



**MAGNEZYUM CÜRUFUNUN İRİ DANELİ
ZEMİNLERİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE
KULLANILABİLİRLİĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali YAMAN

**Danışman
Prof. Dr. İsmail ZORLUER**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Şubat 2023

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAGNEZYUM CÜRUFUNUN İRİ DANELİ ZEMİNLERİN
İYİLEŞTİRLMESİNDE KULLANILABİLİRLİĞİ

Ali YAMAN

Danışman

Prof. Dr. İsmail ZORLUER

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Şubat 2023

TEZ ONAY SAYFASI

Ali YAMAN tarafından hazırlanan “Magnezyum Cürufunun İri Daneli Zeminlerin İyileştirilmesinde Kullanılabilirliği” 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

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

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

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

.....

Prof. Dr. İbrahimEROL
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

Ali YAMAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MAGNEZYUM CÜRUFUNUN İRİ DANELİ ZEMİNLERİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE KULLANILABİLİRLİĞİ

Ali YAMAN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İsmail ZORLUER

Dünya genelinde nüfus artışı beraberinde barınma ihtiyacının artışına neden olmaktadır. İnşaat yapılacak sağlam zeminler azalmakla beraber, sağlam olmayan zeminlerin ıslahı konusunda araştırmalar bir hayli fazladır. Endüstriyel gelişmeler sonucu açığa çıkan atıkların, zemin iyileştirmede kullanımı konusu dünya gündemi için önemlidir. Bu atıkların doğaya ve canlılara verdiği zararlar çok fazladır. Bu çalışmada endüstriyel bir atık olan magnezyum cürufunun zemin iyileştirmesinde kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Standart Proctor deneyi eşliğinde bulunan maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevalarına göre zemine %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 magnezyum cürufu ilave edilerek numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler, 1, 7, 28, 56, 112 günlük kür sürelerinde bekletildikten sonra tek eksenli basınç ve permeabilite deneylerine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre kullanılan katkı arttıkça basınç dayanımı artmakta olup geçirimsizliği azalmaktadır. Dolayısıyla magnezyum cürufunun kullanımı zemin iyileştirmesinde olumlu sonuçlar vermektedir. Atık malzeme kullanılarak hem ekonomiye katkıda sağlanacaktır hem de çevreye verdiği zararlar azaltılacaktır.

2023, x + 70 sayfa

Anahtar Kelimeler: İri daneli zeminler, Zemin iyileştirme, Magnezyum cürufu, Basınç dayanımı, Geçirimsizlik.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

USABILITY OF MAGNESIUM SLAG FOR IMPROVEMENT OF COARSE SOILS

Ali YAMAN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. İsmail ZORLUER

Population growth around the world leads to an increase in the need for housing. Although the solid ground to be built on is decreasing, there is a lot of research on the improvement of unsound soils. The issue of the use of wastes generated as a result of industrial developments in soil improvement is important for the world agenda. The damage these wastes cause to nature and living things is very high. In this study, the usability of magnesium slag, an industrial waste, in soil improvement was investigated. Samples were prepared by adding 5%, 10%, 15%, 20%, 25% and 30% magnesium slag to the ground according to the maximum dry unit volume weight and optimum water content found in the standard Proctor test. The prepared samples were subjected to uniaxial pressure and permeability tests after being kept for curing periods of 1, 7, 28, 56, and 112 days. According to the test results, as the additive used increases, the compressive strength increases and the permeability decreases. Therefore, the use of magnesium slag gives positive results in soil improvement. By using the waste material, both the economy can be contributed and the damage to the environment will be reduced.

2023, x + 70 pages

Keywords: Coarse soils, Improvement of soils, Magnesium slag, Compressive strength, Permeability.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İsmail ZORLUER, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Murat KİLİT'e, değerli arkadaşım İnşaat Mühendisi Murat YEŞİLÇAY'a, bana geoteknik anabilim dalını sevdiren Sayın Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ'e, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Ali YAMAN
Afyonkarahisar 2023

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
RESİMLER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	2
2.1 Zemin İyileştirme.....	2
2.2 Zemin İyileştirme Yöntemleri	3
2.2.1 Yüzeysel Zemin İyileştirme	5
2.2.1.1 Katkısız Zemin İyileştirme.....	5
2.2.1.2 Katkılı Zemin İyileştirme	7
2.2.2 Derin Zemin İyileştirme.....	11
2.2.2.1 Kohezyonsuz Zeminlerde Derin Zemin İyileştirme.....	11
2.2.2.2 Kohezyonlu Zeminlerde Derin Zemin İyileştirme	15
2.3 Magnezyum	18
2.3.1 Magnezyumun Tarihçesi	18
2.3.2 Magnezyumun Özellikleri.....	19
2.3.3 Magnezyumun Avantajları ve Dezavantajları.....	20
2.3.4 Magnezyumun Kullanım Alanları.....	20
2.3.4.1 Magnezyumun Otomotiv Sektöründe Kullanımı	21
2.3.4.2 Magnezyumun Havacılık Sektöründe Kullanımı	21
2.3.4.3 Magnezyumun Elektronik Sektöründe Kullanımı.....	21
2.3.5 Manyezit.....	22
2.3.5.1 Manyezit Yatakları	22
2.4 Magnezyum Cürufu	23
2.4.1 Magnezyum Cürufunun Özellikleri	24
2.4.1.1 Kimyasal Özellikleri.....	24
2.4.1.2 Fiziksel Özellikleri	25

2.4.2 Magnezyum Cürufunun Zararları	26
2.5 Önceki Çalışmalar.....	26
3. MATERYAL ve METOT	30
3.1 Materyal	30
3.1.1 Zemin Numunesi	30
3.1.2 Magnezyum Cürufu	31
3.2 Metod	32
3.2.1 Elek Analizi.....	32
3.2.2 Standart Proctor Deneyi (Kompaksiyon Deneyi)	33
3.2.3 Tek Eksenli Basınç Deneyi (Serbest Basınç Deneyi)	34
3.2.4 Permeabilite Deneyi (Geçirimsizlik Deneyi)	38
4. BULGULAR	40
4.1 Yapılan Deneysel Çalışmalar.....	40
4.1.1 Elek Analizi Deneyi Sonuçları.....	40
4.1.2 Kompaksiyon Deneyi Sonuçları.....	42
4.1.3 Tek Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları.....	43
4.1.4 Numunelerde Kür Süresine Bağlı Su Muhtevastaki Değişim.....	51
4.1.5 Permeabilite Deneyi Sonuçları.....	53
4.1.6 Eksenel Basınç Deneyine Göre Elastisite Modülü Bulunması	54
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	56
6. KAYNAKLAR.....	58
ÖZGEÇMİŞ.....	62
EKLER	63

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

μ	Mikron
Fe	Demir
kg	Kilogram
Wopt	Optimum su muhtevası
ε	Deformasyon
W	Su muhtevası
P	Basınç
Qu	Serbest basınç mukavemeti
γ_{kmax}	Maksimum kuru birim hacim ağırlığı
γ_s	Özgül ağırlık
sn	Saniye
dk	Dakika
kN	Kilo Newton
ml	Mililitre
N	Newton
g	Gram
°C	Santigrat derece
sa	Saat
Pa	Pascal
kPa	Kilo Pascal
E	Elastisite modülü
Mg	Magnezyum
Ca	Kalsiyum
O	Oksijen
Si	Silisyum
m	Metre
m ²	Metrekare
m ³	Metreküp
cm	Santimetre
cm ³	Santimetreküp
Hg	Civa
Cl	Klor
kJ	Kilo Joule
mm	Milimetre
MPa	Mega Pascal

Kısaltmalar

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ASTM	American Standarts of Testing Materials (A.B.D. Test Standartları)
MTA	Maden Tetkik Arama
TS	Türk Standartları
TSE	Türk Standartları Enstitüsü

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Zemin iyileştirme yöntemleri.....	4
Şekil 2.2 Magnezyum cürufunun maksimum kuru yoğunluğu.....	27
Şekil 2.3 Magnezyum cürufunun serbest basınç dayanımları.....	27
Şekil 2.4 Magnezyum cürufunun serbest basınç dayanımları.....	28
Şekil 4.1 Elek analizi grafiği ile dane dağılımı.....	40
Şekil 4.2 Tüm numunelere ait kompaksiyon grafiği.....	42
Şekil 4.3 Katkı oranlarına göre numune dayanımları (1 günlük).....	44
Şekil 4.4 Katkı oranlarına göre numune dayanımları (7 günlük).....	44
Şekil 4.5 Katkı oranlarına göre numune dayanımları (28 günlük).....	45
Şekil 4.6 Katkı oranlarına göre numune dayanımları (56 günlük).....	45
Şekil 4.7 Katkı oranlarına göre numune dayanımları (112 günlük).....	46
Şekil 4.8 Kür sürelerine göre numune basınç dayanımları (katkısız).....	46
Şekil 4.9 Kür sürelerine göre numune basınç dayanımları (% 5 MC katkılı).....	47
Şekil 4.10 Kür sürelerine göre numune basınç dayanımları (% 10 MC katkılı).....	47
Şekil 4.11 Kür sürelerine göre numune basınç dayanımları (% 15 MC katkılı).....	48
Şekil 4.12 Kür sürelerine göre numune basınç dayanımları (% 20 MC katkılı).....	48
Şekil 4.13 Kür sürelerine göre numune basınç dayanımları (% 25 MC katkılı).....	49
Şekil 4.14 Kür sürelerine göre numune basınç dayanımları (% 30 MC katkılı).....	49
Şekil 4.15 Kür sürelerine göre numunelerin basınç dayanımlarının çizgi grafiği.....	50
Şekil 4.16 Kür sürelerine göre numunelerin basınç dayanımlarının sütun grafiği.....	51
Şekil 4.17 Katkı oranlarına göre su muhtevası kaybı.....	52
Şekil 4.18 Kür sürelerine göre su muhtevası kaybı.....	52
Şekil 4.19 Kür sürelerine göre permeabilite deney sonuçları çizgi grafiği.....	53
Şekil 4.20 Kür sürelerine göre permeabilite deney sonuçları sütun grafiği.....	54
Şekil 4.21 Elastisite modülünün hesaplanmasında bazı grafikler.....	55
Şekil EK1.1 Katkısız numunenin kompaksiyon değerleri.....	63
Şekil EK1.2 %5 katkılı numunenin kompaksiyon değerleri.....	63
Şekil EK1.3 %10 katkılı numunenin kompaksiyon değerleri.....	64
Şekil EK1.4 %15 katkılı numunenin kompaksiyon değerleri.....	64
Şekil EK1.5 %20 katkılı numunenin kompaksiyon değerleri.....	65

Şekil EK1.6 %25 katkılı numunenin kompaksiyon değerleri.....	65
Şekil EK1.7 %30 katkılı numunenin kompaksiyon değerleri.....	65
Şekil EK2.1 1 günlük numunelerin elastisite modüllerinin belirlenmesi.....	66
Şekil EK2.2 7 günlük numunelerin elastisite modüllerinin belirlenmesi.....	67
Şekil EK2.3 28 günlük numunelerin elastisite modüllerinin belirlenmesi.....	68
Şekil EK2.4 56 günlük numunelerin elastisite modüllerinin belirlenmesi.....	69
Şekil EK2.5 112 günlük numunelerin elastisite modüllerinin belirlenmesi.....	70



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Magnezyumun fiziksel özellikleri.....	20
Çizelge 2.2 Ülkemizdeki manyezit rezervleri.....	22
Çizelge 2.3 Magnezyum cürufunun kimyasal bileşenleri.....	24
Çizelge 2.4 Manyezitin kimyasal bileşimi.....	25
Çizelge 2.5 Magnezyum cürufunun fiziksel ve mekanik test sonuçları.....	25
Çizelge 2.6 Magnezyum cürufunun kalite değerlendirme parametreleri.....	29
Çizelge 3.1 Zeminin özellikleri.....	31
Çizelge 3.2 Tek eksenli basınç deneyi için numune sayıları ve kür günleri.....	36
Çizelge 4.1 Elek analizi deney sonuçları.....	40
Çizelge 4.2 Elek analizi sonuçlarına göre zemin sınıflandırma.....	41
Çizelge 4.3 Birleşik zemin sınıflandırma sistemi.....	41
Çizelge 4.4 Numunelerin kompaksiyon değerleri.....	43
Çizelge 4.5 Tek eksenli basınç deneyi sonuçları.....	43
Çizelge 4.6 Su muhtevası kayıpları	52
Çizelge 4.7 Permeabilite deney sonuçları.....	53
Çizelge 4.8 Karışımlara ait elastisite modülünün hesaplanması.....	54

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 2.1	Kompaksiyon ile zemin iyileştirme yöntemi alet ve ekipmanları.....	6
Resim 2.2	Mekanik yöntem ile dolgu malzemesi kullanarak zemin iyileştirme.....	6
Resim 2.3	Drenaj yöntemi ile zemin iyileştirme.....	7
Resim 2.4	Çimento enjeksiyonu ile zemin iyileştirme yöntemi.....	8
Resim 2.5	Kireç ile zemin iyileştirme yöntemi.....	9
Resim 2.6	Bitüm ile zemin iyileştirme yöntemi.....	10
Resim 2.7	Uçucu kül ile zemin iyileştirme yöntemi.....	10
Resim 2.8	Derin kompaksiyon yöntemi ile zemin iyileştirme	12
Resim 2.9	Vibro Kompaksiyon yöntemi ile zemin iyileştirme.....	12
Resim 2.10	Patlatma yöntemi ile zemin iyileştirme şematik gösterim.....	13
Resim 2.11	Enjeksiyon yöntemi ile zemin iyileştirme.....	15
Resim 2.12	Ön konsolidasyon yöntemi ile zemin iyileştirme şematik gösterimi.....	16
Resim 2.13	Kum drenleri yöntemi ile zemin iyileştirme şematik gösterimi.....	17
Resim 2.14	Ülkemizde bulunan manyezit rezervleri.....	23
Resim 2.15	Dolomitten magnezyum ve cürufunun üretimi.....	23
Resim 3.1	Zemin numunesi.....	30
Resim 3.2	Magnezyum tesisinden alınan magnezyum cürufu.....	32
Resim 3.3	Elek analizi deneyinde kullanılan elek seti.....	33
Resim 3.4	Kompaksiyon deneyi.....	34
Resim 3.5	Kompaksiyon sonucunda numune alımı.....	34
Resim 3.6	Tek eksenli basınç deneyi numune hazırlama.....	35
Resim 3.7	Numunenin çıkarılması, sarılması ve saklanması.....	36
Resim 3.8	Serbest basınç deneyi aletine numunenin yerleştirilip kırılması.....	37
Resim 3.9	Serbest basınç deneyi sonundaki numuneler.....	38
Resim 3.10	Permeabilite deneyi numuneler.....	39
Resim 3.11	Permeabilite deney hücresi ve sistemi.....	40

1. GİRİŞ

Şehirleşmenin artması ve inşaat sektörünün gelişmesiyle birlikte sağlam olmayan zeminlere de inşaat yapma zorunluluğu meydana gelmiştir. Önceden yapılmış olan yapıyı yıkıp tekrar inşa etme ve yapıların boyutlarının büyüyüp küçüldüğü durumlarda zemin koşullarının tekrar etütler ile gözden geçirilmesi gerekmektedir. Zeminlerin sıvılaştırılabilirliği ve sıkıştırılabilirliği fazla olup taşıma gücü düşük ise bu tür zeminler yapılaşmaya uygun değildir. Bu noktada zeminin iyileştirilmesi konusu ortaya çıkmakta ve alternatif zemin iyileştirme arayışlarına girilmektedir.

Zemin iyileştirmesi; zemindeki boşlukların bazı malzemelerle doldurulması veya mekanik yöntemlerle sıkıştırılarak zemindeki boşlukların azaltılması işlemidir. Zemin iyileştirilmesindeki genel amaç zeminin taşıma gücünün artırılması, durabilite ve stabilitesinin artırılması, geçirimsizliğin azaltılması vb gibi nedenlerdir. Zemin iyileştirme mekanik ve kimyasal yöntemler kullanılarak yapılabilir. Mekanik yöntemlerde makinalar yardımıyla zemin boşlukları azaltılarak iyileştirme sağlanırken kimyasal iyileştirmede çeşitli maddeler zemine karıştırılarak zemin özelliklerinde değişim sağlanır. Katkı maddeleri zeminle reaksiyona girerek zemin özelliklerinde değişim oluşturur. Katkı maddeleri olarak çimento, kireç, bitüm, uçucu kül, reçine vb. kimyasal katkıları kullanılmaktadır (Zorluer ve Usta 2003). Son yıllarda katkı maddesi olarak endüstriyel atıkların kullanılması ile zemin iyileştirme yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu maddeler zemin dayanımını artırmakta, düşey deformasyonların azalmasını sağlamakta, geçirimsizliği düşürmektedir.

Atık malzemelerin çevre kirliliği oluşturma potansiyeli olmasından dolayı zemin iyileştirmede kullanımı ile çevre kirliliğinin azaltılmasına katkı sağlayacağı ifade edilebilir. Bazı endüstriyel üretimler sonucunda büyük miktarlarda atık ortaya çıkmaktadır. Bu atıkların çevreye zarar vermeden depolanması da ayrı bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Türkiye’de binden daha fazla taş ocağının inşaat sektörü için agraega temin etmek için işletildiği bilinmektedir. Doğal agregaların bir kısmının veya tamamının cüruf yan ürünleriyle yer değiştirmesi hammaddelerin korunması ve atık malzemelerin azaltılmasıyla kayda değer çevresel ve ekonomik kazançlar sağlayacağı ifade edilmektedir (Gökalp vd. 2018).

Cürüflar, zemini stabilize etmek, doğal kaynakları korumak ve çevre üzerindeki zararlı etkileri azaltmak için alttaki katmanlarda toprakla birlikte veya tek başına kullanılabilir (L. Dongxua vd. 2000).

Magnezyum cürufu, magnezyum üretmek amacıyla geri kazanım işleri sırasında elde edilen bir endüstriyel atıktır. Dünyada her yıl 4 milyon ton magnezyum cürufu elde edildiği ve birikim hızının yılda 10 milyon ton civarı olduğu tahmin edilmektedir (Deng, Wang ve Guo 2014). Çeşitli fiziksel ve kimyasal analizler ile magnezyum cürufunun mikro yapısının incelenmesi ile bu malzemenin çimento ile benzer fiziksel, kimyasal ve mineral yapısına sahip olduğu bilinmektedir (Oliveira vd. 1997). Dolayısıyla çimentonun zemine katılarak stabilizasyon sağladığı gibi magnezyum cürufu da benzer şekilde etkili bir yapı malzemesi olacağı düşünülmektedir.

Magnezyum cürufunun zemin iyileştirmede katkı malzemesi olarak kullanımı konusunda çok fazla çalışmanın olmaması konunun önemini arttırmaktadır. Bu çalışmada magnezyum üretimi sırasında ortaya çıkan ve endüstriyel atık olarak ifade edilen magnezyum cürufunun iri taneli zemin iyileştirmesinde kullanılabilirliği araştırılmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Zemin İyileştirme

Zemin, yerkabuğunun dışını oluşturan doğal bir malzemedir ve su, boşluk, iri, ufak daneli karışımından oluşan yapısı vardır. Ülkemizde de mühendislik özellikleri ve zemin koşulları düşünüldüğünde yapıya uygun olmayan zeminlere sıkça rastlanılmaktadır. Bunun yanı sıra var olan yapıların yer aldığı zeminin sebep olduğu sorunlarda bu yapıların yer aldığı zeminlerin mühendislik özellikleri değiştirilerek zeminin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır (Akyol 2022).

Zemin iyileştirme yöntemlerinde temel amaç, çeşitli maddelerin karıştırılmasıyla ya da mekanik araçlarla zemin içindeki boşluklarının azaltmak, taşıma gücünü arttırmak, gerilmeler altında şekil değiştirmeleri ve şişme-büzülme potansiyelini azaltmak, donma ve ıslanma gibi çevresel etkiler sonucu olumsuz fiziksel ve kimyasal değişimleri önlemek,

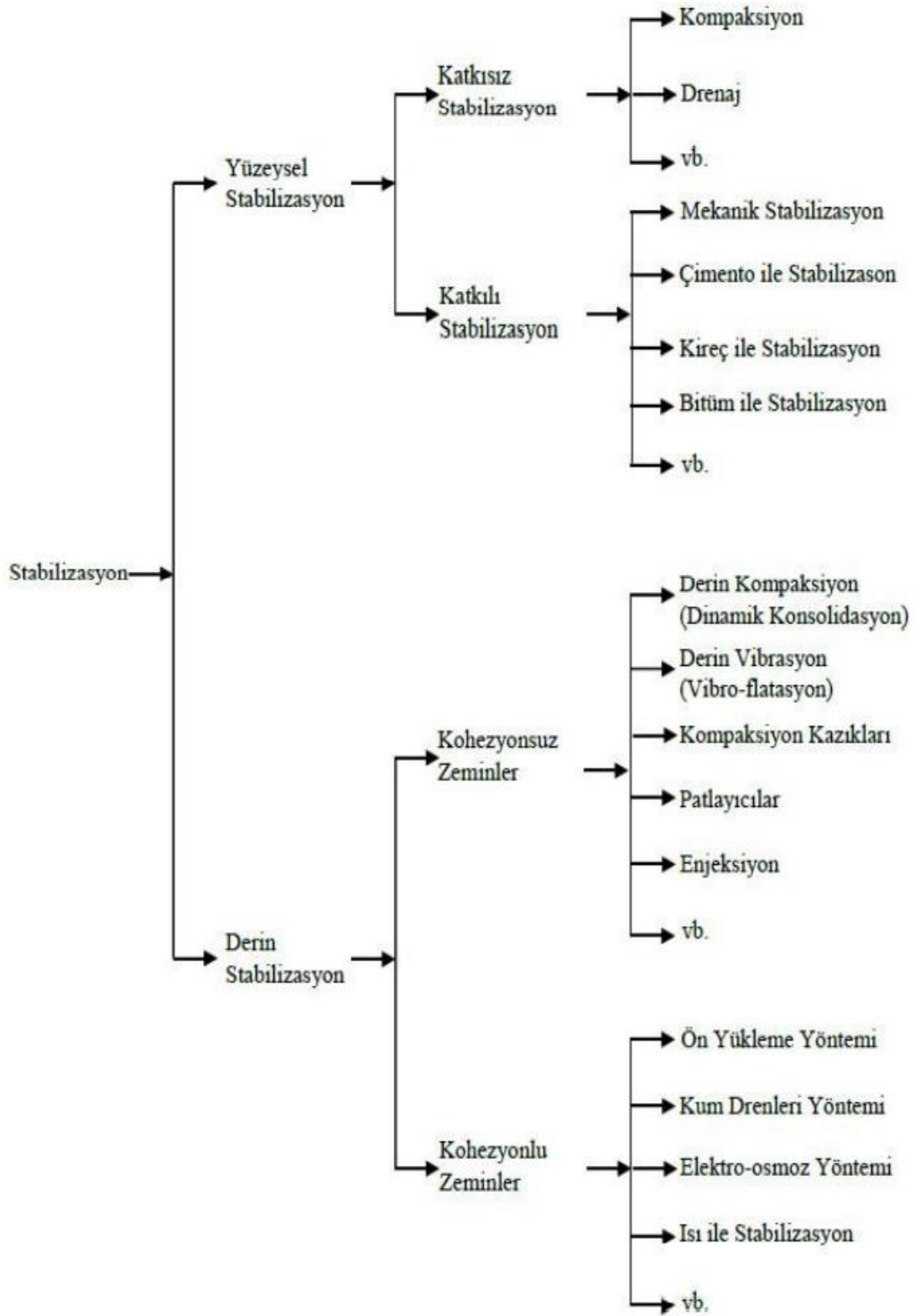
yüzey bozulmalara karşı direncini arttırmaktır. Zemin iyileştirmenin diğer çevresel ve geoteknik amaçları arasında atık malzemelerin değerlendirilmesi, yüzeysel su kaynaklarının ve yeraltı sularının akım yönleri ve kalitesinin korunması, zeminlerden inşaat malzemesi olarak yararlanma yer almaktadır (Özaydın 2012).

Zeminin iyileştirilmesinde belirtilen amaçlar ve koşullar düşünüldüğünde zemin iyileştirme yönteminin seçimi arz etmektedir.

2.2 Zemin İyileştirme Yöntemleri

Zemin iyileştirme yöntemi seçimi yapılırken zeminin cinsi, jeolojik yapısı, yer altı suyu durumu, gerekli malzeme ve iş gücünün temin edilebilme durumu, iyileştirme maliyeti ve inşaat takvimi, uzun süreli performans ve durabilite kriterleri, çevre binalara etkileri vb. faktörler değerlendirilerek yöntem seçimi yapılabilmektedir (Özaydın 2012).

Bu değişkenlerin ışığında zeminlerin stabilizasyonunda iki yol olduğu bilinmektedir. Bunlardan ilki mekanik stabilizasyon; zemine herhangi bir katkı maddesi karıştırmadan ve zeminde kimyasal etki olmadan sıkıştırmak (kompaksiyon), başka zeminlerle karıştırarak homojen bir dane dağılımı elde ederek amaca uygun hale getirmektir. İkinci yöntem ise kimyasal stabilizasyon; zemin içerisine bir katkı maddesi (çimento, cüruf, bitüm, reçine vb.) karıştırarak kimyasal tepkimeyle zeminin amaca uygun hale getirilmesidir (Aytekin 2004).



Şekil 2.1 Zemin iyileştirme yöntemleri (Yılmaz 2015).

2.2.1 Yüzeysel Zemin İyileştirme

Zeminlerin derin tabakalarında işlem yapmadan yüzey kısmındaki iyileştirmelerine yüzeysel stabilizasyon denir (Gücek 2011). Yüzeysel stabilizasyonun amacı zeminin boşluklarını azaltmak veya zemindeki suyu drene etmektir. Bu noktada kompaksiyon, drenaj, çimento veya kireç gibi ilave malzemelerle iyileştirme mümkündür (Ünlü Şahan 2016). Yüzeysel iyileştirme yöntemleri katkısız ve katkılı stabilizasyon olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir (Özaydın 1989).

2.2.1.1 Katkısız Zemin İyileştirme

Var olan zemin yapısını koruyarak, katkı maddesi ilave edilmeden yapılan iyileştirmeye katkısız iyileştirme denir. Mevcut zeminin dane boyutu eğrisi uygunsa bu yöntem uygulanabilir. Bu yöntem 3 gruba ayrılmaktadır (Özaydın 1989).

Kompaksiyon Yöntemi:

Zeminin danelerinin birbirine yakınlaştırılarak boşluğun azaltılmasıyla zeminin sıklığının arttırılması amaçlanmaktadır. Bu yöntemde mekanik araçlar kullanılabilir (Özaydın 1989).

Zeminin içindeki boşlukları azaltıp, daneleri birbirine yaklaştırmak için zeminin içerdiği su miktarı ve uygulanan basıncın şiddeti oldukça önemlidir. Zemin içerisindeki hava ve su, uygulanan basınca karşı koyarak zeminin sıkışmasına engel teşkil eder. Bu nedenle zeminde iyileştirme yapılabilmesi için optimum su içeriği bilinmelidir (Ünlü Şahan 2016).

Kompaksiyon yönteminde zemin iyileştirmesi için, makinenin cinsi ve ağırlığı, boyutu, uyguladığı basınç, frekans ve titreşim özellikleri ve sorunlu zeminin mühendislik özellikleri önemli etkenlerdir. Kompaksiyon alet ve ekipmanlarına düz veya keçi ayaklı silindir, titreşimli silindir, kompaktör gibi örnekler verilebilir (Ünlü Şahan 2016).



Resim 2.1 Kompaksiyon ile zemin iyileştirme yöntemi alet ve ekipmanları (İnt. Kayn. 1).

Mekanik Yöntem:

Bu yöntemde iki veya daha fazla zeminin, oranına uygun olarak karıştırılması sonucu istenilen mühendislik şartlarını sağlayan bir zemin elde etmek amaçlanır. Bu sayede uygulanan basınca karşı deformasyon olmayan sağlıklı bir zemin elde etmek istenir (Tunç 2002).



Resim 2.2 Mekanik yöntem ile dolgu malzemesi kullanarak zemin iyileştirme (İnt. Kayn. 2).

Drenaj Yöntemi:

Zemin içindeki suyun uzaklaştırılması zeminin sıkılığına katkı sağlar. Yüksek miktarda su içeren zeminlerin taşıma gücü kapasitesi azalmaktadır. Bunun olmaması için drenaj ile zemindeki su içeriği dengeli bir şekilde düzenlenmelidir (Ünlü Şahan 2016).

Drenaj yöntemi ile, yapıların bulunduğu zeminlerin yeraltı suyu ve yüzeysel suları kontrol altına alabilir. Yüzey altı drenaj ve yüzeysel drenaj olmak üzere ikiye ayrılır. Yüzey altı drenaj yönteminde, enine drenaj işlemi yatay olarak perfore dren borularıyla yapılmaktayken boyuna yüzey altı drenaj işlemi ise, yol gövdesinden zemin suyunun dren hendekleri ile drene edilerek stabilitesinin artırılması yoluyla yapılmaktadır (Tunç 2001).

Yüzeysel drenaj yönteminde ise Fransız drenleri, çevre drenleri ve köstebek drenler kullanılabilir (Ünlü Şahan 2016).



Resim 2.3 Drenaj yöntemi ile zemin iyileştirme (İnt. Kayn. 3).

2.2.1.2 Katkılı Zemin İyileştirme

Zeminlerin farklı katkı maddeleri ile bir araya gelmesiyle zeminin fiziksel özellikleri üzerinde bazı değişimler meydana gelmektedir. Bununla birlikte uygun katkı maddesi kullanılarak istenilen zemin iyileştirmesi yapılabilmektedir. Kireç, çimento, uçucu küller, asfalt, cürufur ve bazı kimyasal maddeler bu katkı maddelerine örnek olarak gösterilebilir (Özaydın 1989).

Çimento ile Zemin İyileştirme:

Çimento, yapısında bulunan silika adı verilen puzolanik madde sayesinde zemin iyileştirmesi için uygun bir katkı malzemesidir. Bu katkı maddesi içinde puzolanik malzeme içermeyen ve kil barındırmayan zeminler içinde etkili sonuçlar vermektedir. Buna ek olarak kohezyonlu ve organik madde içeren zeminler dışında her sorunlu zemin çimento ile iyileştirme yöntemine uygundur. Zemine, kuru ağırlığının %5-15'i kadar çimento karıştırılarak kompaksiyon uygulanmaktadır. Çimento, zemin daneleri arasında bağlayıcı bir işlev görerek zemin iyileştirmesine katkı sağlar (Uzuner 2000).

Türkiye’de sık kullanılan iyileştirme yöntemi olmasının sebepleri arasında inşaat sektörü ve teknolojilerinin gelişmesi, birçok zemine uygulanabilir olmasını gösterir. (Demiröz 2009).



Resim 2.4 Çimento enjeksiyonu ile zemin iyileştirme yöntemi (Çetin 2011).

Kireç ile Zemin İyileştirme:

Kireç yöntemi oldukça eski iyileştirme yöntemlerinden biri olarak bilinmektedir. Zemine kuru ağırlığının yaklaşık %2-8'i kadar kireç karıştırılır. Kil gibi kohezyonlu zeminlerde kireç karıştırılması, kil mineralleri ile kireç arasında oluşan tepkime sonucu silikat jeli ortaya çıkar. Bu durum daneler arasında bağlayıcılık görevi görerek zeminin dayanımını artırır. Bu tepkime süreci yaklaşık bir yılı bulabilir. Buna ek olarak bahsedilen kimyasal

tepkimler nemlilik ve ısı gibi çevre koşullarının etkisiyle zamana bağlı olarak gelişme gösterir. Böylece zaman geçtikçe zeminde iyileşmeler meydana gelmektedir. Bu iyileştirmelere zemin sıkılığının ve dayanıklılığının artması, kabarma düzeyinin ve şişmeye bağlı basınçların azalması örnek olarak gösterilebilir. Ayrıca, plastisitenin azalması sebebiyle arazi çalışma koşullarının iyileşmesine katkı sağlar (Özaydın 1989, Demiröz 2009).



Resim 2.5 Kireç ile zemin iyileştirme yöntemi (İnt. Kayn. 4).

Bitüm ile Zemin İyileştirme:

Bitüm, asfalt gibi petrolden elde edilen siyah, yapışkan, sıcakken sıvı halde bulunan bir malzemedir. Bu yöntemde bitümlü maddeler zemin içerisine miktar olarak %5-10 oranında katılır. Kırma taş, çakıl, kum gibi iri daneli maddeler ile sıcak sıvı bitümlü madde karıştırılır ve karıştırılan zemine çeşitli makine ve ekipmanlarla kompaksiyon uygulanır. Bitümlü maddeler, daneler arasında bağlayıcı işlev görerek zeminin geçirimsizlik özelliğini artırır. Bitümlü madde, zemine serildiğinde iki işlevi vardır. Daneleri birbirine yapıştırır ve zemini su geçirmez hale getirir. Bu özelliğiyle karayolları yapımında ve yüzey kaplamalarında daha sık kullanılır (Uzuner 2000).



Resim 2.6 Bitüm ile zemin iyileştirme yöntemi (İnt. Kayn. 5).

Uçucu Kül ile Zemin İyileştirme:

Uçucu küller, tek başına doğada bulunurken bağlayıcı özelliği olmayan ancak sulu ortamda kireçle bir araya geldiklerinde bağlayıcı özellikleri ortaya çıkan puzolanik malzemelerdir. Kireç ve suyun karışımının tepkimeye girmesinden itibaren geçen süre miktarı arttıkça uçucu küllerin puzolanik özelliğinin artmasından dolayı zeminin dayanıklılığı ve sıkılığı artar. Bu uçucu küllerin arasından CaO miktarı yüksek olanların daha iyi puzolanik özellik gösterdiği bilinmektedir (Alkaya 2002).



Resim 2.7 Uçucu kül ile zemin iyileştirme yöntemi (Çetin 2011).

2.2.2 Derin Zemin İyileştirme

Derin zemin iyileştirme yöntemlerinde, iyileştirme yapılacak zeminin iyileştirme yöntemi seçiminde dane çapı oranı eğrisi dikkate alınır. İyileştirmeye tabi tutulacak zeminin kalınlığı birkaç metreden daha fazladır (Gücek 2011).

2.2.2.1 Kohezyonsuz Zeminlerde Derin Zemin İyileştirme

Bu yöntemin temel amacı zemine titreşimler uygulanarak sıkılık ve dayanıklılık derecesini arttırmaktır. Örnek olarak sınırlı bir derinliğe sahip zemin yüzeyinde titreşimli silindirme yapmak, zemin yüzeyinde şiddetli darbeler uygulamak (dinamik kompaksiyon), tabaka derinliği boyunca iç kısımdan titreşimler uygulamak zemin içinde sarsıntı yaratmak (vibroflotasyon, vibro kompaksiyon, sıkıştırma kazıkları), verilebilir (Özaydın 2012).

Derin Kompaksiyon (Dinamik Konsolidasyon) Yöntemi ile Zemin İyileştirme:

Derin ve gevşek kum-çakıl kütlelerinin titreşimlere maruz kaldığında zeminde büyük hacim düşmeleri gösterdiği bilinmektedir. Derin kompaksiyonda amaç, 5-40 ton olabilen bir ağırlığın, 5-40 m yükseklikten bir vinç yardımıyla, önceden belirlenen bölgelere birkaç m aralıklarla düşürülerek zeminde titreşim yoluyla sıkılaşma sağlamaktır. Düşürülen ağırlık genellikle, betonarme dikdörtgen bir blok, betonla doldurulmuş çelik sac veya çelik plakalar şeklindedir (Uzuner 2000).

Düşen ağırlığın oluşturduğu titreşim dalgaları zeminin yoğunluğunu artırır. Düşen ağırlığın yüksekliği ve düşme sayısı sıkılaşma oranını etkiler. Bu yöntemin uygulanacağı alan iri daneli zeminlerde 5.000 m²'den fazla olmaması gerekir. İnce daneli zeminlerde bu rakam 15.000 m²'yi geçmemelidir (Ünlü Şahan 2016).

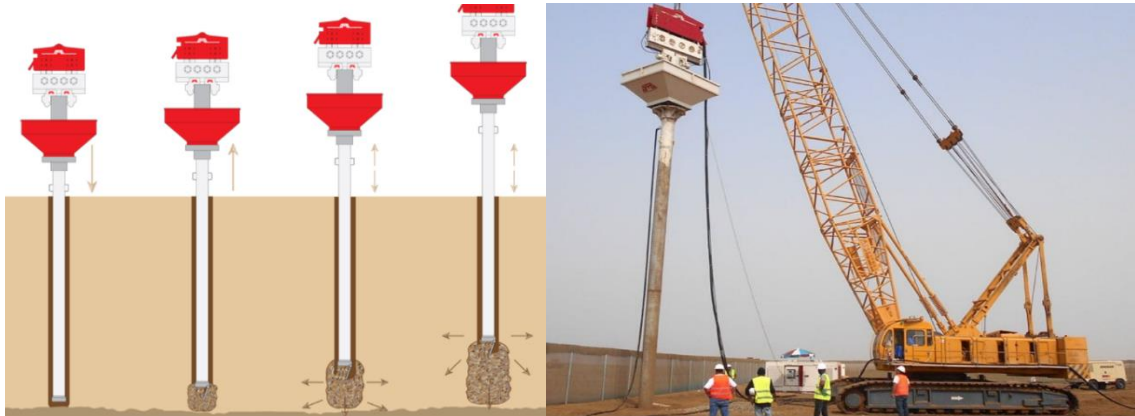


Resim 2.8 Derin kompaksiyon yöntemi ile zemin iyileştirme (İnt. Kayn. 6).

Derin Vibrasyon (Vibro Kompaksiyon) Yöntemi ile Zemin İyileştirme:

Bu yöntemde derin ve kohezyonsuz zeminlerde, zemin içine açılan kuyuya yerleştirilen vibroflotun, su jeti ve vibratör yardımıyla istenilen derinliğe ulaştıktan sonra kuyu içi kum ve çakıl ile doldurulup bir yandan titreşim yardımı ile yerleştirilir. Bu işlem kuyu doldurulana kadar devam eder ve 1-2 m aralıklarla tekrar edilir. Vibrokompaksiyon tekniğinde en yaygın olarak Vibro-Kanat, Terraprobe ve Franki Y-Prope tipleri kullanılmaktadır. 1-2 m aralıklarla kompaksiyon yapılmaktadır (Demiröz 2009).

Gelişen teknoloji sayesinde zamanla vibro kompaksiyon yöntemi geliştirilmiş ve 60 metre derinliğe kadar kara veya denizde bu yöntem kullanılarak iyileştirmeler yapılabilmektedir (Selçukhan ve Ekinci 2021).

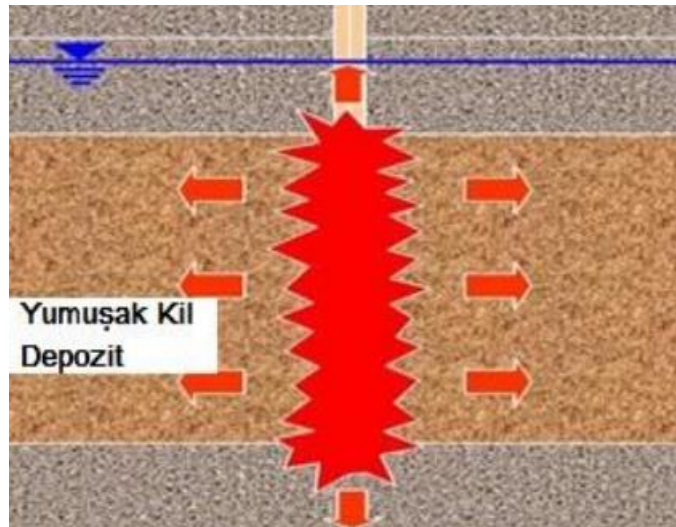


Resim 2.9 Vibro Kompaksiyon yöntemi ile zemin iyileştirme (İnt. Kayn. 8).

Patlayıcılar ile Zemin İyileştirme:

Bu yöntemde iyileştirme yapılacak zemin tabakasında belli derinlikte patlayıcılar aralıklarla yerleştirilir. Patlatma ile oluşturulan etkiden dolayı gevşek daneli zemin sıkışır. Patlayıcıları yerleştirmek için boru, zemine çakma yöntemi ile veya su jeti ile kısmi baca oluşturularak indirilir. Patlayıcı, borunun içinden zemine yerleştirilerek boru yukarı çekilir. Patlayıcı olarak dinamit ve TNT kullanılabilir (Gücek 2011).

Patlayıcıların patlatılması ile ortaya çıkan şok dalgaları ve titreşimlerin, zeminin sıkışması yol açtığı yöntemdir. Patlama tekniği ile yumuşak zeminlerin oturmaları sağlanır. Bununla birlikte rölatif yoğunlukta %35 ile %85 arasında artışlar görülebilmektedir. Boşluk oranı fazla olan zeminlerde patlama ile taşıma kapasitesinin artırılması için zeminin tam doygun olması gerekmektedir. Patlatma yönteminin en büyük avantajları ekonomik olması ve diğer yöntemlere göre daha derinlerde kullanılabilir olmasıdır. 40 metre derinliğe kadar başarılı patlatma yapılabilmektedir. Avantajlarına rağmen bu yöntem çok tercih edilmemektedir. Nedeni ise teorik bilgiden daha çok tecrübeye dayalı uygulanmaktadır. Yanlış kullanımı güvenlik riski oluşturmaktadır ve kimyasal kaynaklı olduğu için doğaya oldukça zararlıdır (Selçukhan ve Ekinci 2021).



Resim 2.10 Patlatma yöntemi ile zemin iyileştirme şematik gösterim (Ekinci ve Selçukhan 2021).

Enjeksiyon Yöntemi ile Zemin İyileştirme:

Bu yöntem özellikle deprem esnasında sıvılaşabilir özellikli gevşek zeminlerin sıvılaşma kapasitelerinin azaltılmasında, herhangi bir kazı ile oluşacak oturmalar sonucunda çeyreye gelebilecek zararları azaltmak için oturmaların azalması amacıyla ve zeminlerin taşıma gücü kapasitesini artırmak amacıyla kullanılmaktadır (Demiröz 2009).

Enjeksiyon, akışkan bir malzemenin basınç ile beraber zeminde bulunan boşlukları dolduracak şekilde enjekte etme işlemine denir. Enjeksiyon işlemi sayesinde boşluklar enjekte edilen malzeme ile dolar ve çevresindeki danelerin de sıkışması sağlanır. Enjeksiyon zeminin geçirim özelliğini azaltır. Enjekte edilecek karışımın türü, enjeksiyonun amacı ve stabilize edilecek zeminin yapısal özelliklerine göre değişim göstermektedir. Çakıllı ve orta kumlu zeminlerde daha çok çimento, kireç gibi malzemeler kullanılırken, ince kum ve siltli zeminlerde daha çok silikat, reçine ve poliüretan gibi kimyasal malzemeler kullanılmaktadır (Gücek 2011).

Enjeksiyon yöntemi çok kapsamlı bir yöntemdir bununla beraber farklı metotlarla uygulanabilmektedir. Bu yöntemlerden biri permeasyon enjeksiyonudur. Permeasyon yöntemi, enjekte edilen malzemenin zemin içindeki boşluklarda yayılarak katılaşması sonucu tüm kütleyi bütün olarak iyileştirmektedir. Diğer yöntem olan kompaksiyon enjeksiyonunda zemin içine basınç ile püskürtülen malzemenin basınç yardımıyla zemin tanelerinde zorlama meydana getirerek yer değiştirme eğilimine sürükleyerek zeminin sıkılaşması sağlanmaktadır. Bir diğer yöntem ise hidro çatlatma enjeksiyonudur. Bu yöntemde amaç özellikle kaya zeminlerde boşlukların basınç yardımı ile genişletilerek enjeksiyon dolgusu ile doldurulması amaçlanmaktadır (Özaydın 2012).



Resim 2.11 Enjeksiyon yöntemi ile zemin iyileştirme (İnt. Kayn. 7).

2.2.2.2 Kohezyonlu Zeminlerde Derin Zemin İyileştirme

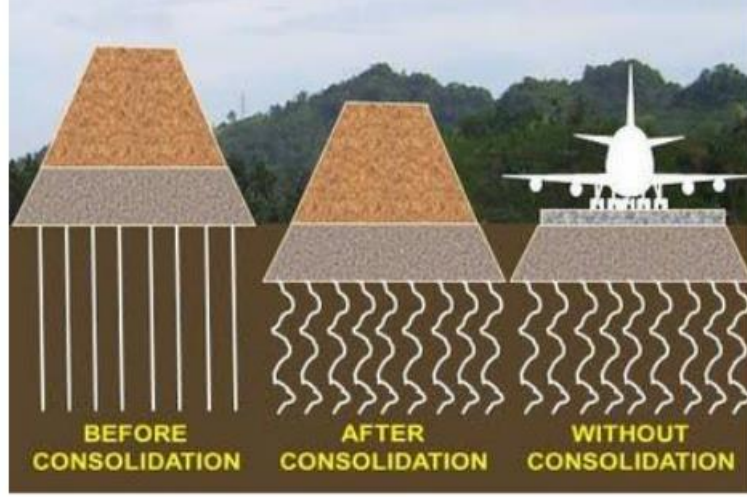
Kohezyonlu zeminlerde, zeminin su kapasitesini azaltmaya yönelik olarak yeraltı su seviyesinin indirilmesi ve drenaj önlemleri, önyükleme ile zeminin konsolide edilmesi ve elektro-osmotik konsolidasyon yöntemleri kullanılır. Diğer amaç olan zeminin iç yapısını stabilize etmeye yönelik olarak enjeksiyon teknikleri, zeminin dondurulması, elektrokinetik stabilizasyon yöntemleri kullanılır. Bir diğer amaç olan zemin içinde rijit kolonlar oluşturulması için taş kolonlar, jet grout kolonları kullanılır (Özaydın 2012).

Ön Yükleme (Ön Konsolidasyon) Yöntemi ile Zemin İyileştirme:

Kohezyonlu zeminlerde meydana gelecek oturmaları azaltmak için ve zeminin taşıma gücünü arttırmak için zemin üzerine yük yerleştirilerek belirli bir süre beklenilir. Bu süre 3-5 ay ile 2 yıl arasında değişmektedir. Bu süre içinde zemin yüke maruz bırakılır. Yük olarak genellikle kum, çakıl, dolgu veya içi su dolu tank kullanılır. Belli bir süre sonra dolgu kaldırılarak yerine yapı inşa edilir. Ön yükleme sonucu zemin belirli bir miktar sıkışıp aşırı yüklemeye maruz kalacağı için daha az sıkışma gösterecektir (Uzuner 2000).

Beklenen değerde oturma meydana geldikten sonra zemin üzerindeki ilave yük kaldırılır. Bu yöntemin amacı yapının kullanıma başlanmasından sonra zamana bağlı olarak meydana gelecek istenmeyen oturmaları engellemektir. Ön yükleme süresini azaltmak

için düşey çakıl ve kum drenleri de kullanılabilir. n yükleme sırasında sıkışan zeminden çıkacak suyun hemen uzaklaştırılması sağlanmalıdır. Tüm killi zeminlerde veya bataklık tipi zeminlerde ve hatta %20 - %3000 su içeriğindeki zeminlerde bile başarıyla uygulanabilmektedir (Demiröz 2009).

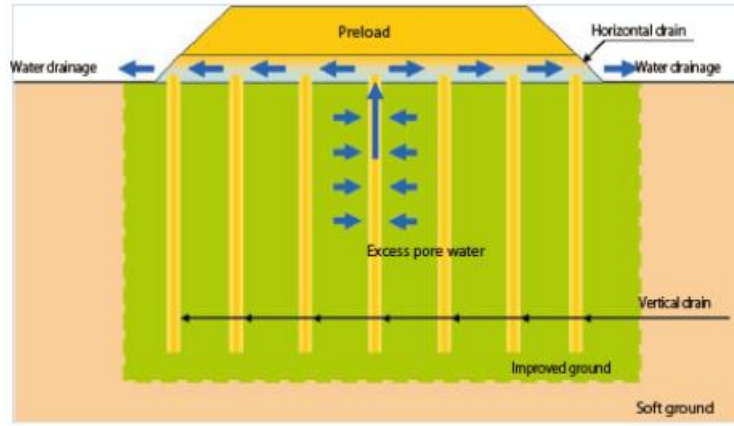


Resim 2.12 n konsolidasyon yöntemi ile zemin iyileştirme şematik gösterimi (İnt. Kayn. 10).

Kum Drenleri Yöntemi ile Zemin İyileştirme:

Çok ince daneli zeminlerde n yükleme çok uzun sürebilmektedir. Bu süre 3 ile 5 yıl arasında değişmektedir. Bu süreyi kısaltmak amacıyla zeminde belli aralıklarla kum drenleri oluşturulur. Bunun için ucu kapalı bir kaplama borusu zemine çakılarak veya ucu açık bir kaplama borusu içi boşaltılmak koşulu ile zemine indirilir. Kaplama borusu çekilirken içine kum, çakıl gibi filtre malzemesi doldurulur. Uygulamada kum drenler genel olarak 30-45 cm çapında ve 1.5-3 metre aralıklarla kare veya üçgen şekiller ile belli aralıklarla düzenlenirler. Son yıllarda plastik veya kağıt gibi hazır drenler kullanılarak bu yöntem yaygınlaştırılmıştır (Uzuner 2000).

Kum dreni, zemine bir kazık akıp borularla zemini çıkararak oluşturulan temiz kum filtresi kolonudur. Kum drenleri tek kullanımlarında zeminin oturmasında yeterli olmadıkları için n yükleme yöntemi ile bir arada kullanılmalıdır (Demiröz 2009).



Resim 2.13 Kum drenleri yöntemi ile zemin iyileştirme şematik gösterimi (İnt. Kayn. 10).

Elektro-Osmoz Yöntemi ile Zemin İyileştirme:

Almanya’da geliştirilmiş bir yöntemdir. Siltli zeminlerin drenajı ve ön konsolidasyonu için geliştirilmiştir. Bu iyileştirme yönteminin doygun silt ve siltli killerde daha doğru sonuçlar ortaya koyduğu bilinmektedir. İnce taneli zeminlerin boşluklarındaki su serbestçe akıp uzaklaşamaz. Bu duruma çözüm olarak su, elektriksel yöntemle uzaklaştırılır (Uzuner 2000).

Zemine yerleştirilen elektrotlar aracılığı ile aktarılan DC akımıyla zemin sularının anotlardan (+) katotlara (-) doğru hareket ettirilerek zeminin oturmasının amaçlandığı yöntemdir. Katotta toplanan su sistem dışına pompalanır, bu sırada anot su ile beslenmezse konsolidasyon sağlanmış olur Yaygın olarak kullanılan bir yöntem değildir (Selçukhan ve Ekinci 2021).

Isıl İşlemler Yöntemi ile Zemin İyileştirme:

Bu yöntemde zeminde açılan kuyularda yakılan akaryakıt, doğalgaz vb. ürünler ile yüksek sıcaklıklar elde edilir. Bu sıcaklık aralığı 500-1000 °C’dir. Bu sıcaklıklara maruz kalan kil zeminler, kuyu çevresinde 2-3 m çapında silindirler olarak sertleşir. Bu işlem aralıklarla tekrarlanır. Bu yüksek sıcaklıklar sonucu suyun uzaklaşmasıyla birlikte killeri geri dönmez özellik kazanarak sertleşir (Uzuner 2000).

Zemini sürekli ısıya maruz bırakmak zeminin özelliklerini değiştirmektedir. Killi zemin ısıtıldığında zamanla içerisindeki suyu kaybederek sertleşir. Yeterli ısıya ulaşıldığında sertlik çözülmez. Zeminleri bu tarz yüksek ısılarla iyileştirme ekonomik ve pratik bir yöntem değildir. Çevreye vereceği güvenlik riski düşünülmelidir. Killi zeminler 400-600 °C’de ısıtıldığında muhtemel rutubet riski kalmadığını ve hidratasyonun önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Termal sıcaklık işlemi ile zeminlerin plastisite indisi, kabarma özellikleri, mukavemet ve taşıma gücü gibi özelliklerinde iyileştirmeler meydana geldiği bilinmektedir (Demiröz 2009).

2.3 Magnezyum

Magnezyum simgesi Mg olup, periyodik tabloda atom numarası 12 olan ve en hafif metal ve alaşım grubundadır. Magnezyum ilk defa İngiliz kimyager Sir Humphrey Davy tarafından MgO ve HgO (magnezyum oksit ve civa oksit) karışımının elektrolizi yoluyla elde edilmiştir. Günümüzde ise deniz suyundan üretimi bulunmakla birlikte, dolomit veya manyezit cevherlerinin işlenmesiyle üretimi mevcuttur.

2.3.1 Magnezyumun Tarihçesi

Magnezyumun tarihsel serüveni 1755 yıllarına dayanmaktadır. İlk zamanlarda magnezya adı verilen cevher ‘‘beyaz taş veya beyaz dünya’’ olarak bilinirdi.

İskoçyalı bilim insanı Joseph Black, bu magnezyanın, magnezyum olduğunu keşfetmiştir. Fakat Black magnezyumu element olarak ortaya çıkaramadığından bu tezini ispatlayamamıştır. Magnezyanın Yunanistan’ın kuzeyinde bulunan Teselya adı verilen bölgeden çıkarıldığı bilinmektedir. Yunanistan’ın bu malzemeyi eski çağlarda çıkarıp Akdeniz ülkelerine sattığı ifade edilmektedir.

Magnezyumun İngiliz bilim insanı kimyager Sir Humphrey Davy tarafından bulunduğu kabul edilmektedir. Magnezyum 1808 yılında Davy tarafından MgO ve HgO (magnezyum oksit ve civa oksit) karışımının elektrolizi yoluyla elde edilmiştir.

1828 yılında Fransız bilim insanı Alexandre Bussy tarafından, eritilmiş susuz $MgCl_2$ (magnezyum klorür) ile yüksek sıcaklıkta potasyum elementini tepkimeye sokarak magnezyum metali elde etmiştir.

1833 yılında Sir Humphrey'nin eski asistanı olan İngiliz bilim insanı Michael Faraday, susuz $MgCl_2$ (magnezyum klorür)'ü elektroliz ile indirgeyerek saf magnezyum metali elde etmiştir.

1841 yılında Alman bilim insanı Robert Bunsen, karbon çinko pil hücresinin geliştirilmesinin ardından 1852 yılında magnezyum elde etmiştir (Bayrak 2019).

2.3.2 Magnezyumun Özellikleri

ABD'de Jeoloji Araştırmaları Kurumu verilerine göre dünyada en çok bulunan 7. elementtir. Magnezyumu en büyük rekabetçisi alüminyumuma göre en ilginç kılan özelliği hem hidrosferden hem de litosferden çıkarılan bir element olmasıdır. Ancak sahip olduğu elektron diziliminden dolayı doğada hiçbir zaman element halinde bulunmamaktadır. Magnezyum yaklaşık olarak 1.74 g/cm^3 özkütleyle sahiptir (Çizelge 2.1). Bu veri alüminyumla kıyasla %30, çeliğe kıyasla yaklaşık %70 daha düşüktür. Bununla birlikte yüksek bir mukavemete sahip ola bir malzeme olduğundan üzerinde yoğun çalışmaların yapıldığı bir elementtir (Türe 2022).

Magnezyumun yoğunluğu alüminyum, çinko ve çeliğe göre çok düşük olması nedeniyle uzay ve havacılık, elektronik, otomotiv sektörü gibi metal kullanımının fazla olduğu sektörlerde kullanım önceliği oluşturmaktadır. Ayrıca magnezyum iç yapıdaki kararlılığı, yüksek ısıl iletkenliği kolay işlenebilme ve geri dönüşüm özelliklerine sahiptir. Bununla birlikte magnezyumun kullanımını kısıtlayan bazı özellikleri de mevcuttur. Korozyona karşı direncinin düşük olması, dış etkilere karşı aşınma dayanımının düşük olması ve kimyasal etkileşiminin yüksek olması bu özelliklerden bazılarıdır (Türe 2022).

Çizelge 2.1 Magnezyumun fiziksel özellikleri (Kainer 2003).

Özellikler	Değerler
Yoğunluk (g/cm ³)	1,74
Erime Noktası (°C)	650
Kaynama Noktası (°C)	1110
Erime Isısı (kJ/kg)	369
Isıl Genleşme Katsayısı (x10 ⁻⁶)	25,5
Akma Gerilmesi (N/mm ²)	98
Uzama (%)	5
Sertlik (HB)	30

2.3.3 Magnezyumun Avantajları ve Dezavantajları

Magnezyum yapısal metal özellikli malzemelerin hepsinden daha düşük özgül ağırlığa sahiptir. Yüksek dayanım gösterirler. Dökülebilirliği ve viskozitesi iyidir bundan dolayı yüksek basınca tabi tutulan dökümler için uygundur. İşlenebilirliği yüksek bir malzemedir. Kaynak kapasitesi yüksek olduğundan kaynakla yapılan işlerde kullanımı uygundur. Ayrıca geri dönüştürülebilir bir elementtir (Gupta ve Sharon 2011).

Magnezyumun elastisite modülü diğer kıyaslandığı alüminyum, çinko ve çeliğe göre daha düşüktür. Katılaşma sırasında çekme oranı yüksektir. Soğuk durumda şekillenebilirliği düşüktür. Kimyasal aktivitesi yüksek olduğundan tepkimeye girme özelliğine sahiptir. Dış etkilere karşı aşınma dayanımı düşüktür (Gupta ve Sharon 2011).

2.3.4 Magnezyumun Kullanım Alanları

Magnezyum iyi dökülebilme özelliğine sahip olan bir elementtir. Magnezyum alaşımları ile malzemenin mukavemetini, dökülebilirliğini, işlenebilirliğini, korozyona karşı direncini, aşınmaya karşı direncini ve kaynaklanabilirliğini geliştirmek mümkündür. Magnezyum özellikle otomotiv, havacılık ve elektronik sektörlerinde yoğun kullanılan bir elementtir.

2.3.4.1 Magnezyumun Otomotiv Sektöründe Kullanımı

Araç üretimlerinde istenen özellikler genellikle donanım ve güvenliğin yanında konfordur. Bu isteklerin artması ile araçlarda fazladan ağırlık meydana gelmektedir. Ağırlıklardaki artışlar araçların performansını buna bağlı olarakta yakıtını olumsuz etkilemektedir. Bu durumların çözümü hafif malzeme kullanılmasından geçmektedir (Cole ve Sherman 1995). Magnezyumun özgül ağırlığının düşük olması söylenilen olumsuz durumları düzeltmektedir. Bununla beraber hafifleyen araçlarda yakıt tüketimi de düşmektedir ve hem ekonomik yönden hem de çevreye verilen zarar bakımından düşünüldüğünde magnezyumun otomotiv sektöründe kullanımı büyük önem arz etmektedir (Demirdal 2021).

2.3.4.2 Magnezyumun Havacılık Sektöründe Kullanımı

Magnezyum hafif olması ile beraber uygun elementler ile birleşerek geniş bir alaşım kitlesine sahip bir elementtir. Havacılık sektöründe uçak kanatlarından, gövdesinin kaplama malzemesine kadar, uçak kapılarında, koltuklarının bışenlerine kadar hatta gösterge pannelerinde dahi magnezyum alaşımlı parçalar kullanılmaktadır (Arruebarrena vd. 2007). Örneğin Boeing 727 model uçağında yaklaşık 1200 adet magnezyum alaşımlı malzeme kullanılmıştır. Magnezyum ve alaşımlarının kullanılması taşıma araçlarında önemli ölçüde ağırlıktan tasarruf ettirmektedir dolayısıyla yakıtın önemli ölçüde azalmasını sağlamaktadır (Demirdal 2021).

2.3.4.3 Magnezyumun Elektronik Sektöründe Kullanımı

Bu sektörde tasarlanan malzemelerin başlıca özelliklerinde hafiflik, ısı iletkenlik, dayanıklılık, elektrik iletkenliği, dayanıklılık istenmektedir. Magnezyum, alaşımları ile beraber bu istenen özellikleri diğer bununla beraber kıyaslanan metallerden daha iyi yansıtmaktadır. Cep telefonu, bilgisayar, fotoğraf makinesi gibi daha bir çok elektronik aletin parçalarında magnezyum kullanılmaktadır (Öztürk ve Kaçar 2016).

2.3.5 Manyezit

Manyezit, özellikle yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelerin elde edilmesinde kullanılan bir cevherdir. Manyezit cevheri, cam, çimento ve metal gibi ateşe dayanıklı ürünlerin içeriğinde mevcuttur. Manyezit cevheri gerek ham olarak gerek yakılıp toz haline getirilerek gerekse de ergime sıcaklığının altında sıcaklıklarla ısıtılması ile tozların bir araya gelerek dayanımı yüksek ürünler edilerek yani sinterleştirilerek kullanılan bir cevherdir (İnt. Kayn. 11).

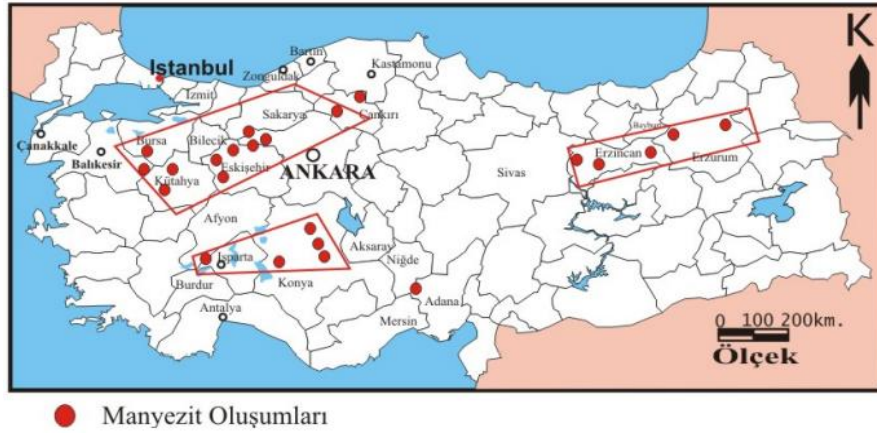
2.3.5.1 Manyezit Yatakları

Ülkemiz manyezit cevherinin bulunduğu yataklar bakımından zengin bir ülkedir. Metrelerce kalınlıkta ve iyi kalitede rezervler ülkemizde bulunmaktadır (Çizelge 2.2). Türkiye’de yaklaşık 165 milyon ton manyezit rezervi bulunmaktadır. Bu rezervin en büyük bölümü ise Konya, Eskişehir ve Kütahya bölgelerindedir.

Eskişehir’de bulunan rezerv Mihaliçcik ilçesine bağlı, Kavak, Koyunağılı ve Beyköy köyleri sınırları içerisinde bulunmaktadır. Bu bölgede üretilen cevherler ülke genelinde çimento, porselen ve seramik üretiminde ana madde olarak kullanılırken, yurt dışına ihracatı da gerçekleştirilmektedir. Ayrıca Türkiye’de Konya, Denizli, Isparta, Bursa, Balıkesir, Kütahya, Eskişehir, Erzincan illerinde de manyezit rezervleri bulunmaktadır.

Çizelge 2.2 Ülkemizdeki manyezit rezervleri (Yıldız ve Erdoğan 1995).

YERİ	REZERV($\times 10^6$ TON)	KALİTE (MgO)
Eskişehir-Yukarı Kartal	460.313	47,63
Konya-Meram	23.200	46,47
Kütahya-Sobran-Türkmentepe	22.000	46,42
Eskişehir-Tutluca	12.000	46,80
Eskişehir-Ballık	11.486	-
Erzincan-Çayırılı-Çataksu-Aravans	8.745	44,46
Konya-Çayırbağı	18.500	41,98-47,54
TOPLAM	546.244	

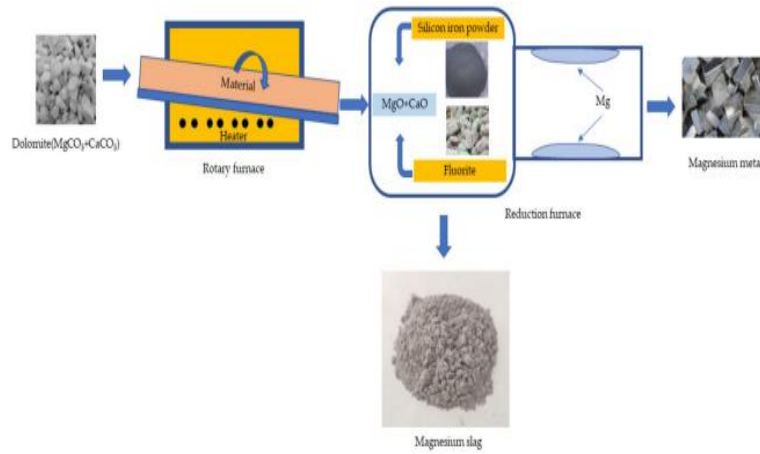


Resim 2.14 Ülkemizde bulunan manyezit rezervleri (İnt. Kayn. 9).

Dünyada en büyük manyezit cevheri rezervi bulunan ülke Çin'dir. Çin'de yaklaşık 750 milyon ton manyezit rezervi bulunmaktadır. Ayrıca Çin dışında, Avusturya, Kore, Rusya, Brezilya, İspanya, Avustralya, Kanada, Hindistan, Güney Afrika, Yunanistan, Sibirya, ABD ve Nepal gibi ülkelerde de manyezit rezervi mevcuttur.

2.4 Magnezyum Cürufu

Magnezyum üretim tesislerinde ana madde olarak dolomit veya manyezit cevheri kullanılmaktadır. Bu cevherlerin işlenmesi sonucu magnezyum elde edilmektedir. Bu işlemin yanı sıra magnezyumun cürufu elde edilmektedir. Açığa çıkan bu cüruf tesislerde atık olarak depolanmaktadır.



Resim 2.15 Dolomitten magnezyum ve cürufunun üretimi (Yang vd. 2022).

Magnezyumun hammaddesi olan cevherler (dolomit ve manyezit) öncelikle ocaktan çıkarılıp kırma işlemine tabi tutulurlar. Bu işlemden sonra fırında yaklaşık 1.250 °C’de yakılarak toz haline getirilip siloya aktarılır. Yakılarak toz haline getirilen bu cevhere %15 FerroSilis ve %2 Kalsiyum Florid ilave edilir. Bu ilavelerle birlikte değirmende öğütülür. Malzeme öğütüldükten sonra peletleme kısmına alınır. Peletleme işlemi bir nevi sertleşme olayıdır. Malzeme bu işlemden sonra bunkere aktarılır. Ardından malzeme redüksiyon ünitesinde 1250 °C’de magnezyum ayrıştırma işlemine tabi tutulur. İşlem sonucu fırınlardan magnezyum elde edilirken, magnezyum cürufu da açığa çıkmaktadır. Elde edilen magnezyum saflaştırıldıktan sonra, döküm kısmında saf magnezyum külçeleri haline getirilmektedir. Açığa çıkan magnezyum cürufu ise atık bir malzeme olarak stok alanında depolanmaktadır (Dilek 2022).

2.4.1 Magnezyum Cürufunun Özellikleri

2.4.1.1 Kimyasal Özellikleri

Magnezyumun ana maddesi olan dolomit ve manyezit, içeriğinde en az %95 oranında kalsiyum karbonat ve magnezyum karbonat bulunmaktadır. Bu hammaddeler yakılarak toz haline getirilip yüksek sıcaklıkta 1250 °C’de redüksiyon işleminden sonra içinden magnezyum metalleri alınmaktadır (Dilek 2022).

Çizelge 2.3 Magnezyum cürufunun kimyasal bileşenleri (Dilek 2022).

CaO	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O	LOI	CI	Toplam	Serbest Kireç	Reaktif SiO ₂
61,85	26,58	3,83	3,29	1,91	0,21	0,09	0,02	0	0	97,78	1,88	4,3

Çizelge 2.4 Manyezitin kimyasal bileşimi (Yılmaz ve Kuşçu 2012).

MgO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO/SiO ₂	Özgöl Ağırlık (g/cm ³)	Ateşte Kayıp (CO ₂)
45-46,6	0,4-4,0	0,4-1,2	0,2-1,0	0,03-1,0	0,3-1,0	2,9-3,0	48,5-51

Magnezyumun hammaddesi olan manyezitin kimyasal bileşiminde %52,3 CO₂, %47,7 MgO, ve çok az miktarda Fe₂O₃ bulunmaktadır. Magnezyum üretim işlemi sırasında yüksek sıcaklıkta ısı esnasında CO₂ kaybolur ve redüksiyon işlemi ile birlikte magnezyum metalleri de alındıktan sonra dolayısıyla en son kalan cürufun içindeki MgO oranı hammaddekine oranla oldukça farklıdır (İnt. Kayn. 9).

Magnezyum cürufunun çimentoya benzer bir gri rengi olup, kokusuz bir malzeme özelliği taşımaktadır. Dane boyutları 0-10 mm arasında bulunmaktadır. Bazı deneysel çalışmalarda magnezyum cürufunun yoğunluğunun 1,15-2,89 g/cm³ aralığında değiştiği gözlemlenmiştir (Yang vd. 2022).

Magnezyum cürufu fiziksel ve mekanik bazı testler yapılabilmesi adına sanki klinkermiş gibi alçıtaşı ile beraber öğütülüp elde edilen numunenin fiziksel ve mekanik testleri yapılmıştır. Bu testlerin sonucu aşağıdaki tabloda belirtilmiştir (Dilek 2022).

Çizelge 2.5 Magnezyum cürufunun fiziksel ve mekanik test sonuçları (Dilek 2022).

Blaine (cm ² /g)	32 µm	63 µm	Priz Başı (dk)	Priz Sonu (dk)	Özgöl Ağırlık g/cm ³	Genleşme (mm)	2 gün MPa	7 gün MPa	28 gün MPa
5779	30,1	7,9	360	660	3,12	1,0	5,5	9,9	17,1

Bu test sonuçları ile beraber magnezyum cürufunun priz başlangıç süresinin 360 dakika, priz sonlanma süresinin 660 dakika, özgöl ağırlığının 3,12 g/cm³, 2 günlük basınç dayanımının 5,5 MPa, 7 günlük basınç dayanımının 9,9 MPa, 28 günlük basınç dayanımının 17,1 MPa olduğu görülmektedir.

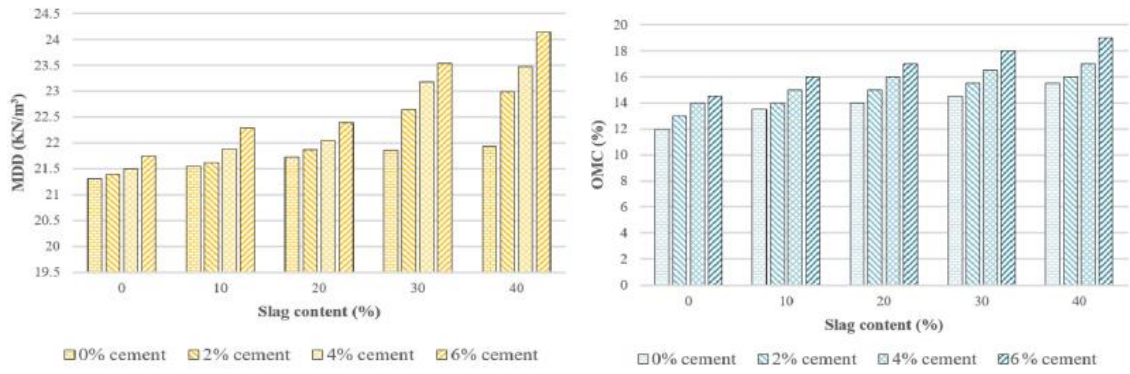
2.4.2 Magnezyum Cürufunun Zararları

Magnezyum üretiminde hava kirliliği ve küresel ısınma ile ilgili Çin’de yapılmış çeşitli araştırmalar mevcuttur. Örneğin 1 kg magnezyum elde etmek için yapılan işlemlerden 42 kg CO₂ salınımı gerçekleştiği bilinmektedir. Magnezyum cürufunun %60’ını 150 µm’dan küçük parçacıkları oluşturmaktadır. Bununla beraber ince taneciklere sahip olan magnezyum cürufu toz kirliliği oluşturabilmektedir. Ayrıca uzun süreli solumaya maruz kalındığında solunum yolu hastalıklarına maruz bıraktığı ifade edilmektedir (Yang vd. 2022).

Ek olarak magnezyum cürufu, metal olan magnezyumun bir parçası olduğundan endüstriyel bir atıktır. Bu cüruf doğrudan araziye veya çöp alanlarına bırakılmaktadır. İçinde bulunan zararlı ve ağır metaller toprağa nüfuz ederek toprak kirliliğine, daha uzun süreçte ise yağışlarla beraber yeraltı suyuna karışımı ile beraber su kirliliği oluşturduğu ifade edilmektedir (Yang vd. 2022).

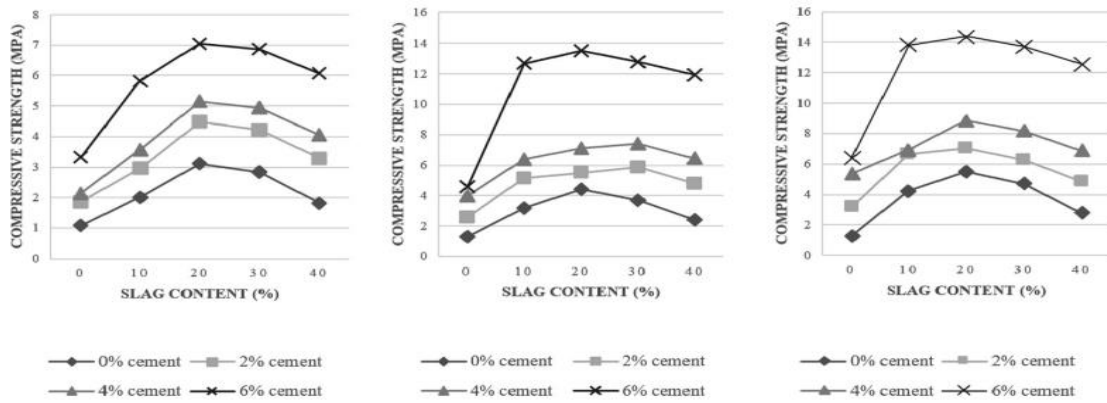
2.5 Önceki Çalışmalar

Amini, Ghasemi (2019), bu çalışmalarında magnezyum cürufunun ve çimentonun, killi kum olarak sınıflandırılan zeminin kimyasal ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada numune hazırlarken magnezyum cürufunu %10, %20, %30 ve %40 oranlarında, çimentoyu ise %6 oranında kullanmışlardır. Hem magnezyum cürufunun hem de çimentonun zemine ayrı ayrı ve beraber eklenmesi ile birlikte maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevalarında artış olduğu ifade edilmiştir. Zemin içeriğine konulan katkı miktarının artmasıyla beraber bu değerlerin artışlarının da devam ettiği kaydedilmiştir.

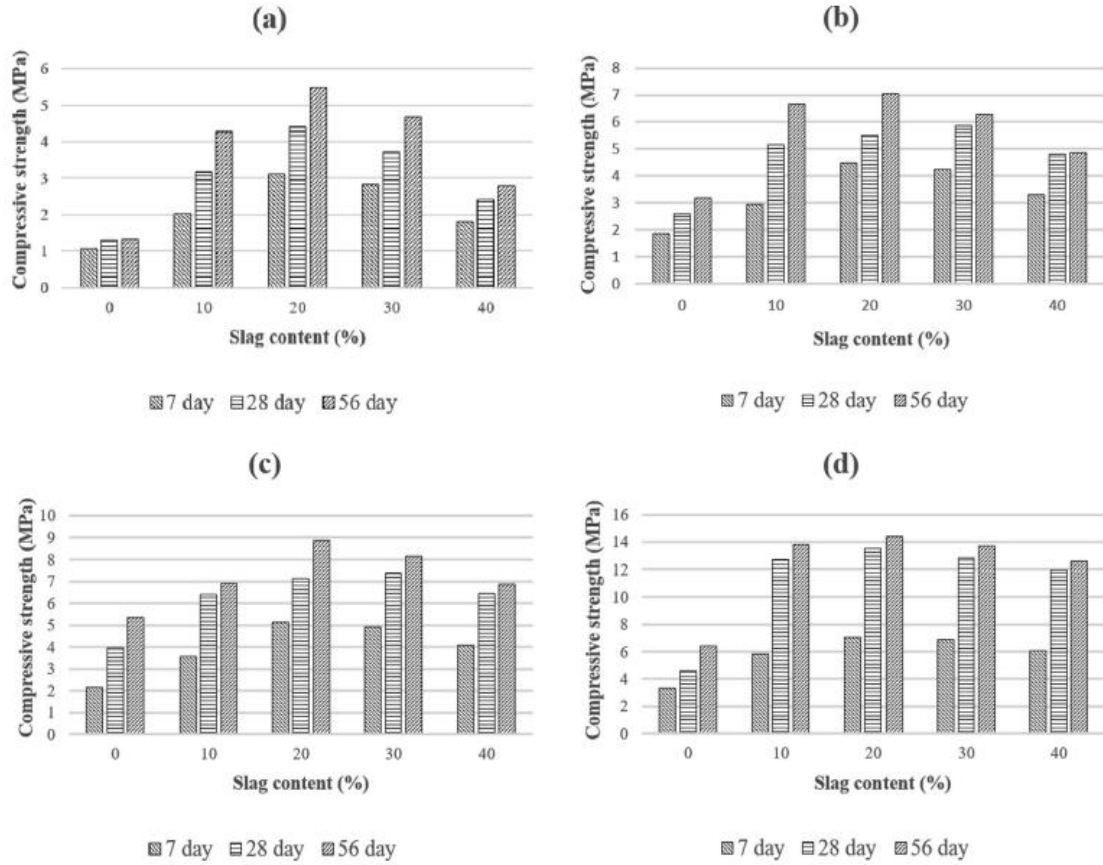


Şekil 2.2 Magnezyum cürufunun maksimum kuru yoğunluğu (Amini ve Ghasemi 2019).

Amini ve Ghasemi (2019), çalışmalarında magnezyum cürufu ve çimentonun zemine etkisini incelemek adına 7, 28, 56 günlük periyotlarla tek eksenli basınç testine tabi tutmuşlardır. Magnezyum cürufunun, zemin dayanımını tüm kür süreleri boyunca %20 oranında artırdığı gözlemlenmiştir. Fakat cüruf, zemine %30 ve %40 değerlerinde ilave edildiğinde zeminin basınç dayanımında azalmanın başladığı görülmüştür. Bunun sonucunda dayanımdaki bu azalmanın cürufun içindeki MgO bileşeninin zemini tahrip edebileceğini ifade etmişlerdir. Çimento katkısının tüm kür sürelerinde zeminin basınç dayanımını artırdığı fakat %0 ve %6 çimento oranlarında %20 Mg cürufu ile beraber ilave edildiğinde basınç dayanımı azaldığı görülürken, %2 ve %4 karışımlarında %30 Mg cürufu içeriği ile beraber ilave edildiğinde basınç dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 2.3 Magnezyum cürufunun serbest basınç dayanımları (Amini ve Ghasemi 2019).



*‘a’ %0 çimento, ‘b’ %2 çimento, ‘c’ %4 çimento, ‘d’ %6 çimento oranı

Şekil 2.4 Magnezyum cürufunun serbest basınç dayanımları (Amini ve Ghasemi 2019).

Yang vd. (2022), yaptıkları çalışmalarda magnezyumun, alüminyum ve çelikten sonra en çok kullanılan üçüncü metal olduğunu ifade etmişlerdir. Dünyanın en büyük üreticisi olan ve dünya üretiminin %85’ini oluşturan Çin’in 2021’de yaklaşık 823.000 ton magnezyum üretimi gerçekleştirilmiştir. Magnezyum üretim yöntemlerinden biri olan Pidgeon işlemi Çin’de en çok kullanılan yöntemdir. Bu işlemin sonucunda 1 ton magnezyum metali üretim esnasında 6-8 ton magnezyum cürufu ortaya çıkmaktadır. Bununla beraber Çin’de her yıl milyonlarca ton magnezyum üretimi ile beraber magnezyum cürufu da ortaya çıkmaktadır. Bu cüruflar genellikle atıl vaziyette depolanmaktadırlar. Dolayısıyla çok fazla magnezyum cürufu toprağı işgal edecektir. Bunun sonucunda topraktaki mineral dengesi bozulmaktadır. Ayrıca Çin’de bu tesislerin çoğu nehir kenarlarında konumlandırıldığından, magnezyum cürufu hızlı şekilde yeraltı su kaynaklarının kirliliğine yol açacaktır.

Yang vd. (2022), Magnezyum cürufunun kimyasal bileşimi sonuçlarına göre alkalite katsayıları M_0 , kalite katsayısı K , aktivite indeksi Ma gibi kalite değerlendirme parametreleri hesaplanmış olup değerleri gösterilmiştir (Çizelge 2.5). Bu çalışmalar sonucunda alkalite katsayılarının hepsi 1’den büyük bulunmuş olup, kalite katsayılarının hepsi 1,6’dan büyük bulunmuştur. Bu sonuçlarla beraber magnezyum cüruflarının orta kalitede cüruf tozu olduğu ve magnezyum cürufunun çimento esaslı malzeme hazırlama potansiyeline sahip olduğu görülmüştür.

Çizelge 2.6 Magnezyum cürufunun kalite değerlendirme parametreleri (Yang vd. 2022).

Source	M_0	K	Ma
Li, Y. et al.	2.143	2.310	0.055
Djokic et al.	1.667	2.997	0.499
Han, F.L. et al.	1.773	1.795	0.023
Tengxiang Magnesium Products Co., Ltd., Hami City, Xinjiang Province, China	2.020	2.098	0.027

Yang vd. (2022), çalışmalarının sonuçlarına göre endüstriyel bir katı atık olan magnezyum cürufu, çimento katkısı, çimentolu malzemeler, gübreler, kalsine porselen üretimi gibi alanlarda kullanılabilmektedir.

Dilek (2022), çalışmasında fiziksel ve kimyasal özellikler bakımından değerlendirildiğinde magnezyum cürufunun, gerekli çevresel izinlerinin de alınmasıyla birlikte, yapı malzemesi olarak kullanılabileceğini belirtmiştir. Ayrıca hammadde kaynağı ve üretim aşamaları da göz önüne alındığında, klinker muadili bir malzeme olduğu değerlendirilebildiği takdirde katkılı çimento üretiminde kullanılan puzolanik özellikli katkıların yerine kullanılabileceğini belirtmiştir. Çimento sektöründe kullanımının daha net olabilmesi için cürufun mineralojik yapısının da incelenmesi gerektiğini savunmaktadır.

3. MATERYAL ve METOT

Magnezyum cürufunun zemin iyileştirmesi üzerine etkisinin araştırılması için yapılan deneyler tanımlama deneyleri (elek analizi, ıslak analiz, kıvam limitleri deneyleri), dayanım deneyi (eksenel basınç deneyi) ve hidrolik geçirimsilik deneyleridir (permeabilite deneyi). Bu deneyler Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakóltesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarında yapılmıştır.

3.1 Materyal

3.1.1 Zemin Numunesi

Zemin numunesi, Afyonkarahisar ili sınırları içerisinde bulunan Organize Sanayi Bölgesindeki bir beton fırmasından alınmıştır. Zemin Mekaniği Laboratuvarında uygun sıcaklıkta muhafaza edilmiştir (Resim 3.1).



Resim 3.1 Zemin numunesi.

Zeminin özelliklerini belirlemek adına laboratuvarında bazı deneyler yapılmıştır. Öncelikle zemin dane dağılımını belirlemek için elek analizi deneyi yapılmış olup elekten geçen ve kalan malzemeler çizelgede gösterilmiştir. Deney sonucunda elekten geçen yüzdelere göre grafik çizilerek gösterilmiştir. Zeminin özellikleri belirtilmiştir (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1 Zeminin özellikleri.

4 nolu elekten (4,75 mm) geçen (%)	99,8
200 nolu elekten (0,075 mm) geçen (%)	4,9
Optimum Su Muhtevası W_{opt} (%)	7,90
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık γ_{kmax} (g/cm ³)	2,13
Zemin Sınıflandırma	SP

3.1.2 Magnezyum Cürufu

Deneylerde zemin içine belirli oranlarda katılarak zemin iyileştirmesinin araştırılmasının yapılacağı magnezyum cürufu Eskişehir il sınırlarında bulunan magnezyum metali üretim tesislerinden alınmıştır. Laboratuvara getirilen magnezyum cürufu öncelikle 0,425 mm elekten geçirilmiş olup, laboratuvar ortamında oda koşullarında beklemeye bırakılmıştır. Deneylerde kullanılmadan önce nemini gidermek için etüvde 1 gün bekletilmiştir (Resim 3.2).



Resim 3.2 Magnezyum tesisinden alınan magnezyum cürufu.

3.2 Metod

Magnezyum cürufunun zemin iyileştirmesinde kullanımı için sırasıyla Elek Analizi Deneyi, Standart Proctor (Kompaksiyon) Deneyi, Tek Eksenli Basınç (Eksenel Basınç) Deneyi, Permeabilite (Geçirimsizlik) Deneyi uygulanmıştır.

3.2.1 Elek Analizi

Zeminlerde iri ve ince dane çapları bir arada bulunabileceğinden 76,2 mm ile 0,075mm çapları arası için elek analizi işlemi yapılırken, 0,075 mm'den küçük çaplı daneler için ıslak analiz yöntemleri kullanılmaktadır (Aytekin 2004). İri daneli malzemenin dane dağılımını ve zemin sınıfını belirlemek amacıyla elek analizi deneyi yapılmıştır. Elek analizi deneyi yapılırken ASTM D422 standartlarına uygun 4,75mm (NO 4) ile 0,075mm (NO 200) arası elekler kullanılmış olup TS 1900-1 standartlarına uygun şekilde deney tamamlanmıştır (Resim 3.3).



Resim 3.3 Elek analizi deneyinde kullanılan elek seti.

3.2.2 Standart Proctor Deneyi (Kompaksiyon Deneyi)

Standart Proctor Deneyi, Tek Eksenli Basınç deneyi ve Permeabilite deneylerinde kullanılacak numunelerin hazırlanmasında gerekli olan maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevasının tespiti için yapılmaktadır.

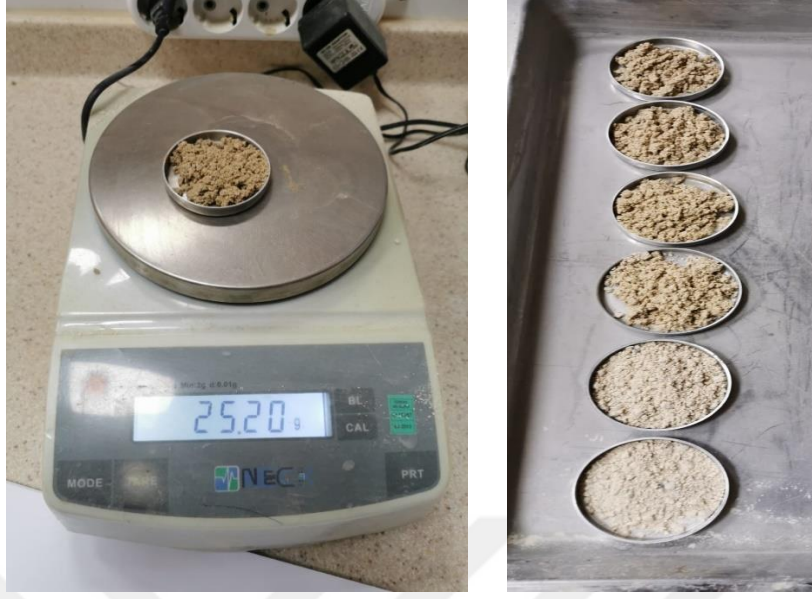
%5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında magnezyum cürufu karışımlarının herbiri için ayrı ayrı kompaksiyon deneyi yapılmıştır. Her karışım oranı için maksimum kuru birim ağırlık ve optimum su muhtevası bulunmuştur.

Deneyde öncelikle belirli bir ağırlıkta zemin tartılıp ve önceden belirlenen oranlarında su zemine katılarak homojen bir karışım elde edilir. Ardından hazırlanan malzeme TS 1900-1 (2006)'e göre iç çapı 105 mm ve iç yüksekliği 115,5 mm olan kompaksiyon kalıbına 3 tabaka halinde her sette kabın 1/3'ü doldurularak 25'er vuruşla sıkıştırılır (Resim 3.4). Sıkıştırma işleminde kullanılan tokmağın ağırlığı 2,5 kg olup düşme yüksekliği 30,5 cm'dir (Gücek 2011).



Resim 3.4 Kompaksiyon deneyi.

Sıkıştırma işlemi bittikten sonra numunelerin ağırlık ve hacimleri kayıt altına alınır. Kalıptan spatula yardımı ile küçük bir parça alınıp etüvde kurutulup yaş ve kuru ağırlıkları kaydedildikten sonra numunenin maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevaları belirlenir (Resim 3.5). Bu tayinler her bir numune için karışım oranı ve her bir su oranı için tekrarlanır (Alataş 1996).



Resim 3.5 Kompaksiyon sonucunda numune alımı.

3.2.3 Tek Eksenli Basınç Deneyi (Serbest Basınç Deneyi)

Bu deneyin amacı zeminin basınç dayanımını ölçmektir. Zeminin basınç dayanımının ölçülmesinin en basit yöntemi tek eksenli basınç deneyidir. Serbest basınç deneyinde yanal basınç yoktur yani basınç tek eksenenden verilmektedir. Bu yöntem ekonomik olmasından ve hızlı sonuç vermesinden dolayı tercih edilmektedir (Diallo 2019).

Bu deneyde kullanılacak olacak numunenin yükseklik / çap oranının minimum 2 olması gerekmektedir ($H/D \geq 2$). Eksenel basınç deneyinde, çapı 5 cm ve yüksekliği 10,5 cm olan silindir demir kalıplar kullanılmıştır. Numune hazırlama işleminde öncelikle herhangi bir katkı katılmaksızın kompaksiyon deneyinden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevasını kullanarak hazırladığımız karışım silindir kalıba 3 tabaka halinde kompaksiyon tokmağı ile sıkıştırılarak yerleştirilmiştir (Resim 3.6). Numune çıkarıcı yardımıyla çıkarılan numuneler streçle sarılarak küre bırakılmıştır.



Resim 3.6 Tek eksenli basınç deneyi numune hazırlama.

Katkılı numunelerde de kompaksiyon deneyinden bulunan maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası kullanılarak katkı oranında magnezyum cürufu katılarak iyice karıştırılmıştır. Numune ve katkı miktarı numune kalıbının hacmine uygun olacak şekilde kompaksiyonda elde edilen kuru yoğunluk kullanılarak belirlenmiştir. Buna hacim kontrollü numune hazırlama denilmektedir. Daha sonra bu karışımlar kompaksiyon tokmağı ile üç tabaka halinde silindirik numune kalıbına sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Yerleştirilen numuneler hidrolik numune çıkarıcı yardımı ile çıkarılıp tartılmıştır ve ağırlıkları kaydedilmiştir. Numunelerin su kaybının önüne geçilmesi için üçer kat streç film ile sarılmıştır. Üzerlerine kağıt bant ile tarihleri ve ağırlıkları yazılmıştır. Numuneler desikatörlere konularak kırım zamanına kadar kür uygulanmıştır (Resim 3.7). 1, 7, 28, 56 ve 112 günlük kür süreleri sonunda kırılacak tüm numuneler için numune hazırlama işlemleri aynı şekilde yapılmıştır. Her karışım ve kür süresi için 3 adet numune hazırlanmıştır. Bu durum deneysel hataları azaltmak için yapılmıştır. Tek eksenli basınç deneyi için numune sayıları ve kür günleri Çizelge 3.2’de belirtilmiştir.



Resim 3.7 Numunenin çıkarılması, sarılması ve saklanması.

Çizelge 3.2 Tek eksenli basınç deneyi için numune sayıları ve kür günleri.

KATKI ORANLARI	KÜR SÜRELERİ					
	1 GÜN	7 GÜN	28 GÜN	56 GÜN	112 GÜN	
Katkısız Zemin	3	3	3	3	3	15
Zemin + %5 Mg Cürufu	3	3	3	3	3	15
Zemin + %10 Mg Cürufu	3	3	3	3	3	15
Zemin + %15 Mg Cürufu	3	3	3	3	3	15
Zemin + %20 Mg Cürufu	3	3	3	3	3	15
Zemin + %25 Mg Cürufu	3	3	3	3	3	15
Zemin + %30 Mg Cürufu	3	3	3	3	3	15
TOPLAM NUMUNE SAYISI						105

Bekleme süresi sonunda zamanı gelen numuneler zarar görmeden açılarak serbest basınç deneyine hazırlanmıştır. Serbest basınç deney aletine numune tam ekseninde olacak şekilde yerleştirilmiştir ve aletin boşluğu alınmıştır (Resim 3.8). Ardından deformasyon saati sıfır ve yükleme hızı 1 mm/dk olacak şekilde ayarlanmıştır. Deney esnasında uygulanan yükler ile birlikte deformasyon saatinde ölçülen değerler kaydedilmiştir. Okuma işlemi yükler maksimum noktaya ulaşip düşmeye başladıktan sonra numunede kırılmalar oluşuncaya kadar devam etmiştir (Resim 3.9). Deney TS 1900-2 (2006)'ye uygun şekilde yapılmıştır. Deneyin sonuncunda numunenin gerilme-deformasyon eğri grafikleri çizilmiştir. Kırılmanın olduğu değer zeminin serbest basınç dayanımını ifade etmektedir (Önalp 2002).



Resim 3.8 Serbest basınç deneyi aletine numunenin yerleştirilip kırılması.



Resim 3.9 Serbest basınç deneyi sonundaski numuneler.

3.2.4 Permeabilite Deneyi (Geçirimsizlik Deneyi)

Zemini oluşturan tanelerin dağılımı nasıl olursa olsun aralarında boşluklar mevcuttur. Bu boşluklar birbirleri ile kılcal bir boru gibi bağlantılıdır. Zemindeki su bu boşluklardan akarak enerjisi yüksek olan noktadan düşük olan noktaya doğru hareket etmektedir. Zeminlerde yaşanan bu duruma geçirimsizlik denir.

Zeminlerin geçirimsizliği dane boyutları, dane yapısı, dane dağılımı, boşluk oranı, zeminin doygunluk derecesi, suyun viskozitesi, sıcaklık gibi faktörlere bağlıdır (Uzuner 2012). Bu deneyde amaç zemindeki su geçirimsizliğinin kür süresine göre ve zemin içine belirli oranlarda karıştırılan magnezyum cürufuna bağlı değişiminin araştırılmasıdır.

Zeminlerin geçirimsizliği 2 farklı yöntem ile tayin edilir. Bunlar düşen seviyeli permeabilite deneyi ve sabit seviyeli permeabilite deneyidir. İri daneli zeminde sabit seviyeli permeabilite deneyi kullanılmaktadır.

Deneyde, zemini yerleştirmek için 10 cm çapında ve 11,5 cm yüksekliğinde silindirik metal kalıplar kullanılmıştır. Numune hazırlanırken kompaksiyon deneyinde bulunan maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri kullanılmıştır. Öncelikle zemine katkısız zemin numunesi kompaksiyon değerleriyle hazırlanmış ve tokmak yardımı ile 3 tabaka halinde her tabakaya 25'er vuruş olacak şekilde sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Hazırlanan numune yaka sökülerek üst yüzeyi pürüzsüz hale getirilmiştir ve ardından hava almayacak şekilde su muhtevasının korunması için 3 kat streç film ile sarılarak dasikatörler içinde beklemeye alınmıştır (Resim 3.10). Aynı şekilde magnezyum cürufu oranları %10, %20, %30 olan karışımlar için numune hazırlama işlemi yapılmıştır. Tüm bu işlemler 1, 7, 28 gün kür süreleri içinde tekrarlanmıştır.



Resim 3.10 Permeabilite deneyi numuneler.

Kür süreleri sonunda numuneler alt yüzeyinden su girişi, üst yüzeyinden su çıkışı olacak şekilde sabit seviyeli geçirimsizlik deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Deney aleti su seviyesi sabit kalacak şekilde ayarlanmış ve belli bir su basıncında permeabilite deneyi gerçekleştirilmiştir. Dereceli mezurde birikmeye başlayan suyun miktarları zamana bağlı olarak kaydedilmiştir (Resim 3.11). Deney sonunda geçirimsizlik katsayısı Darcy kanununa göre hesaplanmıştır. Bu deneyler tüm numune karışımları için tekrarlanmıştır.



Resim 3.11 Permeabilite deney hücresi ve sistemi.

4. BULGULAR

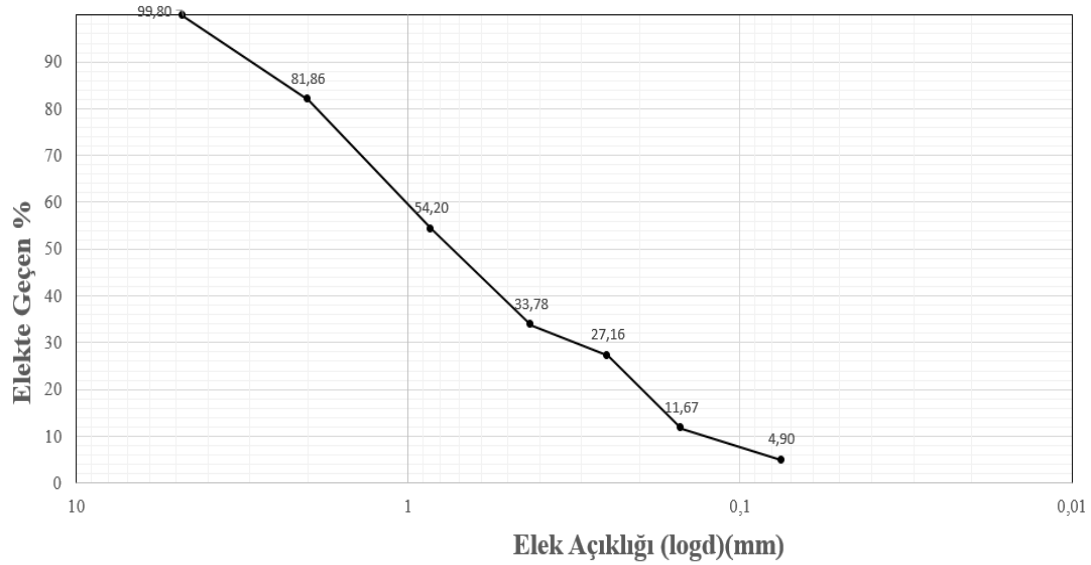
4.1 Yapılan Deneysel Çalışmalar

4.1.1 Elek Analizi Deneyi Sonuçları

Çizelge 4.1 Elek analizi deney sonuçları.

Elek No ve Açıklık	Elekten Geçen (g)	Elekte Kalan (g)	Elekten Geçen (%)
4,75mm (NO 4)	2994,01	5,89	99,80
2mm (NO 10)	2455,83	544,07	81,86
0,85mm (NO 20)	1625,89	1374,01	54,20
0,425mm (NO 40)	1013,39	1986,51	33,78
0,25mm (NO 60)	814,83	2185,07	27,16
0,15mm (NO 100)	350,12	2649,78	11,67
0,075mm (NO 200)	147,14	2852,76	4,90

ELEK ANALİZİ



Şekil 4.1 Elek analizi grafiği ile dane dağılımı.

Çizelge 4.2 Elek analizi sonuçlarına göre zemin sınıflandırma.

Granülometri Parametreleri	Değerler
D ₁₀ mm (Efektif Dane Çapı)	0,18
D ₃₀ mm	0,55
D ₆₀ mm	1
Cu (Üniformluluk katsayısı)	D ₆₀ / D ₁₀ = 5,55
Cc (Eğrilik katsayısı)	D ₃₀ ² / (D ₆₀ x D ₁₀) = 1,68
Zemin Sınıfı	SP (Kötü derecelenmiş kum)

Yapılan elek analizi deneyi sonuçları çizelgede gösterilmiştir (Çizelge 4.1). Bu deneyin sonuçlarına göre granülometri eğrisi çizilmiştir (Şekil 4.1). Grafik üzerinden D₁₀ (efektif dane çapı), D₃₀ ve D₆₀ tane çapı değerleri elde edilmiş ve bu değerler yardımıyla üniformluluk katsayısı (c_u) ve derecelenme katsayısı (c_c) hesaplanmıştır. Bu değerler Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Birleşik zemin sınıflandırma sistemine (USCS) göre 200 nolu elekten geçen dane yüzdesi %50’den az olduğundan zemin iri daneli zemin sınıfına girmektedir. Ayrıca 200 nolu elekten geçen dane yüzdesi %5’ten az olduğundan Cu ve Cc katsayıları da göz önüne alındığında zemin sınıfı SP (Kötü Derecelenmiş Kum) olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.3).

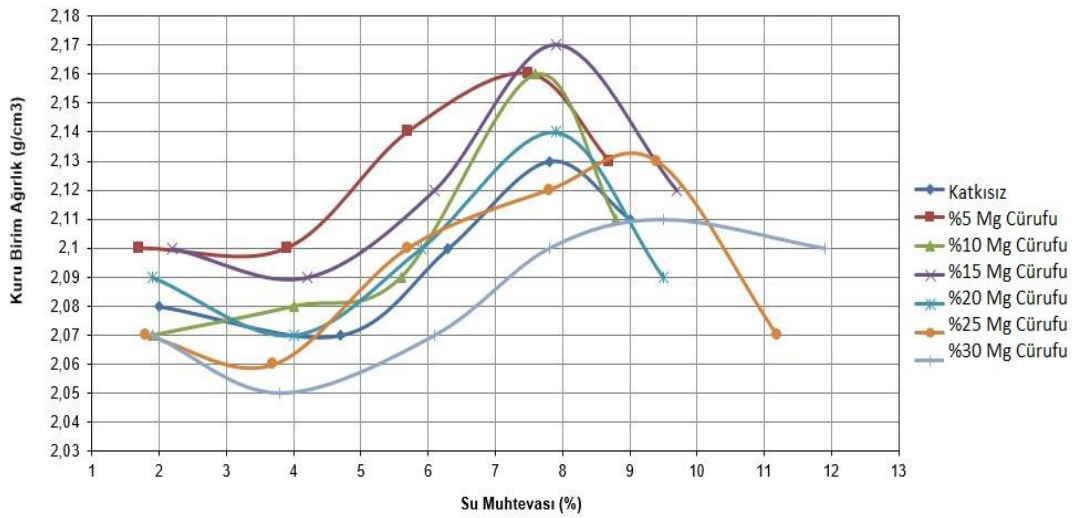
Çizelge 4.3 Birleşik zemin sınıflandırma sistemi (USCS).

Ana gruplar	Özellikler	Derecelenme	Simge	Grup adı ^B
İri taneli zeminler (%50’den fazlası 75 µm’den büyük)	ÇAKILLAR Kaba tanelerin %50’den fazlası (2 - 60 mm)	Cu>4 ve 1<Cr<3	GW	Düzgün tane dağılımlı Çakıl ^C
		Cu<4 veya 1>Cr>3	GP	Üniform Çakıl ^C
		İnceleri ML, MI veya MH	GM	Siltli Çakıl ^C
		İnceleri CL, CI veya CH	GC	Killi Çakıl ^C
	KUMLAR Kaba taneleri %50’den fazlası (75µm - 2 mm)	Cu>6 ve 1<Cr<3	SW	Düzgün tane dağılımlı Kum ^D
		Cu<6 ve/veya 1>Cr>3	SP	Üniform Kum ^D
İnce taneli zeminler (%50’den fazlası 75 µm’den küçük)	SİTLER VE KİLLER (Likit limit <35)	PI >4 ve A doğrusu üstünde	CL ^E	Düşük Plastisiteli Kil
		PI <4 ve A doğrusu altında	ML ^E	Düşük Plastisiteli Silt
	SİTLER VE KİLLER (35<Likit limit <50)	PI, A doğrusu üstünde, üzerinde	CI ^E	Orta Plastisiteli Kil
		PI, A doğrusu altında	MI ^E	Orta Plastisiteli Silt
	SİTLER VE KİLLER (Likit limit >50)	PI, A doğrusu üstünde, üzerinde	CH ^E	Yüksek Plastisiteli (Yağlı) Kil
		PI, A doğrusu altında	MH ^E	Yüksek Plastisiteli (Elastik) Silt
	Koyu renkli, kokulu, aşırı organik malzeme içeriyor		PT	Turba

A : İncelerin oranı %5 ile %12 arasında ise zemin çift sembol ile ifade edilir.
C : Örnekte %15’ten fazla kum varsa grup adına "Kumlu" terimi eklenir
E : LL (kurutulmuş) / LL (doğal) < 0.75 ise "O" terimi eklenir
B : Zemin moloz içeriyorsa grup adına eklenir
D : Örnekte %15’ten fazla çakıl varsa grup adına "Çakıl" terimi eklenir

4.1.2 Kompaksiyon Deneyi Sonuçları

Kompaksiyon deneyi zeminin su muhtevasını belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Tek eksenli basınç deneyi ve permeabilite deneylerinde kullanılacak olan değerler, Kompaksiyon deneyinin sonucunda elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlığa denk gelen optimum su muhtevası değeridir.



Şekil 4.2 Tüm numunelere ait kompaksiyon grafiği.

Kompaksiyon deneyi sonuçları Çizelge 4.4'te gösterilmiştir. Bu sonuçta katkısız numunenin maksimum kuru birim hacim ağırlığı $2,13 \text{ g/cm}^3$ olurken optimum su muhtevası % 7,9 değerine ulaşmıştır. Deney sonuçlarına göre katkı oranlarının %5, %10, %15 olduğu numunelerde, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri karışım oranı artışına paralel şekilde artış göstermektedir. Fakat magnezyum cüruf katkısının %20, %25, %30 numunelerde maksimum kuru birim hacim ağırlık düşerken optimum su muhtevası artmaya devam etmektedir (Şekil 4.2 ve Çizelge 4.4). Katkı oranlarına göre her bir karışımın kompaksiyon grafikleri EK1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 Numunelerin kompaksiyon değerleri.

Katkı Oranı	γ_{maks} (g/cm³)	Wopt (%)
0%	2,13	7,9
5%	2,161	7,4
10%	2,165	7,7
15%	2,17	7,8
20%	2,14	7,9
25%	2,133	9
30%	2,11	9,5

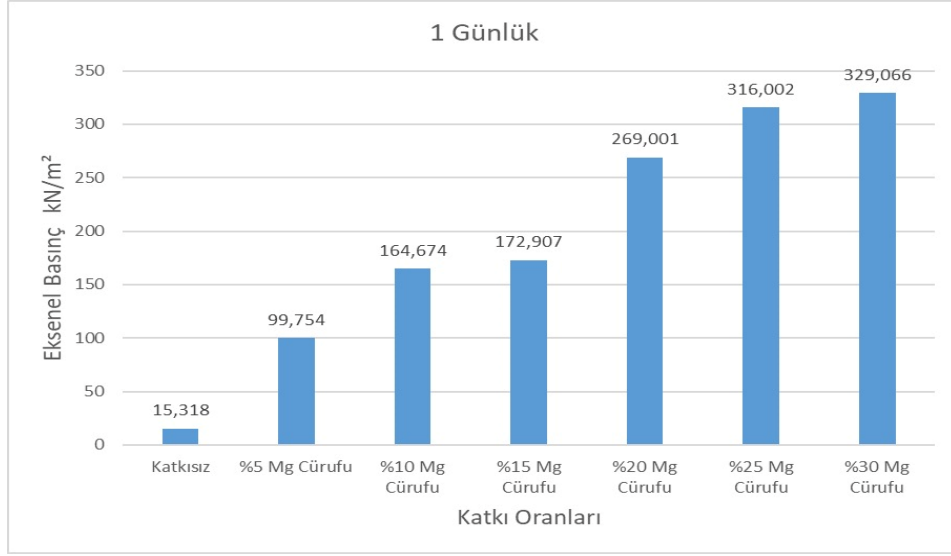
4.1.3 Tek Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları

Magnezyum cürufunun zemin dayanımına yaptığı etkiği görmek için yapılan tek eksenli basınç deneylerinin sonuçları Çizelge 4.5'te verilmiştir. Numunelerde farklı oralarda magnezyum cürufu katılmış, aynı zamanda bu numunelere farklı kür süreleri uygulanmıştır. Çizelge 4.5 incelendiğinde magnezyum cürufu katkı oranı ve kür süresi artışlarına bağlı olarak numunelerde dayanımların arttığı görülmektedir.

Çizelge 4.5 Tek eksenli basınç deneyi sonuçları.

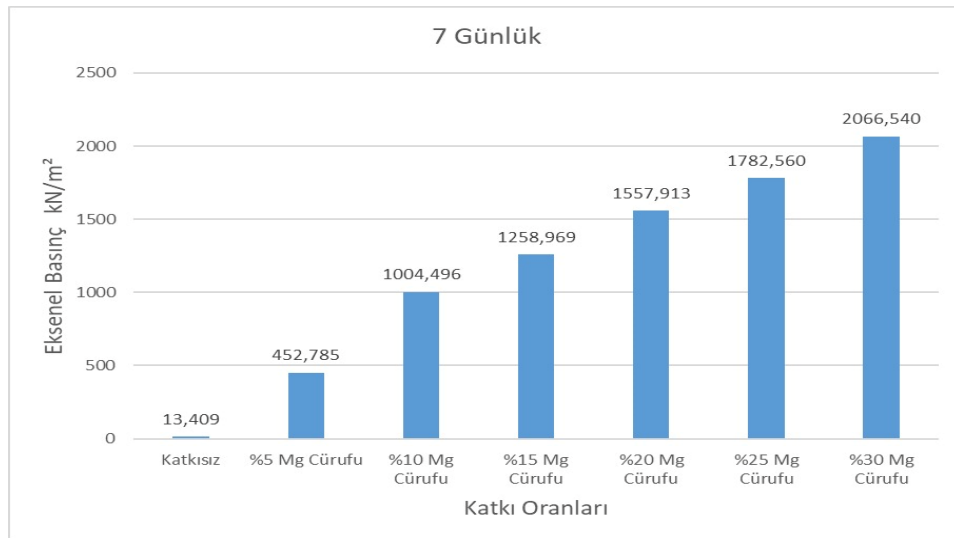
NUMUNE ADI	Qu, Serbest Basınç Dayanımı kN/m²				
	1 GÜN	7 GÜN	28 GÜN	56 GÜN	112 GÜN
Doğal Zemin	15,32	13,41	15,44	15,37	15,77
Doğal Zemin + %5 Mg Cürufu	99,75	452,78	493,83	797,09	1088,85
Doğal Zemin + %10 Mg Cürufu	184,07	1004,50	1116,98	1393,78	1598,90
Doğal Zemin + %15 Mg Cürufu	155,41	1258,97	1868,73	2334,33	2368,08
Doğal Zemin + %20 Mg Cürufu	269,00	1557,91	2156,01	2801,75	2840,71
Doğal Zemin + %25 Mg Cürufu	321,00	1782,56	2953,54	2969,78	3296,33
Doğal Zemin + %30 Mg Cürufu	285,73	2066,54	3111,55	3128,10	3342,85

Deney sonuçlarına göre 1 gün kür sonunda katkısız numunenin dayanımı yaklaşık 15 kN/m² olurken, %5 magnezyum cürufu katkılı numunenin dayanımı 99,75 kN/m²'dir. Numunedeki dayanım yaklaşık 6 kat artış göstermiştir. Magnezyum artışına bağlı olarak dayanımın da arttığı gözlemlenmiştir. %10 - %15 arasında ve %25 - %30 arasında dayanımın artış oranının daha az olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.3).

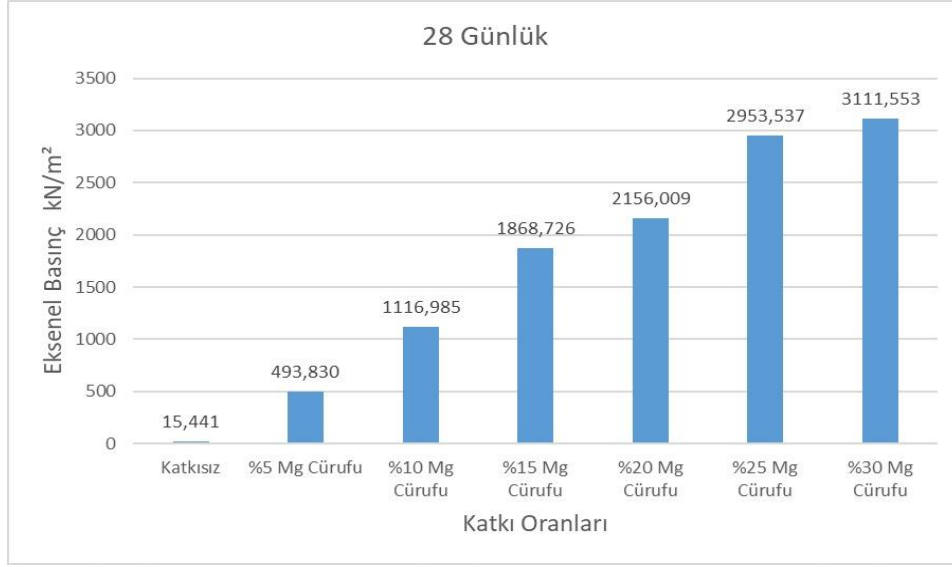


Şekil 4.3 Katkı oranlarına göre numune dayanımları (1 günlük).

7 ve 28 günlük kür sonunda numunenin kırılması sonucu yine 1 günlük kür sonundaki gibi katkısız ile % 5 katkılı arasında hızlı bir artış görülmüştür (15 kN/m² den 450-490 kN/m² ye yükselmiştir). %10 katkı miktarından itibaren artış oranları lineerlik göstermektedir. 28 günlük kürde %30 katkı oranındaki artış oranı az seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca 7 ve 28 günlük kür sonucunda kırılan numunenin 1 günlük kür sonucunda kırılan numuneye göre her bir katkı oranında da çok daha fazla dayanım elde edildiği gözlemlenmiştir. 1, 7, ve 28 günlük katkısız numunenin dayanımında bir değişim olmadığı görülmüştür (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5).

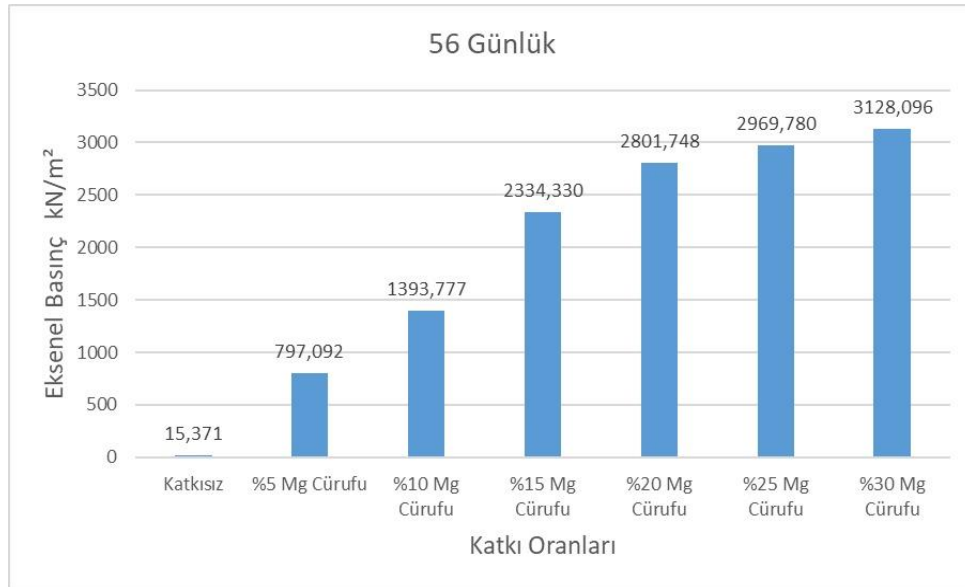


Şekil 4.4 Katkı oranlarına göre numune dayanımları (7 günlük).

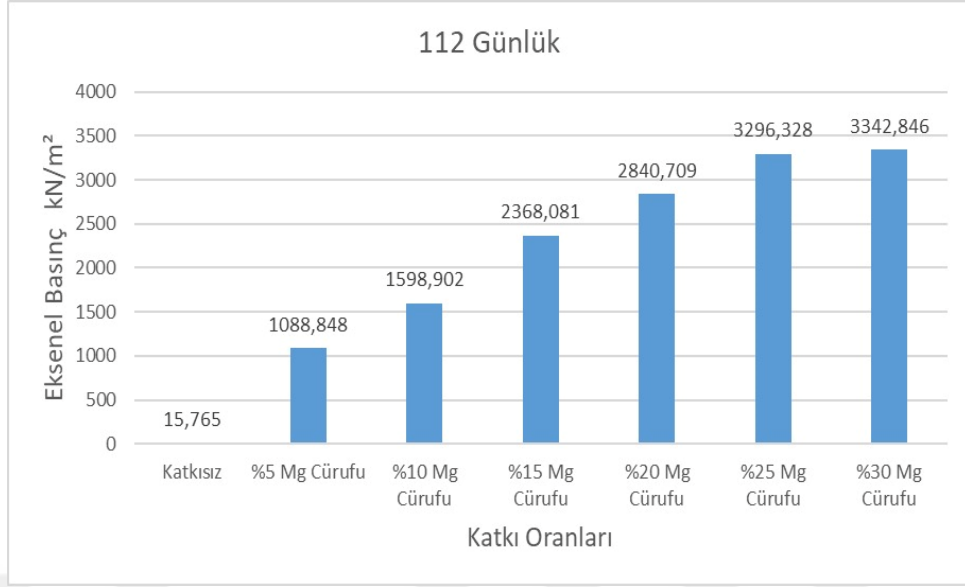


Şekil 4.5 Katkı oranlarına göre numune dayanımları (28 günlük).

56 ve 112 günlük kür sonucunda kırılan numunelerin dayanımında %5 katkılı numunede katkısız numuneye göre oldukça büyük artışlar meydana gelmiştir. Daha sonra katkı oranları arttıkça dayanımlardaki artışların yine belli bir lineerlik gösterdiği söylenebilir. Ancak % 15 katkı oranından sonraki katkı oranlarında dayanım artış oranı daha düşüktür. Ayrıca 7 ve 28 günlük kür sonucunda kırılan numunelere göre de artış oranları daha düşük olmuştur (Şekil 4.6 ve Şekil 4.7).

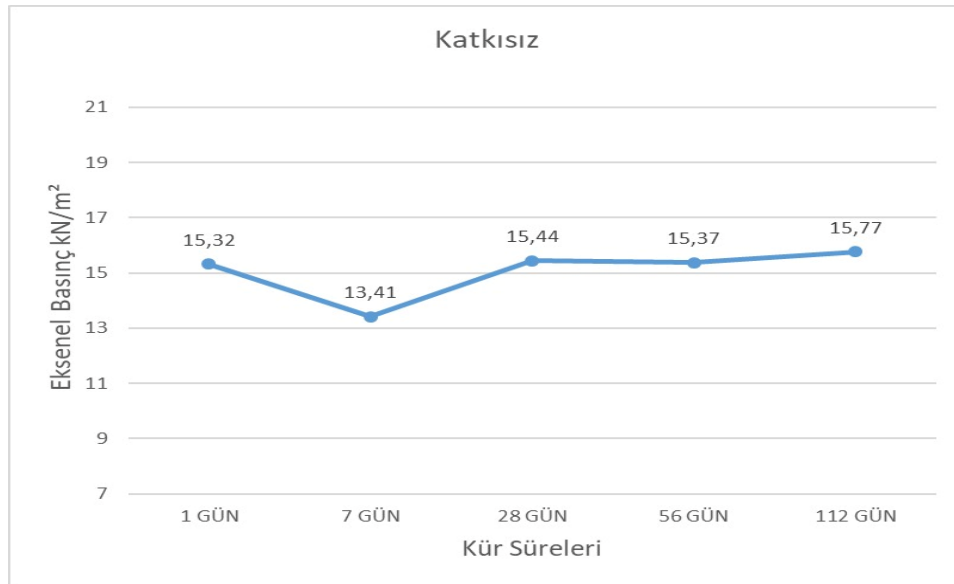


Şekil 4.6 Katkı oranlarına göre numune dayanımları (56 günlük).



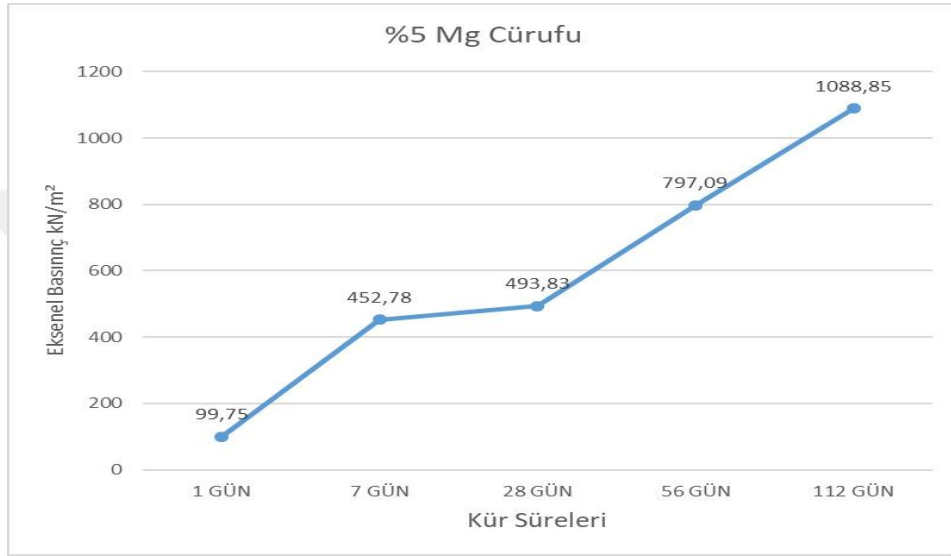
Şekil 4.7 Katkı oranlarına göre numune dayanımları (112 günlük).

Kür sürelerine bağlı dayanım değişimi incelendiğinde katkısız numunenin dayanımında bir değişim olmadığı görülmektedir. Bu durum katkı iri taneli numunede bağlayıcılık etkisi gösteren katkının olmamasından kaynaklandığı açıktır. Kullanılan magnezyum cürufunun dayanımı etkilediği ve süre içinde dayanımı artırdığı açık bir şekilde görülmektedir. Katkısız numunede kür sürelerinin dayanımı etkilemediği söylenebilir (Şekil 4.8).

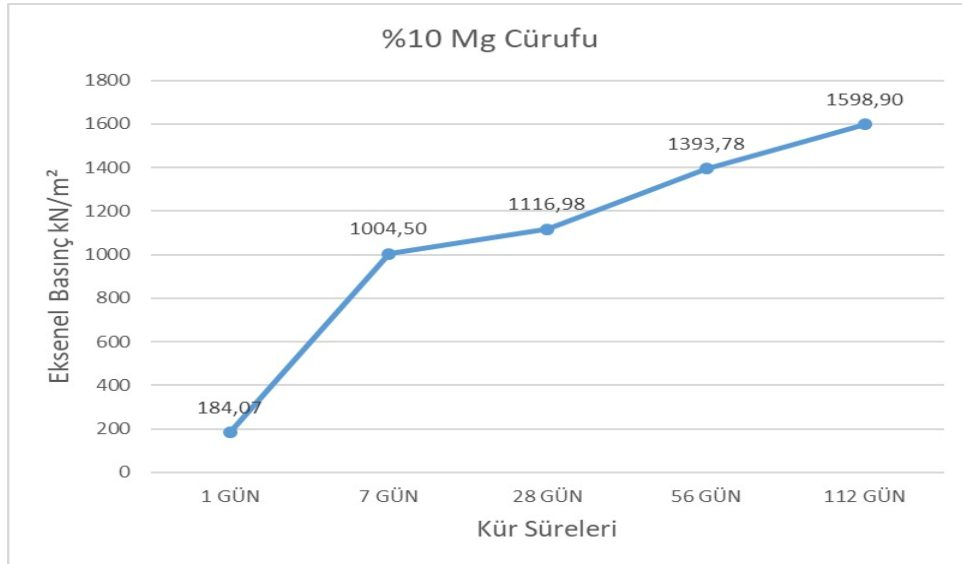


Şekil 4.8 Kür sürelerine göre numune basınç dayanımları (katkısız).

%5 ve %10 magnezyum cürufu katkılı zemin numunelerinin kırımı sonucunda 1 ve 7 günlük kür sürelerinde hızlı bir dayanım artışı meydana gelirken, 28 günlük kür süresinde dayanım artış hızı azalmaktadır. 56 ve 112 günlük sürelerde ise yine 1 ve 7 günlük süreçteki gibi hızlı bir dayanım artışı meydana gelmektedir. Ayrıca tüm kür sürelerinde %10 katkı oranındaki numune, %5 katkı oranındaki numunenin yaklaşık 2 katı kadar daha fazla dayanım göstermiştir (Şekil 4.9 ve Şekil 4.10).

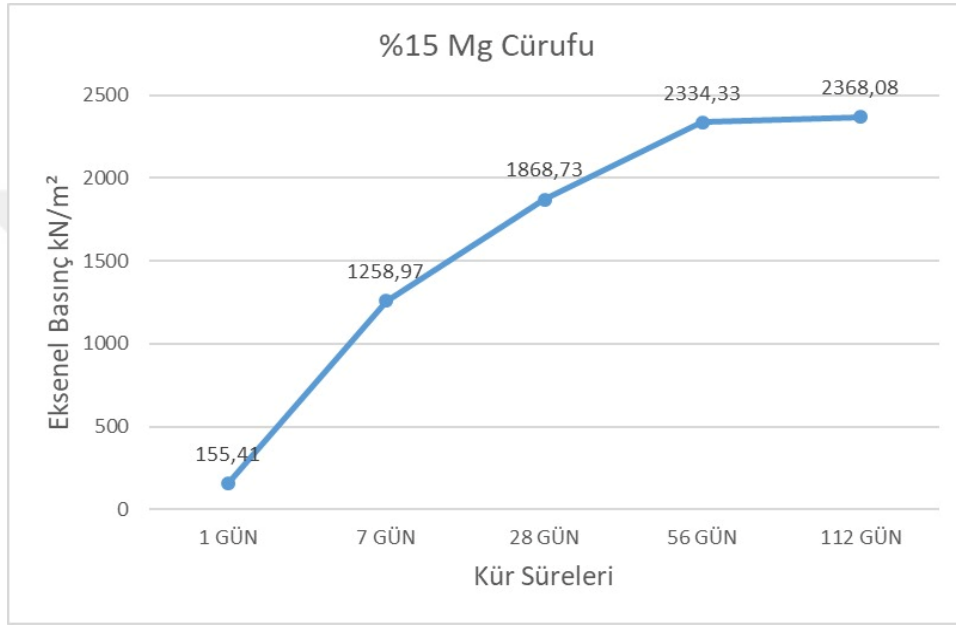


Şekil 4.9 Kür sürelerine göre numune basınç dayanımları (% 5 MC katkılı).

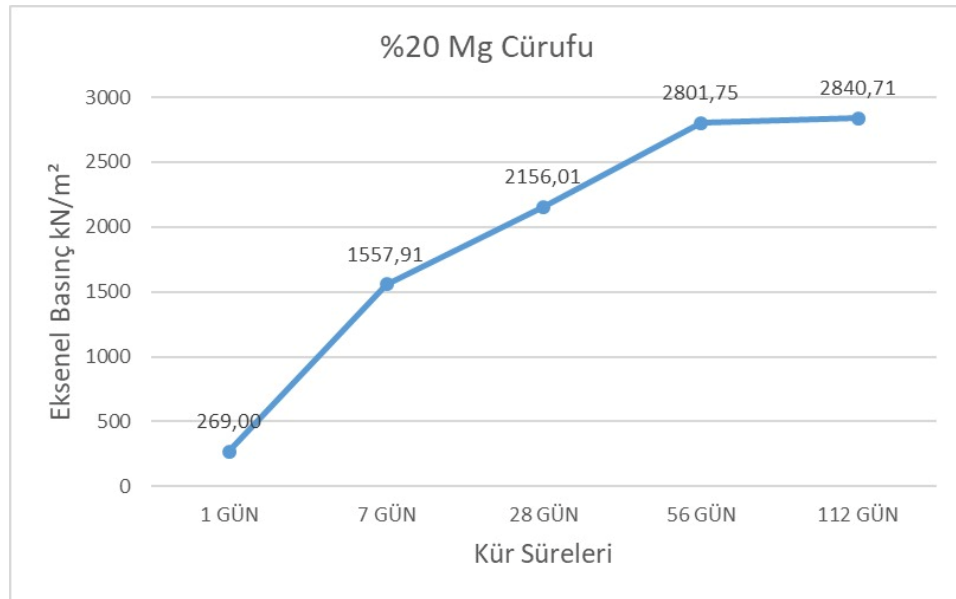


Şekil 4.10 Kür sürelerine göre numune basınç dayanımları (% 10 MC katkılı).

%15 ve %20 katkı içerikli numunelerin 1, 7, 28 ve 56 günlük kür süreleri sonundaki kırılmalarının sonucunda basınç dayanımlarında gözle görülür iyi bir artış varken, 112 günlük kür süresi sonunda bu artış çok az seviyededir. Bu durumda %15 ve %20 katkılı zeminlerde 112 günden sonra gözle görülür bir artış olmayacağı söylenebilir. Ayrıca tüm kür sürelerinde %20 katkı oranındaki basınç dayanımları %10 katkı oranındakinden daha fazladır (Şekil 4.11 ve Şekil 4.12).

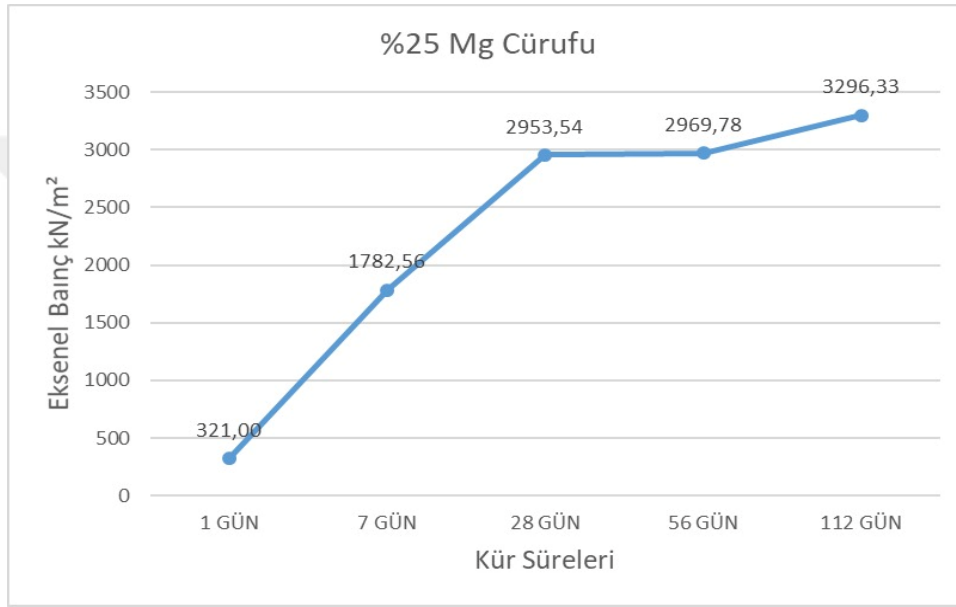


Şekil 4.11 Kür sürelerine göre numune basınç dayanımları (% 15 MC katkılı).

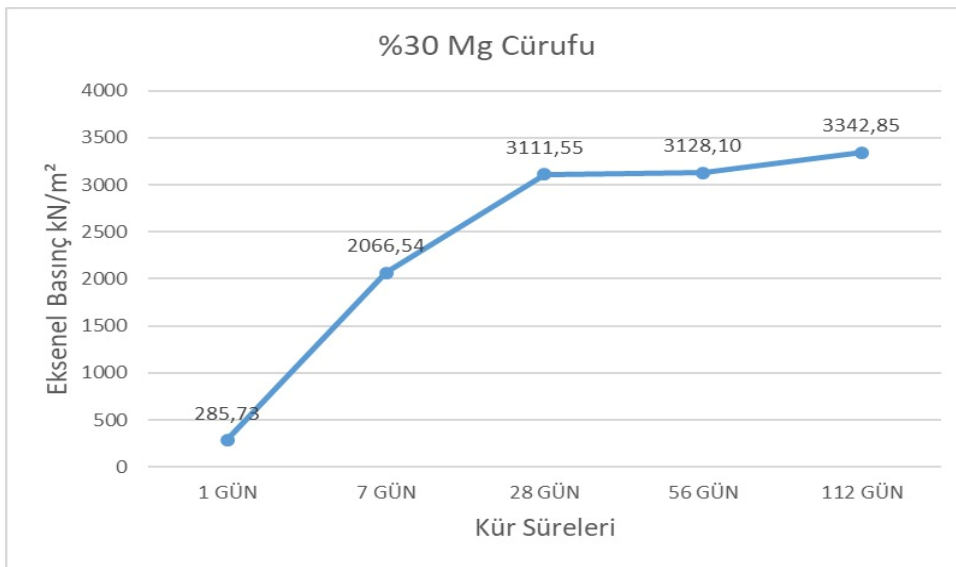


Şekil 4.12 Kür sürelerine göre numune basınç dayanımları (% 20 MC katkılı).

%25 ve %30 katkı oranlarında 1, 7 ve 28 günlük kür süreleri sonundaki numune kırımalarında gözle görülür bir şekilde dayanım artışı meydana gelmiştir. 28 günden itibaren olan kırımlarda ise dayanım artış oranı çok düşüktür. Bu durumda %25 ve %30 katkılı zeminlerde 28 günden sonraki kür süreleri sonundaki kırımlarda fazla bir basınç artışı gözlenmemiştir. Bu sonuçla beraber %30 katkı oranındaki dayanımlar, %25 katkı oranındaki dayanımlardan daha fazladır (Şekil 4.13 ve Şekil 4.14).



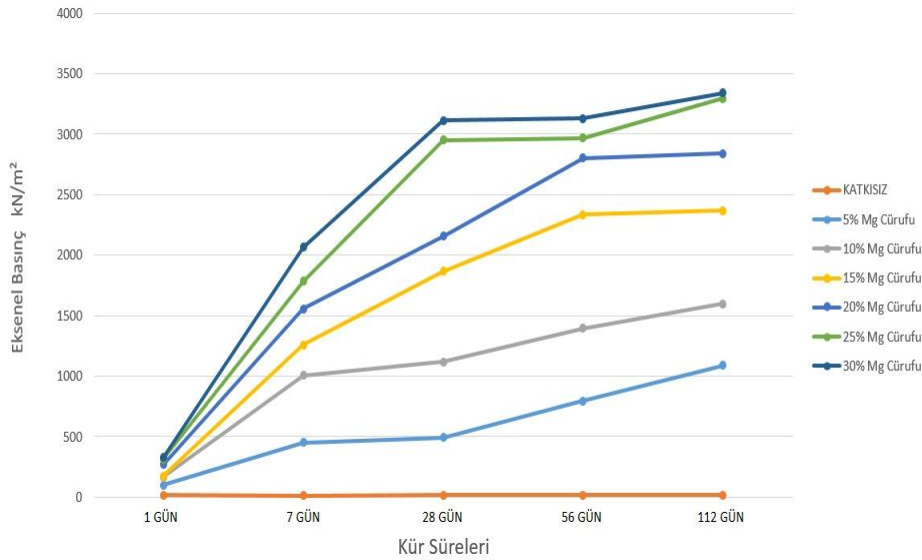
Şekil 4.13 Kür sürelerine göre numune basınç dayanımları (% 25 MC katkılı).



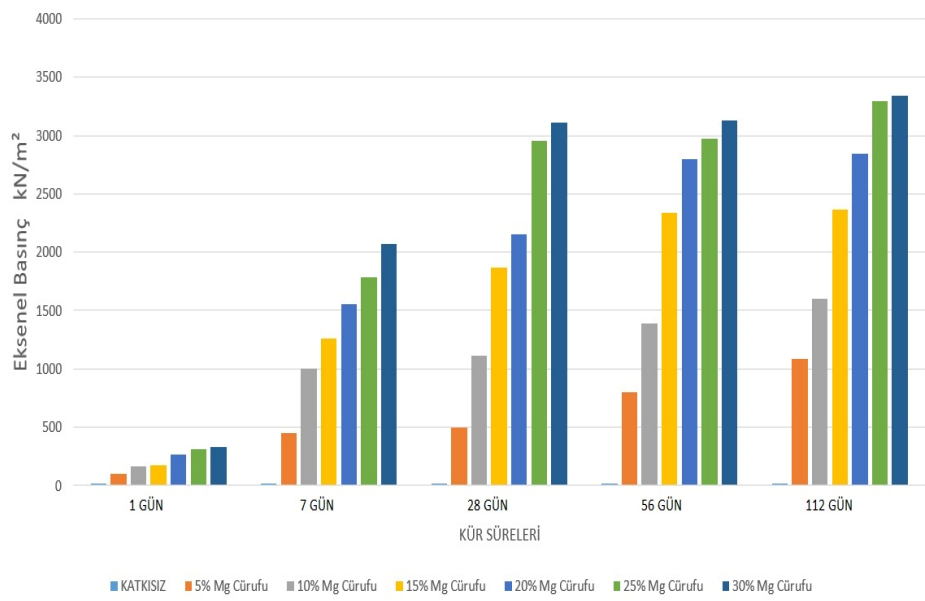
Şekil 4.14 Kür sürelerine göre numune basınç dayanımları (% 30 MC katkılı).

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 tüm katkı oranları ve kür süreleri sonunda elde edilen dayanım değerlerinin tamamını göstermektedir. Grafikler incelendiğinde zemin içerisine katılan magnezyum cüruf miktarının artmasıyla birlikte kür süreleri boyunca tüm katkı oranlarında artış gözlemlenmiştir. Bu artışlardaki artış oranı %15 ve %20 katkı oranlarında 56 günlük kür süreleri sonunda azalarak devam ettiği görülürken, %25 ve %30 katkı oranlarında ise 28 günlük kür süreleri sonunda azalarak devam ettiği gözlemlenmiştir.

Katkısız numunelerin basınç dayanımlarında kür süresine bağlı olarak bir değişim meydana gelmemiştir. Ancak katkılı numunelerde 7 günlük kür süresi sonunda dayanımda ani artışlar meydana gelerek 1 günlük kür süresine göre yaklaşık 5-7 kat daha büyük değerler elde edilmiştir. Bu dayanım artışı 28 günlük kür süresi sonuna kadar düzenli olarak devam etmiştir. Ancak 56 ve 112 günlük kür süreleri boyunca dayanım artış oranının azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.15 Kür sürelerine göre numunelerin basınç dayanımlarının çizgi grafiği.



Şekil 4.16 Kür sürelerine göre numunelerin basınç dayanımlarının sütun grafiği.

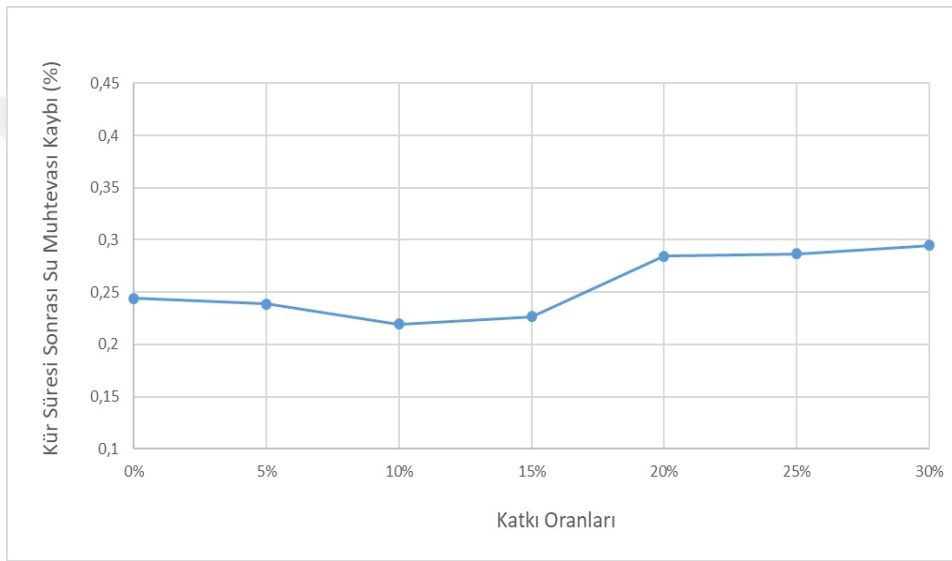
4.1.4 Numunelerde Kür Süresine Bağlı Su Muhtevsındaki Değişim

Dayanımın kür süresine bağlı değişimini görmek amacıyla kür uygulanan numunelerde su muhtevasının değişmemesi önemlidir. Çünkü karışımlardaki katkı malzemeleri reaksiyonu sürdürebilmeleir için suya ihtiyacı vardır. Bu nedenle su kaybının oluşmaması için numunler 2-3 kat streç filme sarılarak desikatörlerde saklanmışlardır. Kür süreleri sonunda ise streç açılarak deneye tabi tutulmuşlardır. Kür süresi boyunca muhtemel su kaybını ölçmek amacıyla numuneler kür süresi başında (numune hazırlama işlemi tamamlanınca) ve kür süresi sonunda (dayanım deneyi için streç film açıldığında) ağırlıkları belirlenerek su muhtevası değişimleri belirlenmiştir. Numunelerin su muhtevalarındaki değişimler katkı oranına ve kür süresine bağlı olarak ortalama değerler olarak belirlenmiştir. Bu değişimler Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de gösterilmiştir.

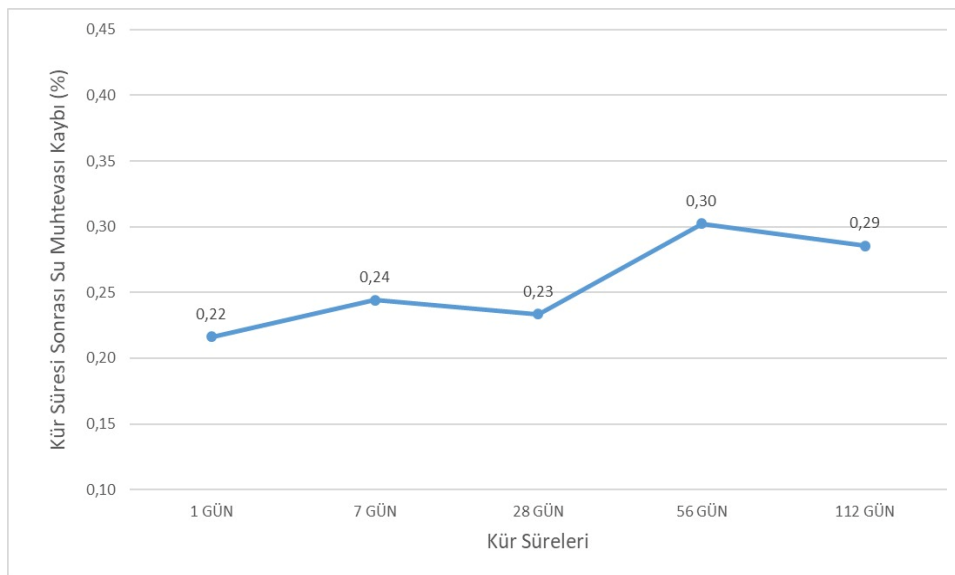
Şekil 4.17 incelendiğinde katkı oranlarına göre % 0,22 - % 0,29 arasında su muhtevalarında azalmalar olduğu görülmüştür. Kayıplar % 1’in altında ve birbirine yakın sayılabilecek değerleri içeren bir aralıkta kalmıştır. Diğer taraftan Şekil 4.18’de ise kür sürelerine göre su muhtevası kayıpları değerlendirildiğinde % 0,22 - % 0,30 aralığında değişim elde edilmiştir. Bu sonuçlar bize kür şartlarının iyi hazırlandığını ve dayanım artışını meydana getirecek reaksiyon için su muhtevasının korunduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.6 Su muhtevası kayıpları.

NUMUNE ADI	Su Muhtevası Kaybı (%)					
	1 GÜN	7 GÜN	28 GÜN	56 GÜN	112 GÜN	ORT
Doğal Zemin	0,22	0,21	0,2	0,25	0,31	0,24
Doğal Zemin + %5 MC	0,17	0,21	0,21	0,3	0,29	0,24
Doğal Zemin + %10 MC	0,19	0,15	0,18	0,33	0,23	0,22
Doğal Zemin + %15 MC	0,19	0,23	0,19	0,29	0,24	0,23
Doğal Zemin + %20 MC	0,18	0,26	0,27	0,35	0,36	0,28
Doğal Zemin + %25 MC	0,18	0,32	0,26	0,33	0,35	0,29
Doğal Zemin + %30 MC	0,38	0,27	0,27	0,27	0,24	0,29
ORTALAMA SU KAYBI	0,22	0,24	0,23	0,3	0,29	



Şekil 4.17 Katkı oranlarına göre su muhtevası kaybı.



Şekil 4.18 Kür sürelerine göre su muhtevası kaybı.

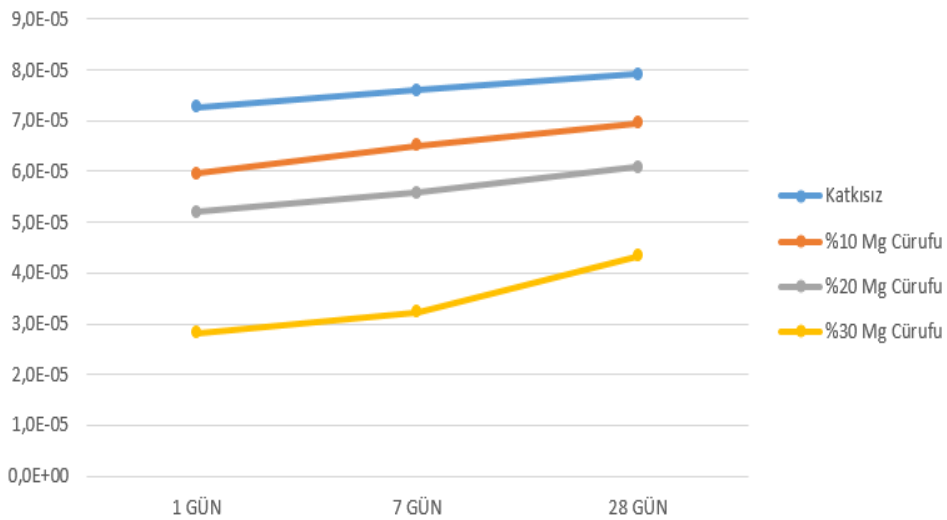
4.1.5 Permeabilite Deneyi Sonuçları

Magnezyum cürufu katkısının ve kür süresinin zeminin geçirimliliğine etkisini incelemek için permeabilite deneyleri yapılmıştır. %10, %20, %30 oranlarında magnezyum cürufu katkısı kullanılarak hazırlanan numunelere 1, 7, 28 günlük kür süreleri uygulanmış ve kür süreleri sonunda ise deneyler yapılmıştır. Permeabilite deney sonuçları Çizelge 4.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7 Permeabilite deney sonuçları.

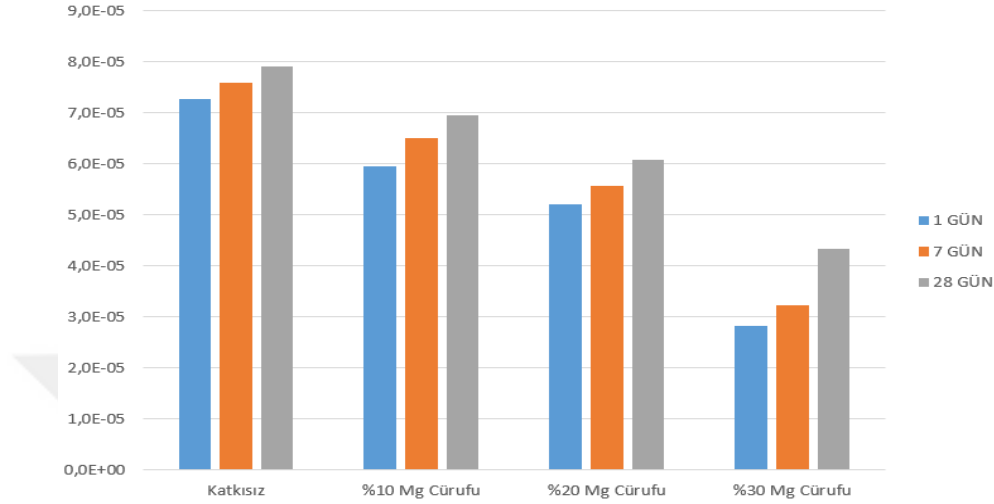
NUMUNE ADI	Geçirimlilik katsayısı k (cm/sn)		
	1 GÜN	7 GÜN	28 GÜN
Katkısız	7,30E-05	7,60E-05	7,90E-05
%10 Mg Cürufu	6,00E-05	6,50E-05	6,90E-05
%20 Mg Cürufu	5,20E-05	5,60E-05	6,10E-05
%30 Mg Cürufu	2,80E-05	3,20E-05	4,30E-05

Şekil 4.19 incelendiğinde, katkı oranları arttıkça numunelerin geçirimlilik katsayısı az da olsa azalmaktadır. Dolayısıyla iri daneli zemine ilave edilen magnezyum cürufu daha ince daneli yapıda olduğu için zeminin boşluklarını doldurmaktadır. Aynı katkı oranlarına sahip numunelerde kür sürelerinin artışına bağlı olarak geçirimlilikte çok az bir artış olmuştur.



Şekil 4.19 Kür sürelerine göre permeabilite deney sonuçları çizgi grafiği.

Şekil 4.20 grafiğinde katkı maddeleri ve kür sürelerine bağlı olarak geçirimsizlik katsayılarındaki değişim toplu olarak görülmektedir. Katkı miktarı artışıyla permeabilite katsayısı azalırken, kür süresi artışlarında katsayıda çok az artışlar görülmektedir.



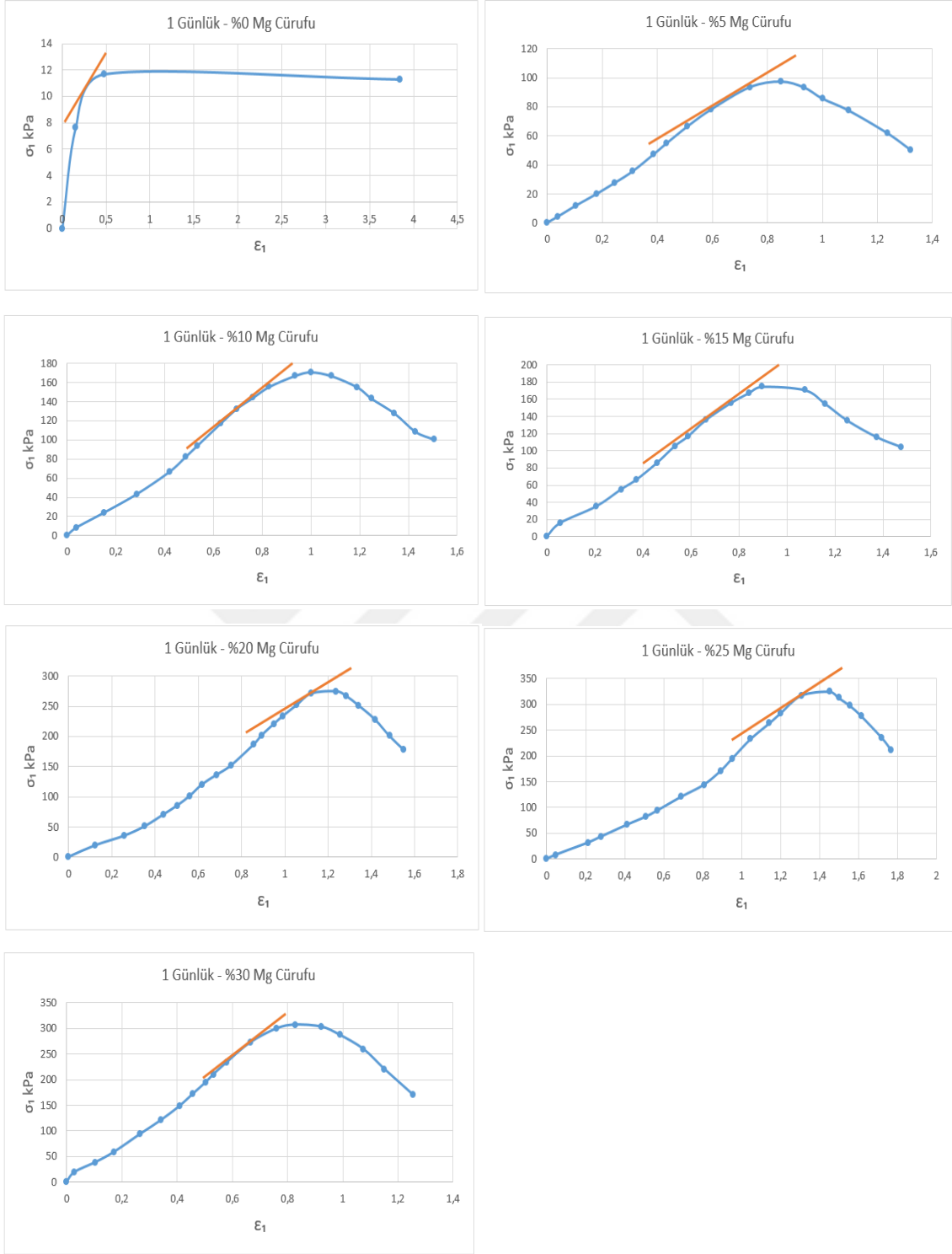
Şekil 4.20 Kür sürelerine göre permeabilite deney sonuçları sütun grafiği.

4.1.6 Eksenel Basınc Deneyine Göre Elastisite Modülü Bulunması

Tüm numunelerin tek eksenli dayanım deney sonuçlarından elde edilen elastisite modül değerleri Çizelge 4.8’de gösterilmiştir. Gerilme-birim deformasyon grafiklerinden elastisite modülleri hesaplanmıştır. Bu hesaplara ait bazı grafikler Şekil 4.21’de gösterilmiştir. Magnezyum cürufu arttığında elastisite modülünün arttığı gözlemlenmiştir. Bu da bize iri daneli zeminin, katılan ve daha ince olan magnezyum cürufu ile beraber daha rijit hale geldiğini göstermektedir. Aynı durum kür süreleri baz alarak incelendiğinde görülmektedir. Tüm numunelere ait gerilme-birim deformasyon grafikleri EK2’de verilmiştir.

Çizelge 4.8 Karışımlara ait Elastisite Modülü Değerleri .

NUMUNE ADI	Elastisite Modülü E (kPa)				
	1 GÜN	7 GÜN	28 GÜN	56 GÜN	112 GÜN
Doğal Zemin	11,43	44,44	37,04	40,00	14,29
Doğal Zemin + %5 Mg Cürufu	115,38	333,33	425,53	576,92	1250,00
Doğal Zemin + %10 Mg Cürufu	207,14	950,00	869,57	937,50	1775,00
Doğal Zemin + %15 Mg Cürufu	217,39	1904,76	2222,22	2314,81	3000,00
Doğal Zemin + %20 Mg Cürufu	222,22	2400,00	2500,00	3571,43	3625,00
Doğal Zemin + %25 Mg Cürufu	250,00	2500,00	3625,00	3586,96	3846,15
Doğal Zemin + %30 Mg Cürufu	446,43	3333,33	3750,00	3780,49	3974,36



Şekil 4.21 Elastisite modülünün hesaplanmasında bazı grafikler.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Kullanılan iri daneli (kötü derecelenmiş kum) zeminin magnezyum cürufu katkı ilavesi ile iyileştirilmesinin sonuçları aşağıda sıralanmıştır.

Kompaksiyon deneyi sonuçlarına göre maksimum kuru birim hacim ağırlık katkısız numunede 2,13 g/cm³, optimum su muhtevası %7,9 olurken zeminin içine magnezyum cürufu oranı girdiğinde bu değerler yükselmiştir. %5, %10, %15 katkı oranında maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası artarken %20, %25, %30 katkı oranlarında maksimum birim hacimde düşüş olmasına rağmen optimum su muhtevası artmıştır. Zemine katılan ince dane oranı arttıkça zeminin optimum su muhteveları sürekli artış göstermiştir.

Tek eksenli basınç deneyinde numunelerin basınç dayanımı katkısız da çok az iken, %5 katkı eklendiğinde dahi 6-7 kat birden basınç dayanımlarında artış meydana gelmiştir. Bu artış her katkı oranında meydana gelmiştir. Katkı oranlarına göre en yüksek basınç dayanımı %30 değerlerinde ulaşılmıştır. Fakat genellikle %25 katkı oranından sonraki artış çok az olmakla beraber %30'dan sonraki katkılarda basınç dayanımının kontrol edilmesi gerektiği, artışın yine çok az olabileceğini veya düşebileceği tahmin edilmektedir. Bazı dış kaynaklar %30 ve %40 aralıklarında basınç dayanımlarında düşüş olduğunu bildirmektedir. Bununla beraber zemin iyileştirmede kullanılabilecek magnezyum cürufunun en iyi dayanım verdiği değer %15 olarak tespit edilmiştir.

Tek eksenli basınç deneylerinden hareketle kür oranlarına göre basınç dayanımlarını kıyaslırsak 1 günlük dayanımlardan 7 günlük dayanımlara geçildiğinde ani bir artış yine yaklaşık 6-7 kat oranında meydana gelmektedir. Tüm kür süreleri sonunda basınç dayanımındaki artış devam etmiştir. En yüksek dayanımların 112 günlük kür süresi sonunda meydana geldiği görülmüştür. %25, %30 katkı oranlarında 28 günden sonra basınç dayanımlarında çok büyük artış gözlenmemiştir. %25, %30 katkı oranlarında 28 günden sonra basınç dayanımlarında çok büyük artış gözlenmemiştir. Yani 28 günlük dayanımları bize genel dayanımlarının yaklaşık %90 civarını tamamladığını göstermiştir. Bu oran 28 günlük beton dayanım oranına ile kıyaslanırsa, %30 katkılı numune 28 günlük kür süresi sonunda yaklaşık 3,1 MPa değerlerine ulaşmaktadır. Bu da C16 beton sınıfının

dayanımının %20'sine tekabül etmektedir. Uygun agrega seçimleri ve deneyler yardımıyla bu değerler arttırılabilir. Farklı deneyler uygulanarak betonun içerisindeki çimentonun yapıtaşı olan klinker gibi kullanılma durumu olabileceği tahmin edilmektedir. Yüksek taşıma gücü isteyen beton işleri haricinde kullanılabileceği tahmin edilmektedir.

Cüruf katkılarına göre su muhtevası kayıpları incelendiğinde %0,22-%0,29 arasında değiştiğini ve birbirine yakın olduğunu göstermektedir. Kür sürelerine göre su muhtevası kayıplarına bakıldığında ise değerlerin %0,22-%0,30 arasında değiştiği ve çok az miktarda su kaybı olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek kayıp değerleri 56 ve 112 günlerde olup %0,3 değerlerindedir. Bu sonuç numunelerin kür sürelerinde uygun muhafaza edildiğini ve deney sonuçlarına olumlu yansıdığını göstermiştir.

Geçirimsizlik deney sonuçlarına göre kür sürelerine göre kıyas yapıldığında kür süreleri arttıkça geçirimsizliğin az da olsa %6 seviyelerinde arttığı görülmektedir. Katkı oranlarına göre kıyaslandığında ise katkı oranı arttığında geçirimsizliğin azaldığı görülmektedir. %20 katkı seviyesine kadar yaklaşık %10-15 oranlarında geçirimsizlik azalmıştır. En az geçirimsizlik %30 katkı değerlerinde elde edilmiştir. Yaklaşık %40 daha az geçirimsizlik elde edilmiştir. Bu sonuç zemin içindeki ince dane oranı arttığında geçirimsizliğin azaldığını göstermektedir.

Tek eksenli basınç deneylerine göre çizilen grafiklerden elastisite modülü incelendiğinde, zemine ilave edilen magnezyum cürufu arttıkça elastisite modülünün de arttığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç iri daneli zemine katılan ve çok küçük tane yapısına sahip olan magnezyumun, zemini daha rijit hale getirdiğini göstermektedir.

Genel olarak deney sonuçlarına göre kullanılan katkı arttıkça basınç dayanımı artmaktadır ve geçirimsizliği azalmaktadır. Dolayısıyla magnezyum cürufunun kullanımı zemin iyileştirmesinde olumlu sonuçlar vermektedir. Magnezyum cürufunun beton dayanımına katkısı için araştırmalar yapılabilir. Bu araştırmalara yatkın sonuçlar elde edilmiştir. Atık malzeme kullanılarak hem ekonomiye katkı sağlanacaktır hem de çevreye verdiği zararlar azaltılacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Akyol M, 2022, Atık Kemik Tozu İle Zemin İyileştirme, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 102s, Adana.
- Alataş T, 1996, Afşin – Elbistan Termik Santralı Uçucu Külünün Yol Stabilizasyonunda Çeşitli Malzemelerle Birlikte Kullanımı Üzerine Bir Araştırma, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 147s, Elazığ.
- Alkaya D, 2002, Uçucu Kül Katkısının Dolgu Zeminlerin Stabilesine Etkisi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 224s, Denizli.
- Amini O, Ghasemi M, 2019, Laboratory Study Of The Effects Of Using Magnesium Slag On The Geotechnical Properties Of Cement Stabilized Soil , Construction and Building Materials, 223, 409–420.
- Arruebarrena G, Hurtado I, Väinölä J, Cingi C, Dévényi S, Townsend J, Mahmood S, Wendt A, Weiss K ve Ben-Dov A, 2007, Development Of Investment Casting Process Of Mg-Alloys For Aerospace Applications, Advanced Engineering Materials, 9 (9), 751–756.
- ASTM D422, 2000, Standard Test Method For Particle-Size Analysis of Soils. ASTM International, 8p. USA.
- Aytekin M, 2004, Deneysel Zemin Mekaniği, Teknik Yayınevi, 624s, Ankara.
- Bayrak Y, 2019, Dolomitten Magnezyum Üretiminde Proses Parametrelerinin Araştırılması Ve Termodinamik Modellenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 146s, İstanbul.
- Cole G S, and Sherman A M, 1995, Light Weight Materials For Automotive Applications, Materials Characterization, 34 (1), 3–9.
- Çetin Y, A, 2011, Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Alternatif Malzemeler İle Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 143s, İstanbul.

- Demirdal S, 2021, Düşük Maliyetli Magnezyum Matrisli Katı Atık Takviyeli Kompozitlerin Üretilmesi Ve Karakterizasyonu, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 88s, Karabük.
- Demiröz A, 2009, Zemin İyileştirme Metotları, Selçuk Teknik Dergisi, 3(8), 176–192.
- Deng J, Wang X, Guo Y, 2014, Research on the Hydration Mechanism of Portland Cement with Magnesium Slag, Appl. Mech. Water. 576, 57–62.
- Diallo M L, 2019, Atık Malzeme Kullanımı İle Kil Zeminlerin Stabilizasyonu, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 99s, Bursa.
- Dilek İ, 2022, Magnezyum Cürufunun Çimento Ve Beton Katkısı Olarak Kullanımı, Beton İstanbul 2017 Hazır Beton Kongresi, 73–77.
- Dongxua L, Jinlina S, Yiminb C, Linc C, Xuequanc W, 2000, Study Of Properties On Fly Ash-Slag , Cement Concr. Res. 30(9), 1381–1387.
- Gökalp İ, Uz V E, Saltan M, Tutumluer E, 2018, Technical And Environmental Evaluation Of Metalurgical Slags As Aggregate For Sustainable Pavement Layer Applications, Transportation Geotechnics, 14, 61–69.
- Gupta M, Sharon N M L, 2011, Magnesium, Magnesium Alloys And Magnesium Composites, John Wiley & Sons Inc., 4–11, 13–36.
- Gücek S, 2011, Mermer Tozu ve Uçucu Külün Kil Zeminlerin İyileştirilmesinde Kullanımı, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 101s, Afyonkarahisar.
- Kainer K U, 2003, GL Darmstadt , Magnesium-Alloys And Technologies, Wiley–Vch, 2–12.
- Oliveira, Carlos A S, Gumieri G, Gomes M, Vasconcelos L, 1997, Characterization of Magnesium Slag Aiming the Utilization as a Mineral Admixture in Mortar, Federal University of Minas Gerais (UFMG), 7, 919–924, Brazil.
- Önalp A, 2002, Geoteknik Bilgisi I, Birsen Yayınevi, 379s, İstanbul.

- Özaydın K, 1989, Zemin Mekaniği, Birsen Yayınevi, 261s, İstanbul.
- Özaydın K, 2012, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Ondördüncü Ulusal Kongresi Sunumu, Yıldız Teknik Üniversitesi. 4–5 Ekim, İstanbul.
- Öztürk F, Kaçar İ, 2016, Magnezyum Alaşımları ve Kullanım Alanlarının İncelenmesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 1(2), 12–20.
- Selçukhan O, Ekinci A, 2021, Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Yaygın Kullanımına Bağlı Değerlendirilmesi, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 23, 481–496.
- TS 1900-1, 2006, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuar Deneyleri, Türk Standartları Enstitüsü, 99s, Ankara.
- TS 1900-2, 2006, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuar Deneyleri, Türk Standartları Enstitüsü, 68s, Ankara.
- Uzuner B A, 2000, Temel Mühendisliğine Giriş, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Derya Kitabevi, 143s, Trabzon.
- Ünlü Şahan M, 2016, Yapım İşlerinde Zemin İyileştirme Yöntemleri, İller Bankası A.Ş. Uzmanlık Tezi, 84s, Ankara.
- Tunç A, 2001, Yol Malzemeleri ve Uygulamaları. Atlas Yayın Dağıtım, 840s, İstanbul.
- Tunç A, 2002, Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları. Atlas Yayın Dağıtım, 912s, İstanbul.
- Türe Y, 2022, Magnezyum ve Magnezyum Alaşımlarında İş Fonksiyonu İstif Hata Enerjisi İlişkisi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Doktora Tezi, 111s, Eskişehir.
- Yang X, Dong F, Zhang X, Li C, Gao Q, 2022, Review On Comprehensive Utilization Of Magnesium Slag And Development Prospect Of Preparing Backfilling Materials, Minerals 12, 1415, 19p.

Yıldız R, Erdoğan N, 1995, Manyezit ve Bazik Refrakter Malzeme Teknolojisi, Lale Ofset, 151s, Kütahya.

Yılmaz F, 2015, Tüfit Taşların Zemin Stabilizasyonunda Kireçle Birlikte Kullanılabilirliğinin Standart Deneyler ve Bilgisayarlı Tomografi Tekniği ile Araştırılması, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 201s, Trabzon.

Yılmaz A, Kuşçu M, 2012, Manyezit Yataklarının Oluşumu, Sınıflandırılması, Kullanım Alanları Ve Kalite Sınıflandırılması, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 28(1), 65–72, Kayseri.

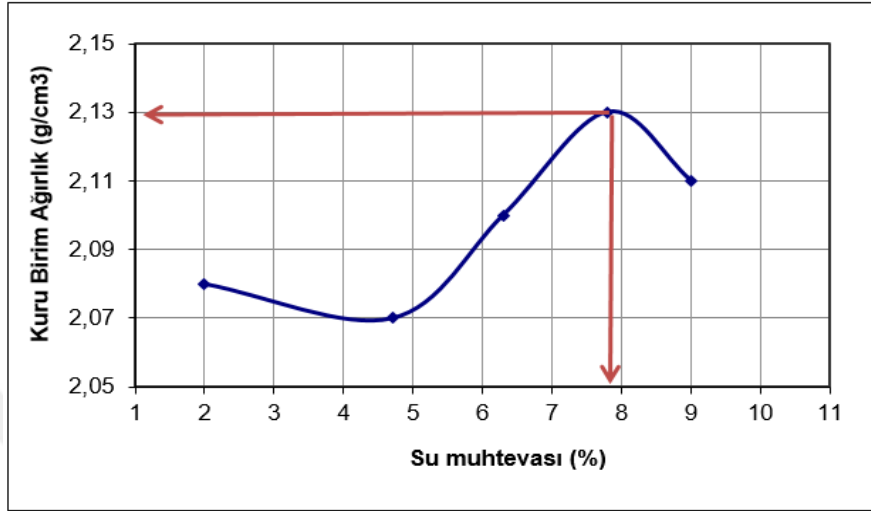
Zorluer İ, Usta M, 2003, Zeminlerin Atık Mermer Tozu İle İyileştirilmesi, Türkiye IV Mermer Sempozyumu (Mersem '2003), Bildiriler Kitabı, 18–19 Aralık, Afyon.

İnternet Kaynakları

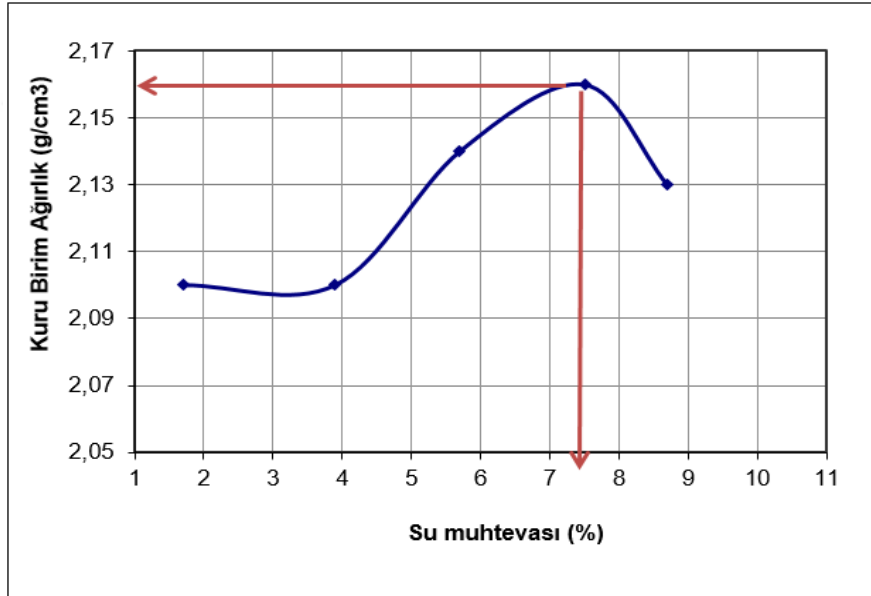
1. <https://insapedia.com/zemin-sikistirma-makineleri-silindirler-kompaktorler-kompaksiyon-makineleri/>, 11.01.2023
2. <http://www.balkayazemin.com/zemin-iyilestirme-yontemleri-zemin-guclendirme-cesitleri-nelerdir/>, 11.01.2023
3. <https://www.insaatdunyasi.com.tr/bolumler/makale/save-wick-drain-pvd-uygulamalari-ile-hizli-zemin-konsolidasyonu/>, 11.01.2023
4. <https://www.barankaya.com/tr/barankaya-kirec/>, 11.01.2023
5. <https://www.toremzemin.com/zemin-iyilestirme-yontemleri-zemin-guclendirme-cesitleri-nelerdir/>, 11.01.2023
6. <https://www.sanalsantiye.com/kompaksiyon-nedir/>, 11.01.2023
7. <https://soilteknik.com/index.php/services/enjeksiyon-uygulamalari/>, 11.01.2023
8. <https://www.ozkanlarmakina.com.tr/zemin-iyilestirme/vibro-kompaksiyon/>, 11.01.2023
9. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/manyezit>, 11.01.2023
10. <https://imb.cu.edu.tr/storage/Ders%20Notlar%C4%B1%20ve%20Yararlı%C4%B1%20D%C3%B6k%C3%BCmanlar/Zemin%20%C4%B0yle%C5%9Firme%20Y%C3%B6ntemleri.pdf>, 11.01.2023
11. <https://www.makaleler.com/manyezit-nedir-nerelerde-kullanilir/>, 11.01.2023

EKLER

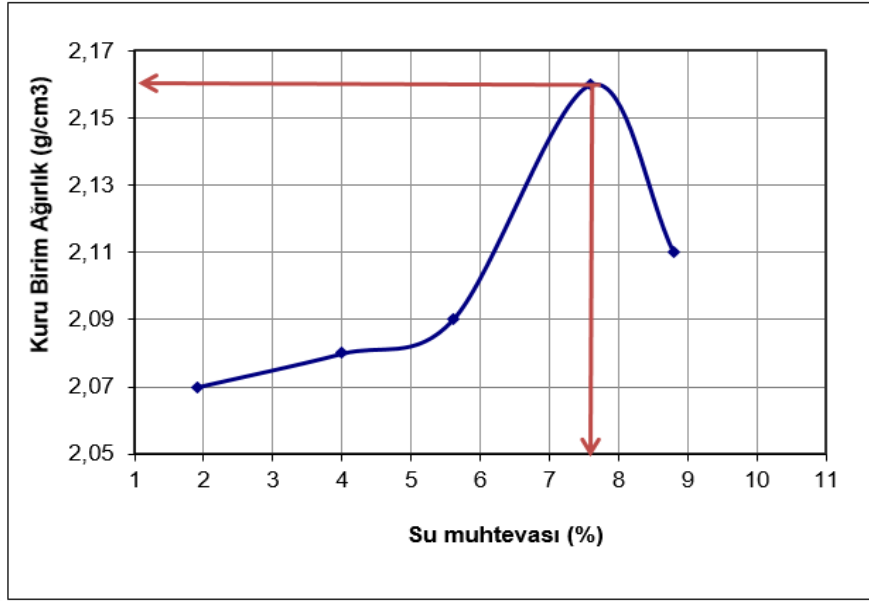
EK 1. Kompaksiyon değerlerinin belirlenmesi.



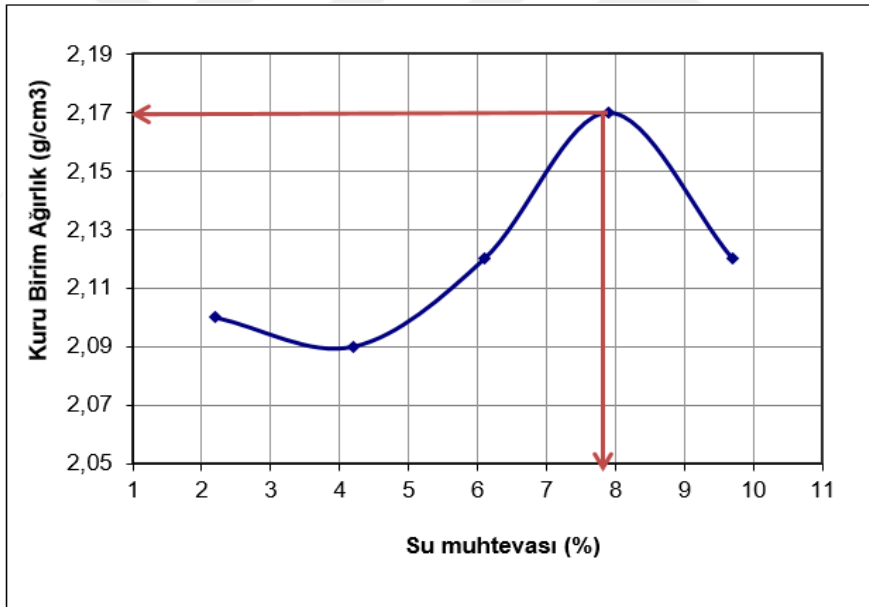
Şekil EK1.1 katkısız numunenin kompaksiyon değerleri .



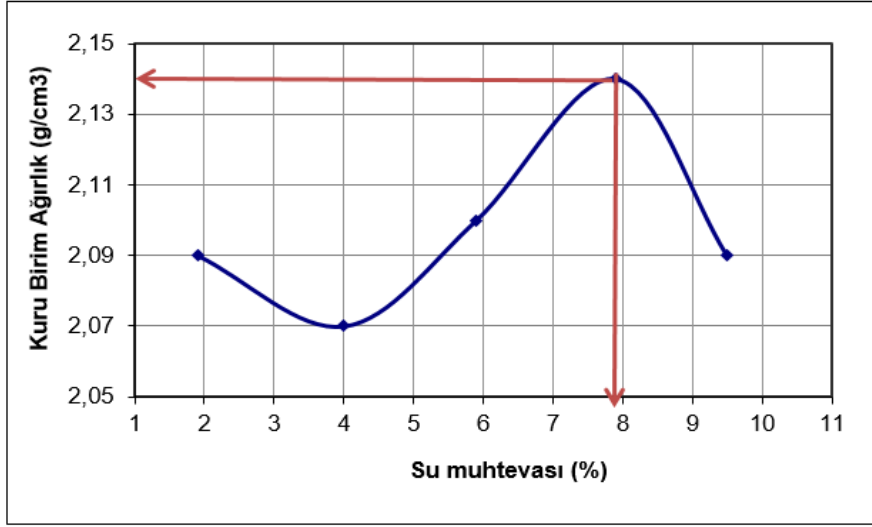
Şekil EK1.2 %5 katkılı numunenin kompaksiyon değerleri.



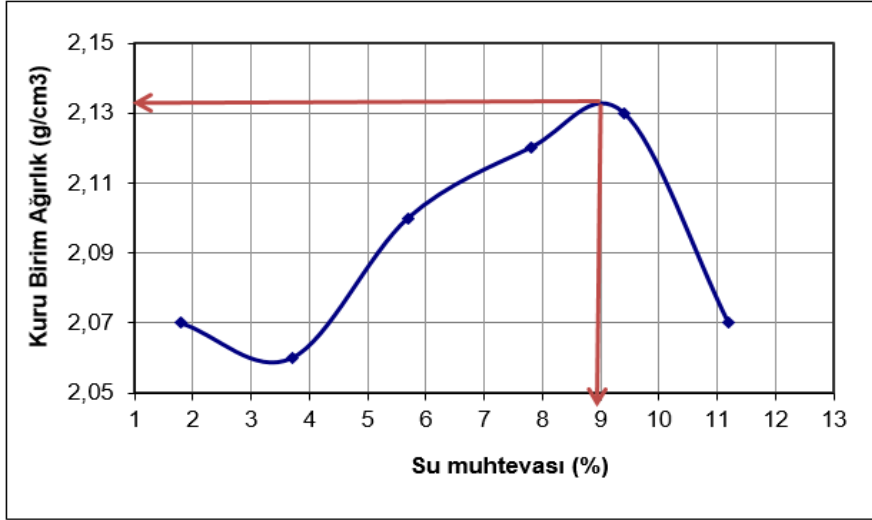
Şekil EK1.3 %10 katkılı numunenin kompaksiyon değerleri.



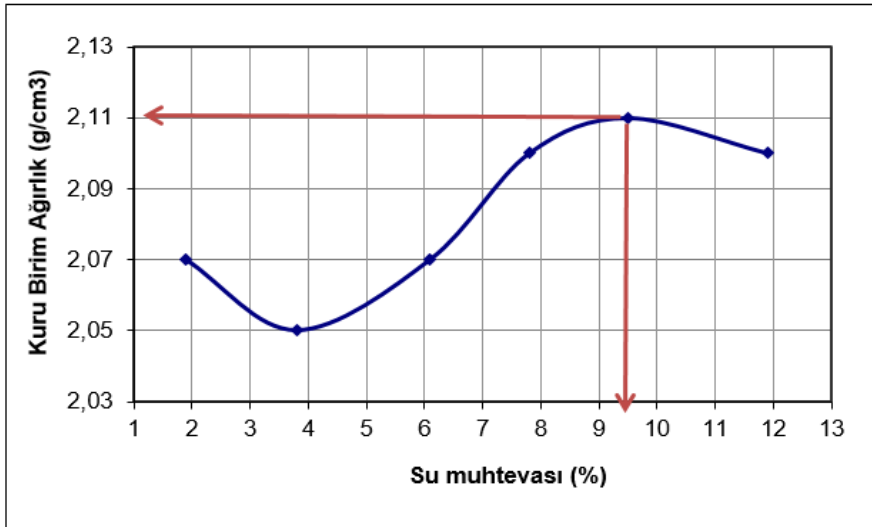
Şekil EK1.4 %15 katkılı numunenin kompaksiyon değerleri.



Şekil EK1.5 %20 katkılı numunenin kompaksiyon değerleri.

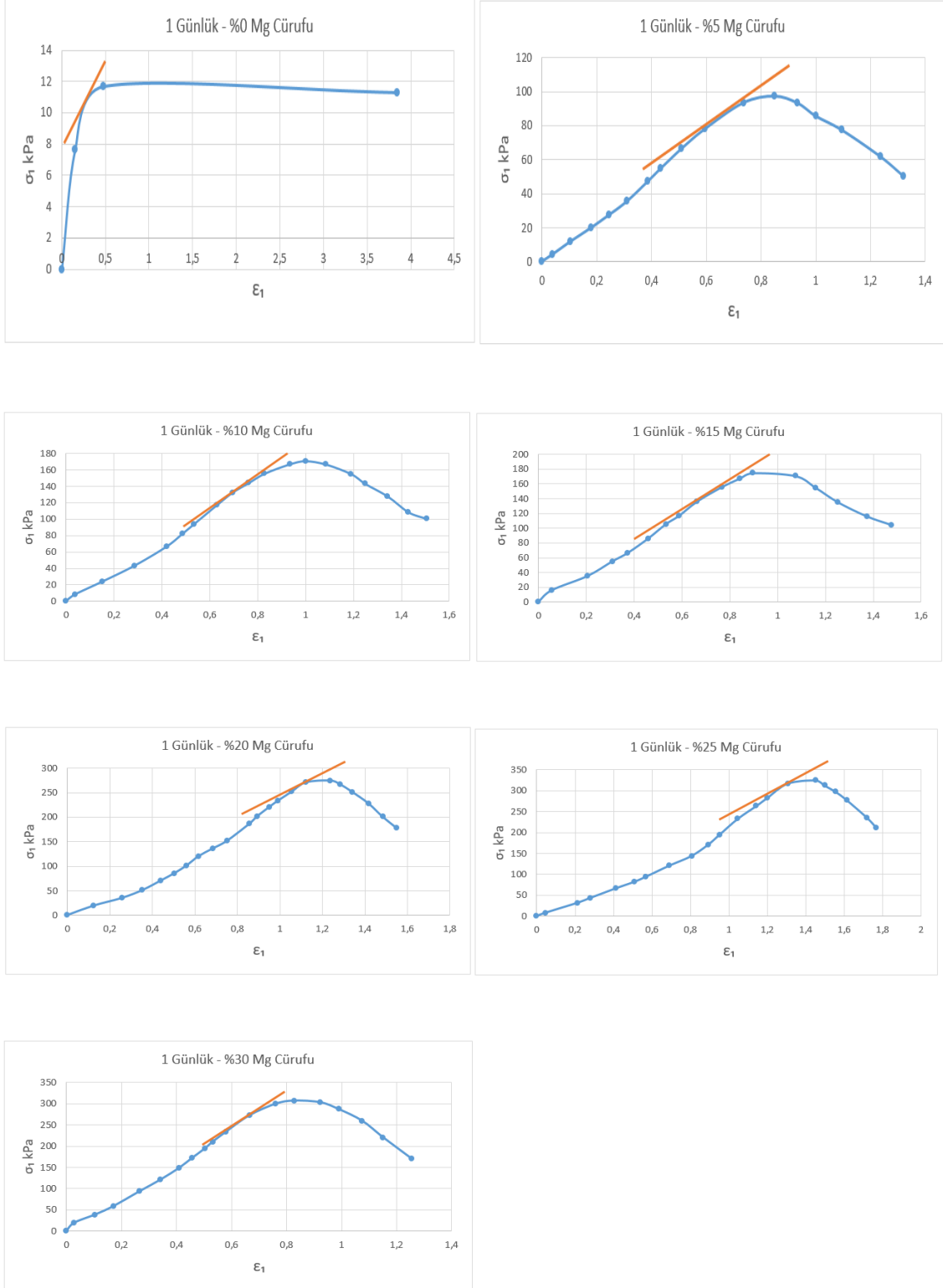


Şekil EK1.6 %25 katkılı numunenin kompaksiyon değerleri.

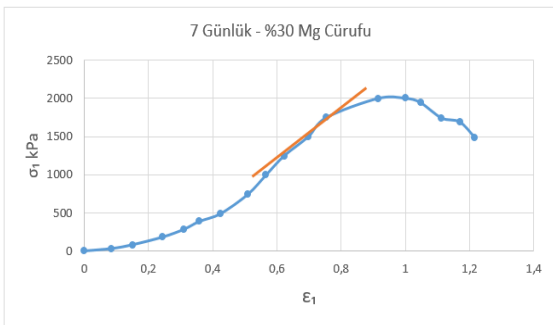
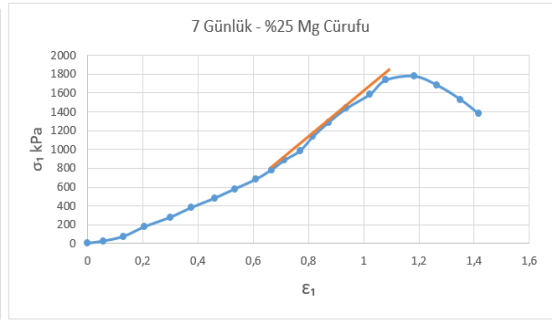
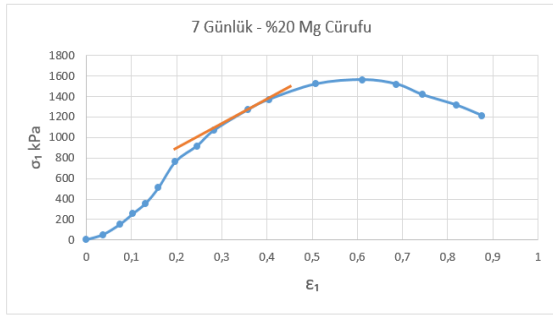
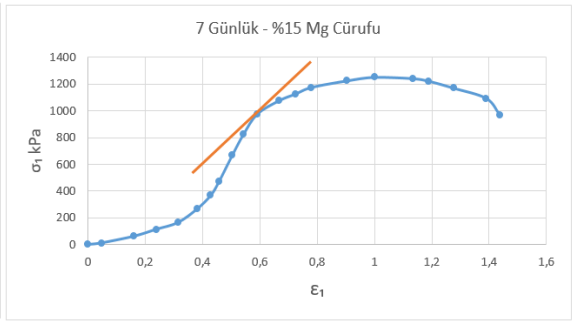
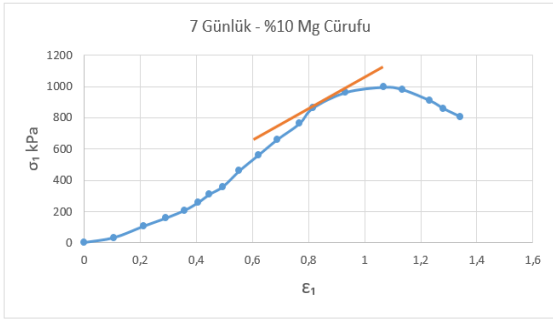
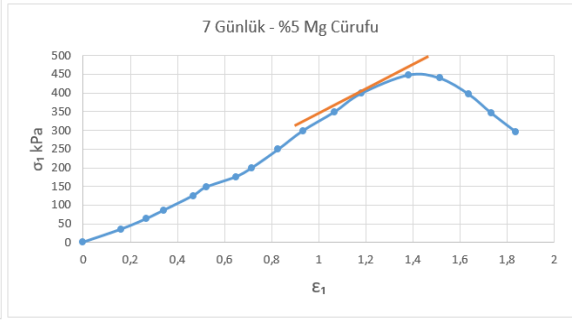
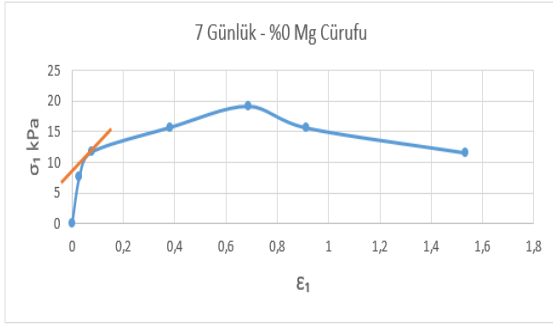


Şekil EK1.7 %30 katkılı numunenin kompaksiyon değerleri.

EK 2. Elastisite Modüllerinin Belirlenmesi .



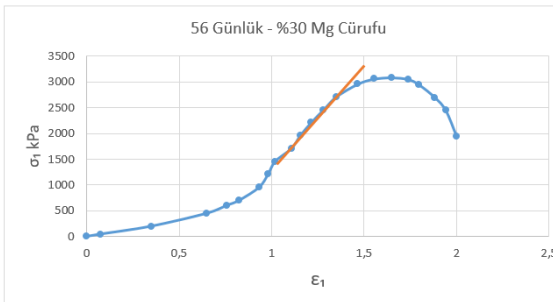
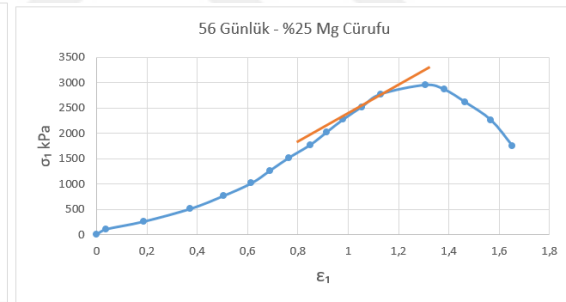
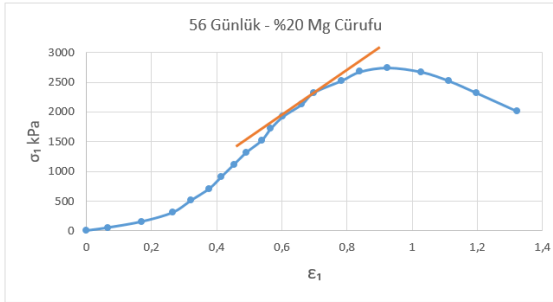
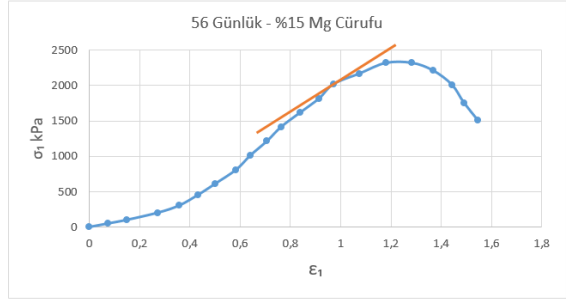
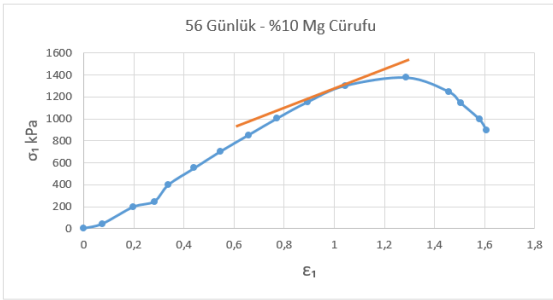
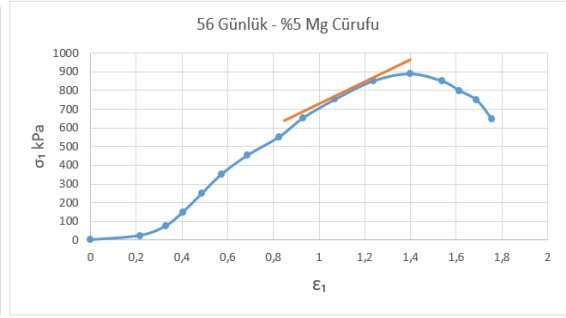
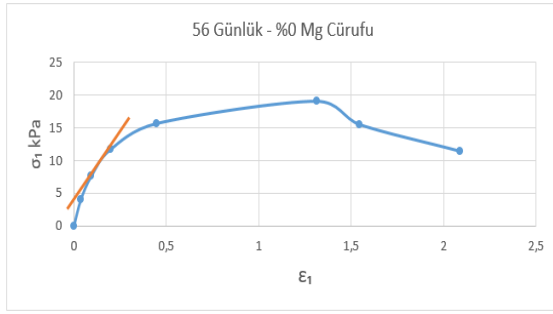
Şekil EK2.1 1 günlük numunelerin elastisite modüllerinin belirlenmesi .



Şekil EK2.2 7 günlük numunelerin elastisite modüllerinin belirlenmesi.



Şekil EK2.3 28 günlük numunelerin elastisite modüllerinin belirlenmesi.



Şekil EK2.4 56 günlük numunelerin elastisite modüllerinin belirlenmesi.



Şekil EK2.5 112 günlük numunelerin elastisite modüllerinin belirlenmesi.