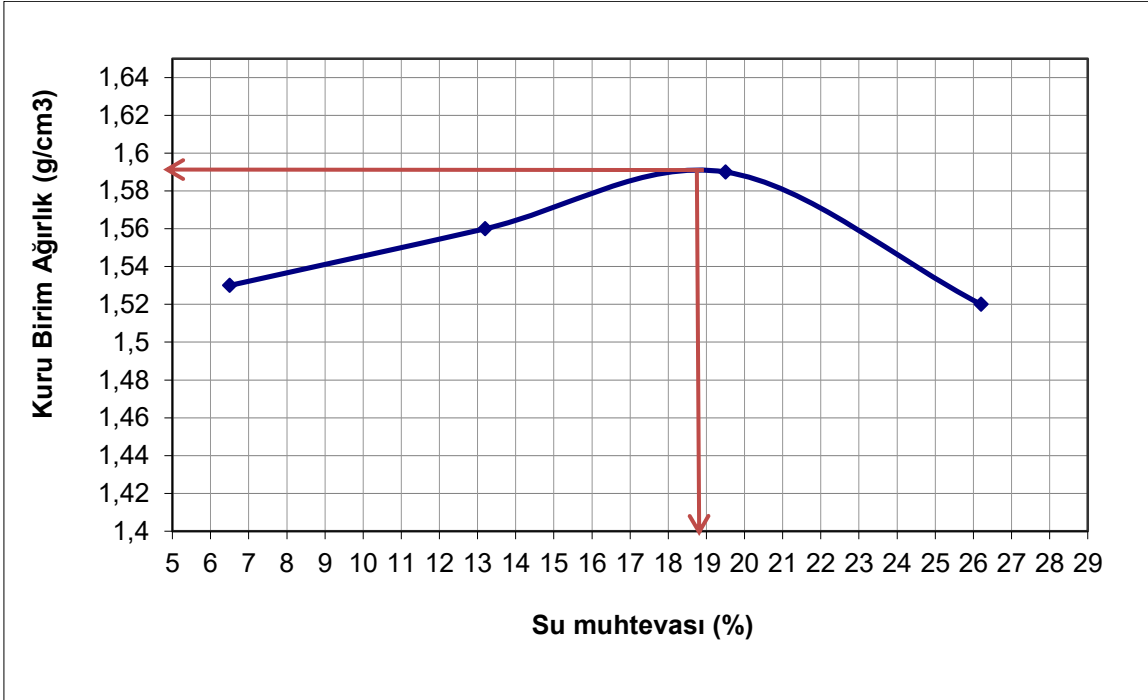
EK 2. Katkı oranlarına bağlı kompaksiyon grafikleri



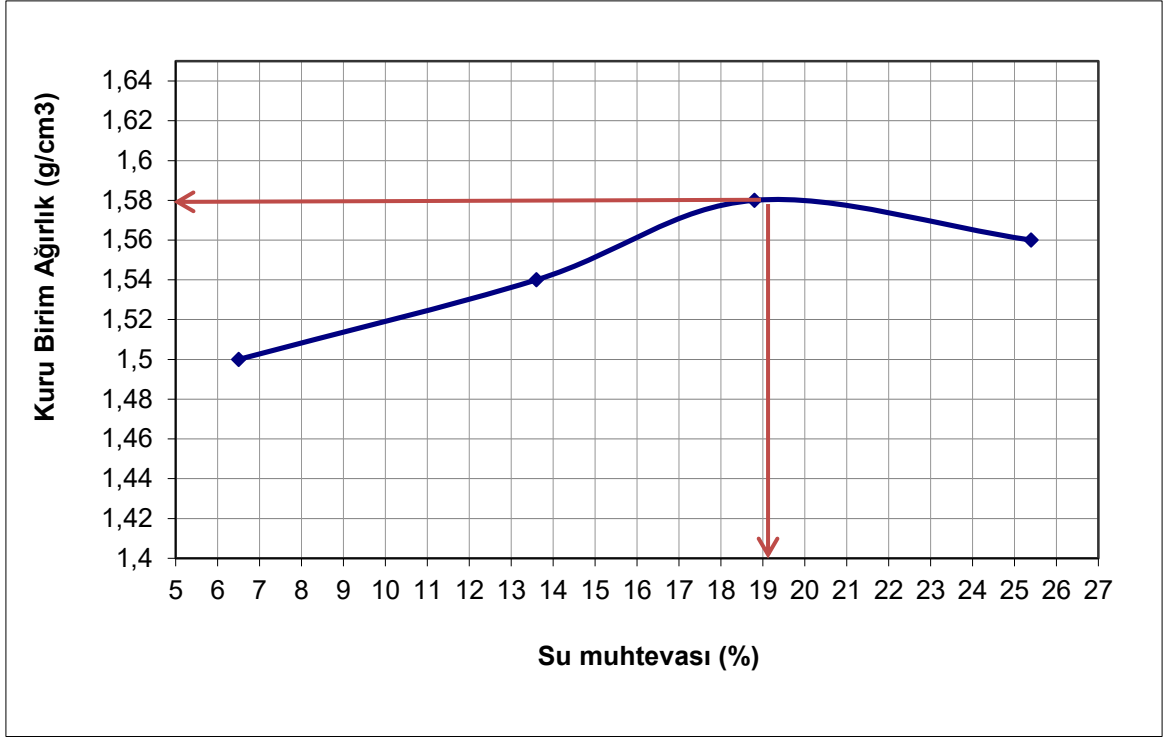
Şekil EK 2.1 %5 katkı oranında kompaksiyon eğrisi.



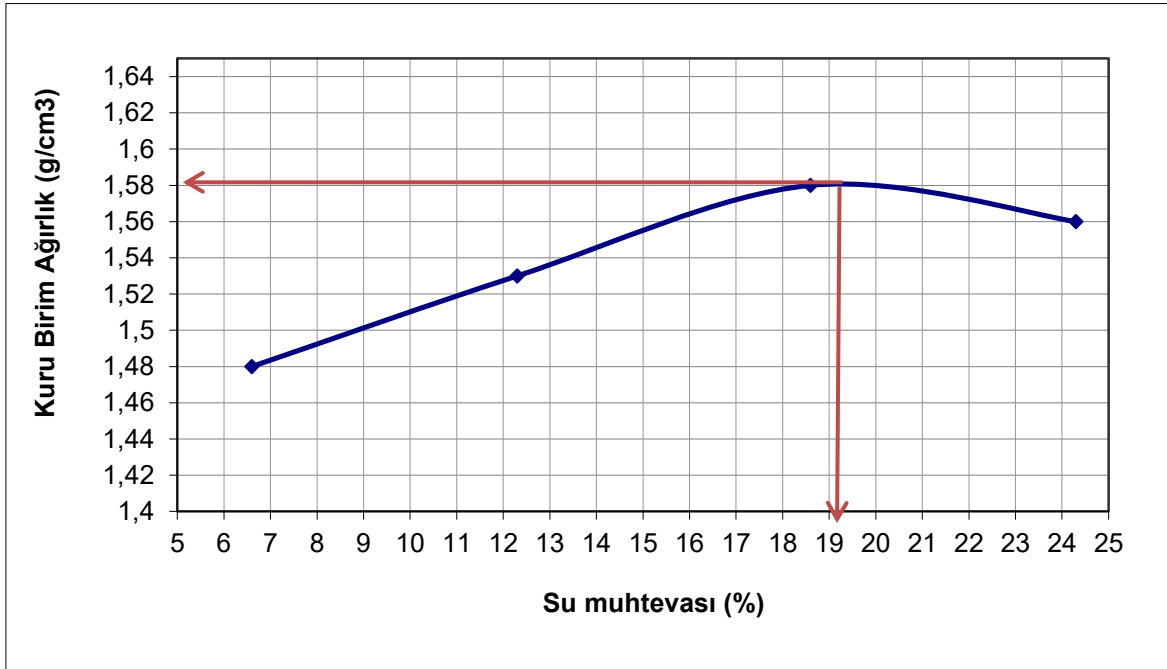
Şekil EK 2.2 %10 katkı oranında kompaksiyon eğrisi.



Şekil EK 2.3 %15 katkı oranında kompaksiyon eğrisi.

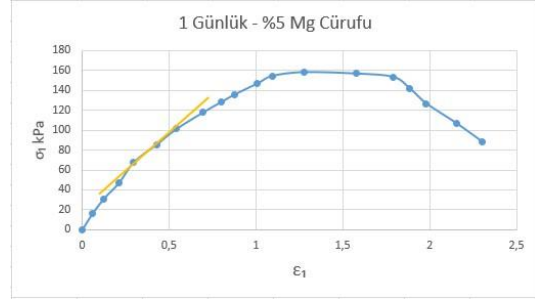
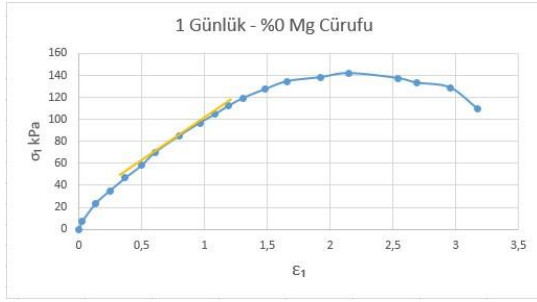


Şekil EK 2.4 %20 katkı oranında kompaksiyon eğrisi.

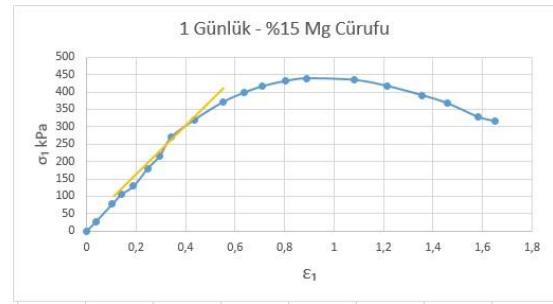
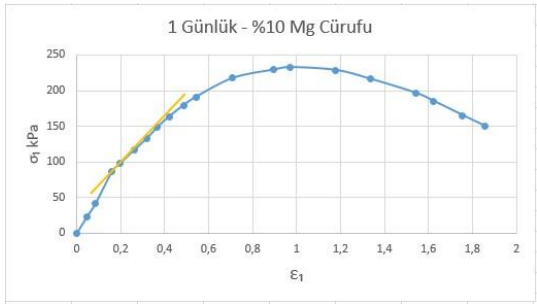


Şekil EK 2.5 %25 katkı oranında kompaksiyon eğrisi.

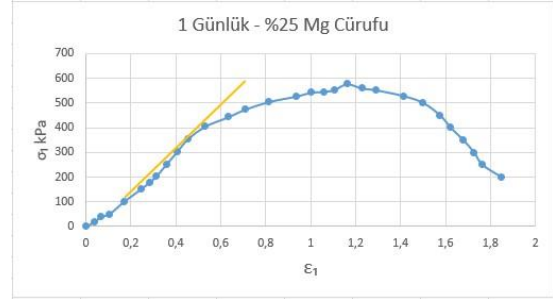
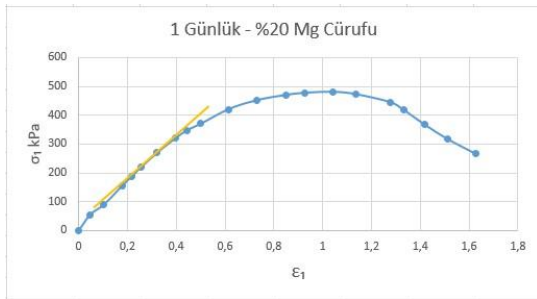
EK-3 Gerilme – deformasyon eğrisinden elastisite modülünün belirlenmesi.



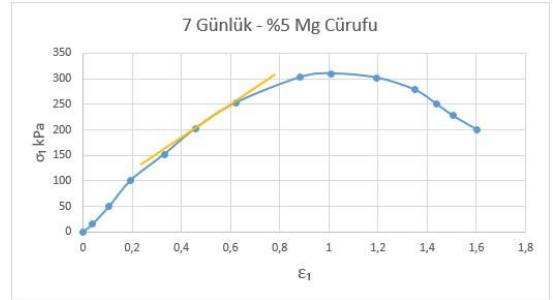
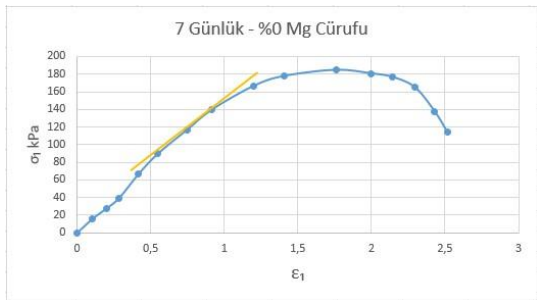
Şekil EK 3.1 1 Gün - %0-5 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.



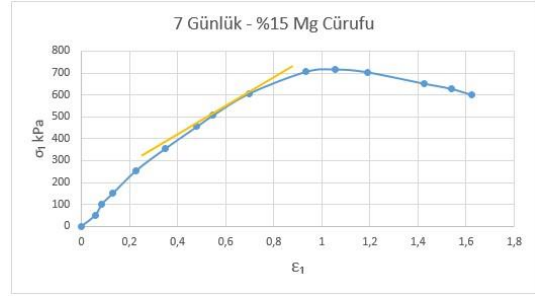
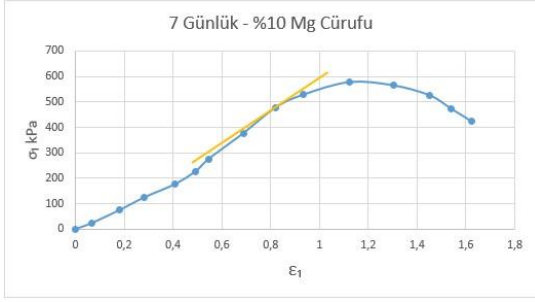
Şekil EK 3.2 1 Gün - %10-15 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.



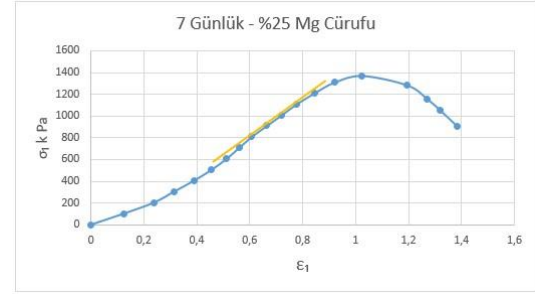
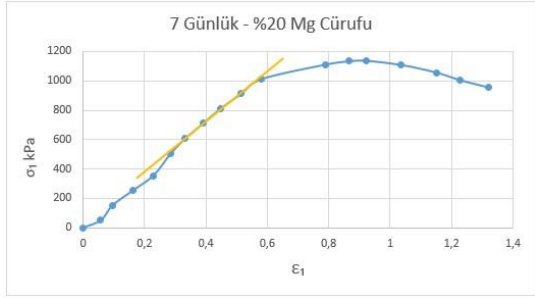
Şekil EK 3.3 1 Gün - %20-25 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.



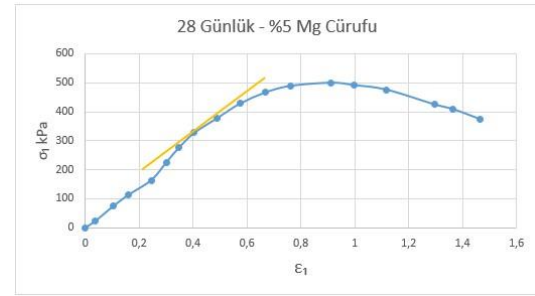
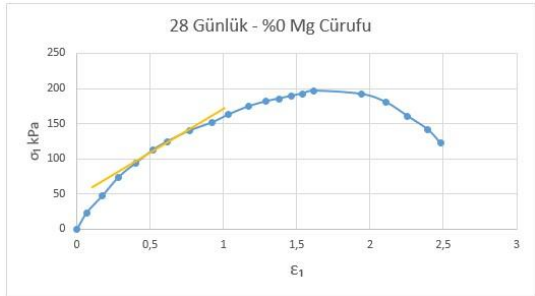
Şekil EK 3.4 7 Gün - %0-5 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.



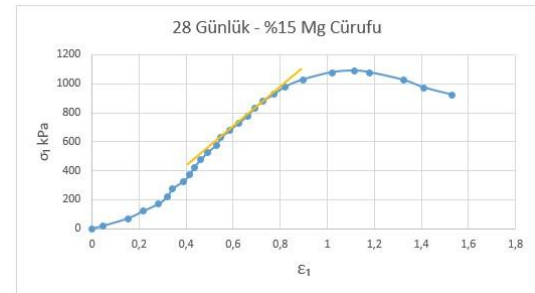
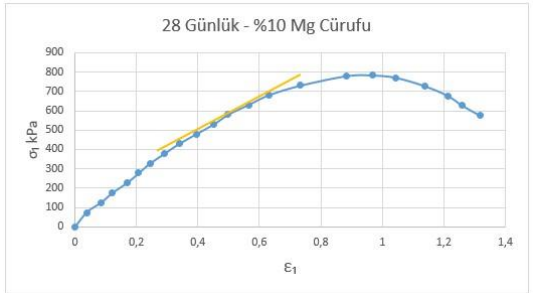
Şekil EK 3.5 7 Gün - %10-15 Katkılı Numunelerin Elastisite Modülünün Belirlenmesi



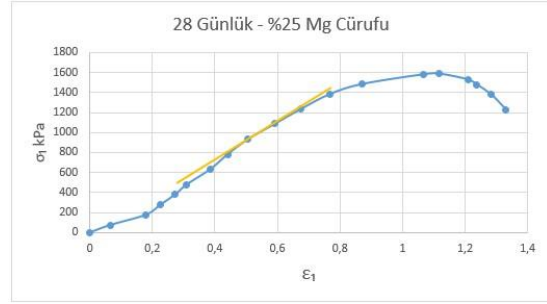
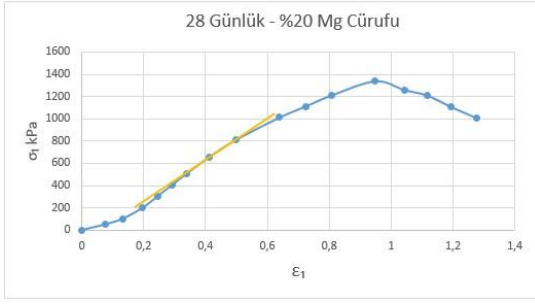
Şekil EK 3.6 7 Gün - %20-25 Katkılı Numunelerin Elastisite Modülünün Belirlenmesi



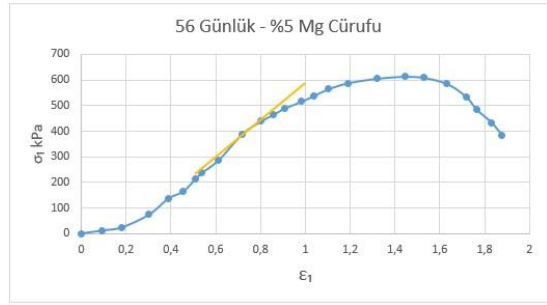
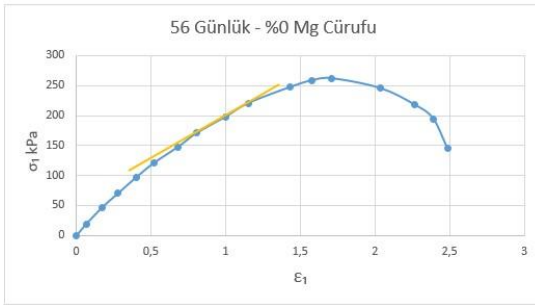
Şekil EK 3.7 28 Gün - %0-5 katkıli numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.



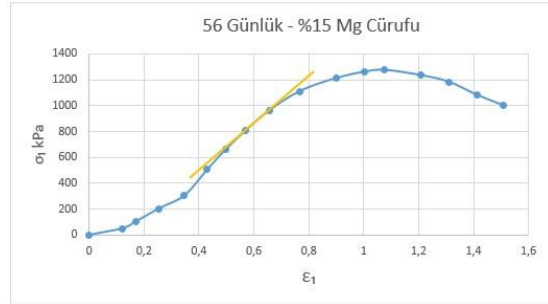
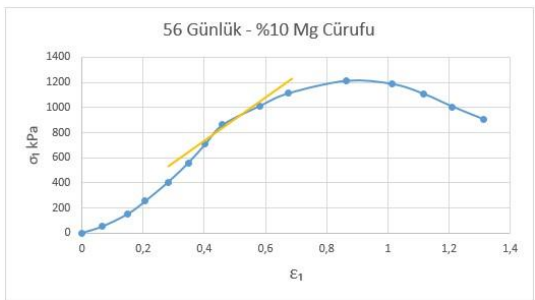
Şekil EK 3.8 28 Gün - %10-15 katkıli numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.



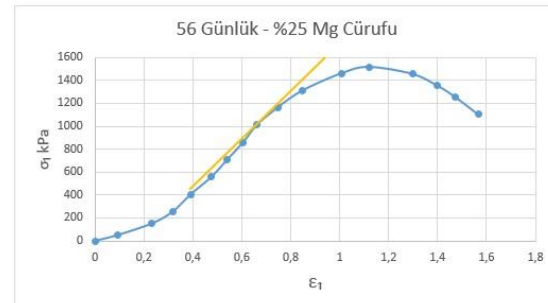
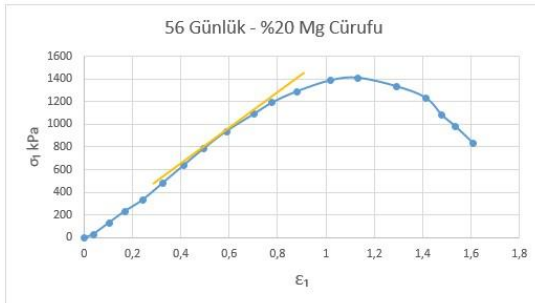
Şekil EK 3.9 28 Gün - %20-25 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.



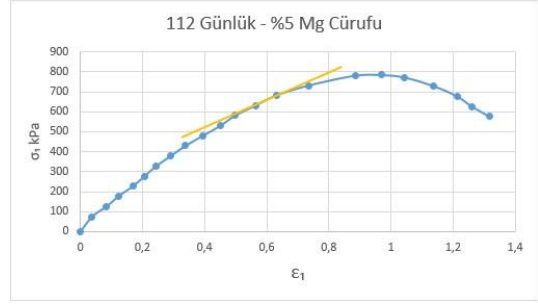
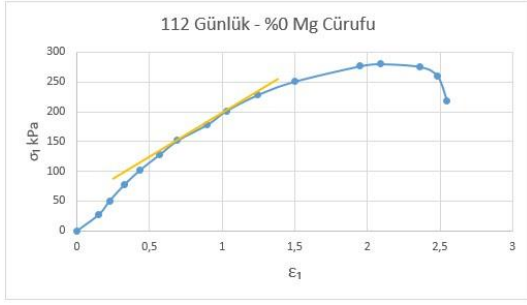
Şekil EK 3.10 56 Gün - %0-5 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.



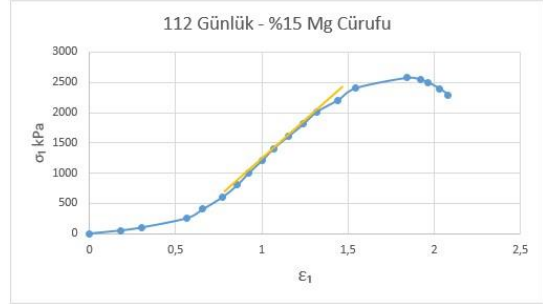
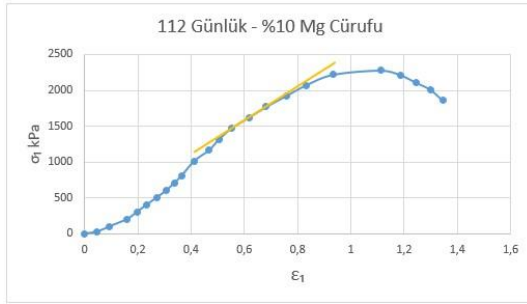
Şekil EK 3.11 56 Gün - %10-15 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.



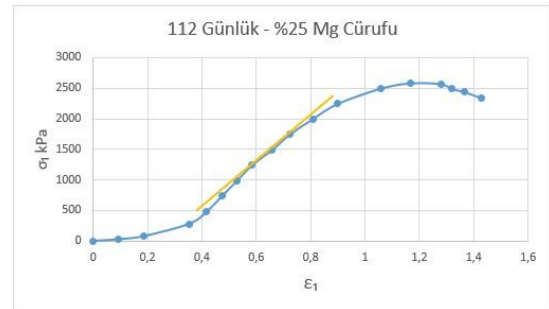
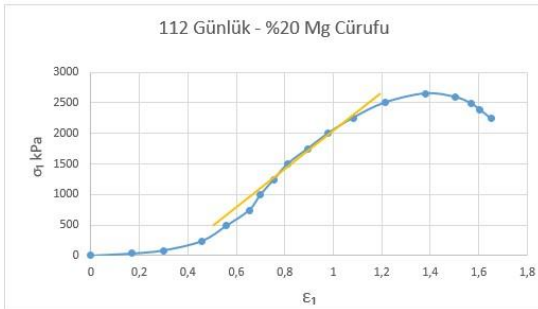
Şekil EK 3.12 56 Gün - %20-25 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.



Şekil EK 3.13 112 Gün - %0-5 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.



Şekil EK 3.14 112 Gün - %10-15 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.



Şekil EK 3.15 112 Gün - %20-25 katkılı numunelerin elastisite modülünün belirlenmesi.