

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DİATOMİTİN ZEMİN STABİLİZASYONUNDA
KİREÇLE BİRLİKTE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Mesut TANDOĞAN

**TEMMUZ 2021
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİATOMİTİN ZEMİN STABİLİZASYONUNDA
KİREÇLE BİRLİKTE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

İnş. Müh. Mesut TANDOĞAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 / 06 / 2021

Tezin Savunma Tarihi : 14 / 07 / 2021

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Sabriye Banu İKİZLER

Trabzon 2021

ÖNSÖZ

Diatomitin zemin stabilizasyonunda kireçle birlikte kullanılabilirliğinin araştırıldığı bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca benden ilgisini, tecrübesini ve desteğini esirgemeyen çok değerli hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. Sabriye Banu İKİZLER'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda yürütmüş olduğum deneyler için bana laboratuvar olanağı sağlayan Devlet Su İşleri 22. Bölge Müdürü Dr. Emre AKÇALI'ya ve Kalite Kontrol ve Laboratuvar Şube Müdürü Muzaffer TANDOĞAN'a teşekkür etmek isterim.

Laboratuvar çalışmalarımı yürütmemde bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen İnş. Müh. Fatih ÇOBAN'a ve Met. ve Malz. Yük. Müh. Ümit KARTAL'a, ayrıca laborant Hasan HALİTOĞLU'na, Mustafa Celal KERİMOĞLU'na, Uğur VAHAPOĞLU'na ve emeği geçen herkese teşekkür ederim.

Mesut TANDOĞAN

Trabzon 2021

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Diatomitin Zemin Stabilizasyonunda Kireçle Birlikte Kullanılabilirliğinin Araştırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Sabriye Banu İKİZLER’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma süresince bilimsel çalışma ve etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 14/07/2021

Mesut TANDOĞAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XVII
SEMBOLLER DİZİNİ	XVII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	3
1.3. Zemin Stabilizasyon Teknikleri.....	3
1.3.1. Mekanik Stabilizasyon.....	9
1.3.2. Kimyasal Stabilizasyon	11
1.3.2.1. Çimento ile Stabilizasyon	15
1.3.2.2. Bitüm ile Stabilizasyon.....	17
1.3.2.3. Kireç ile Stabilizasyon	18
1.3.2.4. Puzolanlar ile Stabilizasyonu.....	21
1.3.2.4.1. Doğal Puzolanlar	23
1.3.2.4.2. Yapay Puzolanlar.....	24
1.4. Kil Mineralleri ve Kireç ile Reaksiyonu.....	28
1.4.1. Katyon Değişirme.....	31
1.4.2. Kil ile Kireç Reaksiyonu	32
1.5. Diatomit	35
1.5.1. Diatomitin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	36
1.5.2. Diatomitin İşlenmesi ve Kullanıma Uygun Hale Getirilmesi.....	38
1.5.3. Diatomitin Kullanım Alanları.....	39
1.5.4. Dünyada Diatomit Rezervleri	41
1.5.5. Türkiye’de Diatomit Rezervleri.....	42
1.6. Literatür Özeti.....	44
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME	53

2.1.	Deney Şeması	54
2.2.	Yapılan Deneylerde Referans Alınan Standartlar.....	55
2.3.	Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler	56
2.3.1.	Doğal Zemin	56
2.3.1.1.	Doğal Zeminin Mineralojisi	57
2.3.1.2.	Doğal Zeminin Özgül Ağırlığı.....	58
2.3.1.3.	Doğal Zeminin Granülometrisi.....	59
2.3.1.4.	Doğal Zeminin Kıvam Limitleri.....	62
2.3.1.5.	Doğal Zeminin Sınıflandırılması ve Aktivitesi.....	64
2.3.1.6.	Doğal Zeminin Kompaksiyon Parametreleri	64
2.3.1.7.	Doğal Zeminin Serbest Basınç Mukavemetinin Belirlenmesi.....	66
2.3.1.8.	Doğal Zeminin Organik Madde Miktarı.....	67
2.3.1.9.	Doğal Zeminin Kimyasal Analizi.....	67
2.3.2.	Diatomit	68
2.3.2.1.	Diatomitin Mineralojisi	69
2.3.2.2.	Diatomitin İnceliği.....	70
2.3.2.3.	Diatomitin Özgül Ağırlığı ve Gevşek Ağırlığı	72
2.3.2.4.	Diatomitin Kimyasal Analizi.....	72
2.3.3.	Kireç	73
2.4.	Zemin Karışımları ile Yapılan Deneysel Çalışmalar.....	73
2.4.1.	Optimum Kireç Oranının Belirlenmesi	73
2.4.2.	Zemin Karışımlarının Hazırlanması ve İsimlendirilmesi	76
2.4.3.	Zemin Karışımlarının Kıvam Limitlerinin Belirlenmesi.....	76
2.4.4.	Zemin Karışımlarının Kompaksiyon Parametrelerinin Belirlenmesi	79
2.4.5.	Zemin Karışımlarının Serbest Basınç Mukavemetlerinin Belirlenmesi.....	81
2.4.5.1.	Numunelerin Hazırlanması.....	81
2.4.5.2.	Kür İşlemi ve Donma-Çözülme Çevrimi.....	83
2.4.5.3.	Serbest Basınç Deneyi	84
2.4.5.3.1.	1 Günlük Kür Süresi Sonrası Serbest Basınç Mukavemeti	87
2.4.5.3.2.	7 Günlük Kür Süresi Sonrası Serbest Basınç Mukavemeti	89
2.4.5.3.3.	28 Günlük Kür Süresi Sonrası Serbest Basınç Mukavemeti	91
2.4.5.3.4.	Donma-Çözülme Çevrimi Sonrasında Serbest Basınç Mukavemeti	93
2.5.	Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntülemesi ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi Analizi.....	95
3.	SONUÇLAR.....	98
4.	ÖNERİLER.....	101

5.	KAYNAKÇA	103
6.	EKLER	110
ÖZGEÇMİŞ		



ÖZET

DIATOMİTİN ZEMİN STABİLİZASYONUNDA KİREÇLE BİRLİKTE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Mesut TANDOĞAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Sabriye Banu İKİZLER
2021, 109 Sayfa, 39 Sayfa Ek

Zeminler her zaman kullanım amacına uygun özellik gösterememektedir. Bu durumda, zemin özelliklerinin iyileştirilmesi için birçok yöntem başvurulmaktadır. Zemin türüne ve istenilen iyileştirme amacına göre farklılık gösteren bu yöntemlerden biri de doğal puzolanlar ile yapılan katkılı zemin stabilizasyonudur. Yüksek oranda SiO_2 içeriğinden dolayı doğal puzolan olarak değerlendirilen diatomitin, aktif CaO eksikliği nedeniyle, zeminde çimentolaşma reaksiyonlarının meydana gelebilmesi için kireç gibi birincil bağlayıcılarla birlikte kullanılması gerekmektedir.

Diatomitin zemin stabilizasyonunda kireçle birlikte kullanılabilirliğinin araştırılması için, %0, %5, %10 ve %20 oranında diatomit içeren karışımlara optimum oranda (%6) kireç ilavesiyle, kireçli ve kireçsiz olmak üzere hazırlanan 8 farklı karışım üzerinde yapılan çalışmalarda, diatomit ve kireç katkılarının, zeminin kıvam limitlerinde, kompaksiyon parametrelerinde, 1, 7, 28 günlük kür süreleri ve donma-çözülme çevrimi sonrasında serbest basınç mukavemetinde meydana getirdiği değişimler incelenmiştir.

Kireç ile birlikte kullanılan diatomitin, zemin mukavemetinde önemli ölçüde artış meydana getirdiği gözlemlenmiştir. 28 günlük kür süresi sonrası en yüksek mukavemete %5 diatomit içeren kireç katkılı karışımın ulaştığı belirlenmiştir. Kireçsiz karışımlarda ise diatomitin mukavemete belirgin bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır. Donma-çözülme çevrimi sonrası, diatomit-kireç-zemin karışımlarında, %5~%20 arasında mukavemet kayıpları meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Zemin Stabilizasyonu, Doğal Puzolan, Diatomit, Kireç

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF USABILITY OF DIATOMITE WITH LIME IN SOIL STABILIZATION

Mesut TANDOĞAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Sabriye Banu İKİZLER
2021, 109 Pages, 39 Pages Appendix

Soils do not always have the properties suitable for their intended use. In these cases, many methods are used to treat soil properties. One of these methods, which may differ according to the soil type and the desired treatment purpose, is the additive soil stabilization with natural pozzolans. Diatomite can be considered as a pozzolan because of its high SiO_2 content. However, due to the lack of active CaO content, it has little cementous ability. Therefore, in order for cementation reactions to occur, diatomite should be used together with primary binders such as lime.

In order to investigate the usability of diatomite together with lime in soil stabilization, in this study carried out on 8 different mixtures containing 0%, 5%, 10% and 20% diatomite with 6% slaked lime (the optimum lime content) or without lime, the changes caused by diatomite and lime additives in Atterberg limits, compaction parameters, after 1, 7, 28 days of curing and freeze-thaw cycle, unconfined compressive strength of the soil were investigated.

In the results of the tests, it was observed that the use of diatomite additive together with lime resulted in significant increases in unconfined compressive strength of the soil. It was determined that the lime-added soil mixture containing 5% diatomite reached the highest strength after 28 days of curing. As for lime-free soils, diatomite additive had no remarkable effects on strength. After the freeze-thaw cycle, 5%~20% strength losses were experienced in lime-added soil mixtures containing diatomite.

Key Words: Soil stabilization, Natural pozzolan, Diatomite, Lime

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1.	Stabilizasyon teknikleri 5
Şekil 1.2.	Zemin türlerine göre stabilizasyon yöntemlerinin belirlenmesi 6
Şekil 1.3.	Zemindeki ince malzemenin durumları 10
Şekil 1.4.	Zemin üçgen gradasyonu nomogramı 13
Şekil 1.5.	Puzolanların sınıflandırılması..... 23
Şekil 1.6.	Silis düzgündörtüzlüsü ve alüminyum düzgünaltıyüzlüsü 28
Şekil 1.7.	Kaolinit, montmorillonit, illit ve klorit kili mineralleri 30
Şekil 1.8.	Absorbe su sınırı ve çift tabaka 32
Şekil 1.9.	Kil tanelerinin birbirine yaklaşması 33
Şekil 1.10.	Yumak (a) ve disper (b) şekilde bulunan kil tanecikleri 33
Şekil 1.11.	Çimentolaşma mekanizması 35
Şekil 1.12.	Diatomit 36
Şekil 1.13.	Tipik bir diatomit üretim şeması 39
Şekil 1.14.	Türkiye diatomit yatakları haritası 43
Şekil 2.1.	Deney şeması 54
Şekil 2.2.	Kireç, doğal zemin ve diatomit 56
Şekil 2.3.	Doğal zemin numunesinin temin edildiği ocağın yer bulduru haritası 57
Şekil 2.4.	Doğal zeminin XRD analizi sonucu 58
Şekil 2.5.	Piknometre deneyi 59
Şekil 2.6.	Elek analizinde kullanılan elekler ve hidrometre deneyi..... 61
Şekil 2.7.	Doğal zemine ait tane boyutu dağılımı eğrisi 62
Şekil 2.8.	Koni düşürme ve plastik limit deneyi 63
Şekil 2.9.	Standart proktor deneyi 65
Şekil 2.10.	Serbest basınç deneyi..... 66
Şekil 2.11.	Yüksek sıcaklığa çıkabilen fırın 67
Şekil 2.12.	Ankara Kazan diatomiti 69
Şekil 2.13.	Diatomitin XRD analizi sonucu 70
Şekil 2.14.	Lazer kırınım cihazı 71

Şekil 2.15.	Diatomite ait tane boyutu dağılımı eğrisi	71
Şekil 2.16.	Su banyosu.....	74
Şekil 2.17.	pH metre	75
Şekil 2.18.	Optimum kireç oranı (12.4 pH değerine karşılık gelen kireç oranı)	75
Şekil 2.19.	Zemin karışımlarının likit limiti	78
Şekil 2.20.	Zemin karışımlarının plastik limiti	78
Şekil 2.21.	Zemin karışımlarının plastisite indisi	79
Şekil 2.22.	Zemin karışımlarının maksimum kuru birim hacim ağırlıkları	80
Şekil 2.23.	Zemin karışımlarının optimum su içerikleri.....	81
Şekil 2.24.	Hazırlanan numuneler.....	82
Şekil 2.25.	Silindirik numune hazırlama kalıbı	82
Şekil 2.26.	İklimlendirme ve nem dolapları	83
Şekil 2.27.	Serbest basınç deneyi.....	84
Şekil 2.28.	Zemin karışımlarının serbest basınç mukavemetleri	85
Şekil 2.29.	1 günlük kür süresi sonundaki zemin karışımlarına ait eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği	88
Şekil 2.30.	7 günlük kür süresi sonundaki zemin karışımlarına ait eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği	90
Şekil 2.31.	28 günlük kür süresi sonundaki zemin karışımlarına ait eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği	92
Şekil 2.32.	Donma-çözülme çevrimi sonundaki zemin karışımlarına ait eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği	94
Şekil 2.33.	Diatomitin SEM görüntüsü.....	95
Şekil 2.34.	Kireç katkısız zemin karışımlarının SEM görüntüleri.....	96
Şekil 2.35.	Kireç katkılı zemin karışımlarının SEM görüntüleri.....	97
Ek Şekil 1. 1.	Doğal zemine ait sıkışma çizgisi ile hava içeriği çizgileri	110
Ek Şekil 1. 2.	ZD5 zemin karışımına ait sıkışma çizgisi ile hava içeriği çizgileri	110
Ek Şekil 1. 3.	ZD10 zemin karışımına ait sıkışma çizgisi ile hava içeriği çizgileri	111
Ek Şekil 1. 4.	ZD20 zemin karışımına ait sıkışma çizgisi ile hava içeriği çizgileri	111
Ek Şekil 1. 5.	ZK zemin karışımına ait sıkışma çizgisi ile hava içeriği çizgileri	112
Ek Şekil 1. 6.	ZKD5 zemin karışımına ait sıkışma çizgisi ile hava içeriği çizgileri	112
Ek Şekil 1. 7.	ZKD10 zemin karışımına ait sıkışma çizgisi ile hava içeriği çizgileri.....	113
Ek Şekil 1. 8.	ZKD20 zemin karışımına ait sıkışma çizgisi ile hava içeriği çizgileri....	113

Ek Şekil 2. 1.	Doğal zemine ait numunelerin 1 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği	114
Ek Şekil 2. 2.	ZD5 zemin karışımına ait numunelerin 1 günlük kür sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği	114
Ek Şekil 2. 3.	ZD10 zemin karışımına ait numunelerin 1 günlük kür sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği	115
Ek Şekil 2. 4.	ZD20 zemin karışımına ait numunelerin 1 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği	115
Ek Şekil 2. 5.	ZK zemin karışımına ait numunelerin 1 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği	116
Ek Şekil 2. 6.	ZKD5 zemin karışımına ait numunelerin 1 günlük kür sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği	116
Ek Şekil 2. 7.	ZKD10 zemin karışımına ait numunelerin 1 günlük kür sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği	117
Ek Şekil 2. 8 .	ZKD20 zemin karışımına ait numunelerin 1 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği	117
Ek Şekil 2. 9.	Doğal zemine ait numunelerin 7 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği	118
Ek Şekil 2. 10.	ZD5 zemin karışımına ait numunelerin 7 günlük kür sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği	118
Ek Şekil 2. 11.	ZD10 zemin karışımına ait numunelerin 7 günlük kür sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği	119
Ek Şekil 2. 12.	ZD20 zemin karışımına ait numunelerin 7 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği	119
Ek Şekil 2. 13.	ZK zemin karışımına ait numunelerin 7 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği	120
Ek Şekil 2. 14.	ZKD5 zemin karışımına ait numunelerin 7 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği	120
Ek Şekil 2. 15.	ZKD10 zemin karışımına ait numunelerin 7 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği	121
Ek Şekil 2. 16.	ZKD20 zemin karışımına ait numunelerin 7 günlük kür sonr eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği	121
Ek Şekil 2. 17.	Doğal zemine ait numunelerin 28 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği	122
Ek Şekil 2. 18.	ZD5 zemin karışımına ait numunelerin 28 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği	122
Ek Şekil 2. 19.	ZD10 zemin karışımına ait numunelerin 28 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği	123
Ek Şekil 2. 20.	ZD20 zemin karışımına ait numunelerin 28 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği	123

Ek Şekil 2. 21.	ZK zemin karışımına ait numunelerin 28 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği	124
Ek Şekil 2. 22.	ZKD5 zemin karışımına ait numunelerin 28 günlük kür sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği	124
Ek Şekil 2. 23.	ZKD10 zemin karışımına ait numunelerin 28 günlük kür sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği	125
Ek Şekil 2. 24.	ZKD20 zemin karışımına ait numunelerin 28 günlük kür sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği	125
Ek Şekil 2. 25.	Doğal zemine ait numunelerin donma-çözülme çevrimi sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği	126
Ek Şekil 2. 26.	ZD5 zemin karışımına ait numunelerin donma-çözülme çevrimi sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği	126
Ek Şekil 2. 27.	ZD10 zemin karışımına ait numunelerin donma-çözülme çevrimi sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği	127
Ek Şekil 2. 28.	ZD20 zemin karışımına ait numunelerin donma-çözülme çevrimi sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği	127
Ek Şekil 2. 29.	ZK zemin karışımına ait numunelerin donma-çözülme çevrimi sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği	128
Ek Şekil 2. 30.	ZKD5 zemin karışımına ait numunelerin donma-çözülme çevrimi sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği	128
Ek Şekil 2. 31.	ZKD10 zemin karışımına ait numunelerin donma-çözülme çevrimi sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği	129
Ek Şekil 2. 32.	ZKD20 zemin karışımına ait numunelerin donma-çözülme çevrimi sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği	129
Ek Şekil 3. 1.	Isıl işlem görmemiş diatomitin 2500 kat büyütülmüş SEM görüntüsü....	130
Ek Şekil 3. 2.	Isıl işlem görmemiş diatomitin 10000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü	130
Ek Şekil 3. 3.	Isıl işlem görmemiş diatomitin 15000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü	131
Ek Şekil 3. 4.	Düşük ısı işlem görmüş diatomitin 1000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü	131
Ek Şekil 3. 5.	Düşük ısı işlem görmüş diatomitin 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü	132
Ek Şekil 3. 6.	Düşük ısı işlem görmüş diatomitin 10000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü	132
Ek Şekil 3. 7.	Düşük ısı işlem görmüş diatomitin 20000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü	133
Ek Şekil 3. 8.	Doğal zeminin 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü	133
Ek Şekil 3. 9.	ZD5 zemin karışımının 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü	134
Ek Şekil 3. 10.	ZD10 zemin karışımının 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü	134

Ek Şekil 3. 11.	ZD20 zemin karışımının 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü	135
Ek Şekil 3. 12.	ZK zemin karışımının 2500 kat büyütülmüş SEM görüntüsü	135
Ek Şekil 3. 13.	ZK zemin karışımının 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü	136
Ek Şekil 3. 14.	ZK zemin karışımının 10000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü	136
Ek Şekil 3. 15.	ZKD5 zemin karışımının 2000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü	137
Ek Şekil 3. 16.	ZKD5 zemin karışımının 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü	137
Ek Şekil 3. 17.	ZKD5 zemin karışımının 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü	138
Ek Şekil 3. 18.	ZKD5 zemin karışımının 10000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü	138
Ek Şekil 3. 19.	ZKD10 zemin karışımının 2500 kat büyütülmüş SEM görüntüsü	139
Ek Şekil 3. 20.	ZKD10 zemin karışımının 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü	139
Ek Şekil 3. 21.	ZKD20 zemin karışımının 2500 kat büyütülmüş SEM görüntüsü	140
Ek Şekil 3. 22.	ZKD20 zemin karışımının 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü	140
Ek Şekil 4. 1.	Doğal zeminin EDS elementsel haritalaması.....	141
Ek Şekil 4. 2.	Doğal zeminin SEM görüntüsü ile EDS elementsel haritalaması	141
Ek Şekil 4. 3.	ZD5 zemin karışımının EDS elementsel haritalaması.....	142
Ek Şekil 4. 4.	ZD5 zemin karışımının SEM görüntüsü ile EDS elementsel haritalaması.....	142
Ek Şekil 4. 5.	ZD10 zemin karışımının EDS elementsel haritalaması.....	143
Ek Şekil 4. 6.	ZD10 zemin karışımının SEM görüntüsü ile EDS elementsel haritalaması.....	143
Ek Şekil 4. 7.	ZD20 zemin karışımının EDS elementsel haritalaması.....	144
Ek Şekil 4. 8.	ZD20 zemin karışımının SEM görüntüsü ile EDS elementsel haritalaması.....	144
Ek Şekil 4. 9.	ZK zemin karışımının EDS elementsel haritalası.....	145
Ek Şekil 4. 10.	ZK zemin karışımının SEM görüntüsü ile EDS elementsel haritalaması.....	145
Ek Şekil 4. 11.	ZKD5 zemin karışımının EDS elementsel haritalaması.....	146
Ek Şekil 4. 12.	ZKD5 zemin karışımının SEM görüntüsü ile EDS elementsel haritalaması.....	146
Ek Şekil 4. 13.	ZKD10 zemin karışımının EDS elementsel haritalaması.....	147
Ek Şekil 4. 14.	ZKD10 zemin karışımının SEM görüntüsü ile EDS elementsel haritalaması.....	147
Ek Şekil 4. 15.	ZKD20 zemin karışımının EDS elementsel haritalaması.....	148
Ek Şekil 4. 16.	ZK205 zemin karışımının SEM görüntüsü ile EDS elementsel haritalaması.....	148

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1 Zemin türlerine göre stabilizasyon yöntemleri.....	7
Tablo 1.2. Stabilizasyon amacına göre kullanılabilecek zemin ıslah yöntemleri.....	8
Tablo 1.3. İnce malzemenin zemin gradasyonundaki miktarına göre zemine etkileri	11
Tablo 1.4. Zemin stabilizasyonu için katkı malzemesi seçimi	14
Tablo 1.5. Kireç, çimento, puzolan-kireç, puzolan-çimento-kireç kombinasyonlarında sağlanması gereken asgari serbest basınç mukavemeti değerleri.....	15
Tablo 1.6. Değişik zemin gruplarına ait çimento oranları	17
Tablo 1.7. Değişik zemin türleri için yaklaşık kireç miktarı	19
Tablo 1.8. Doğal puzolanların kimyasal bileşiminde bulunan bazı önemli oksitler	24
Tablo 1.9. Farklı ülkelerden elde edilen silis dumanının kimyasal içerikleri.....	25
Tablo 1.10. Uçucu kül ve taban külünün kimyasal içeriği	26
Tablo 1.11. Farklı ülkelerden elde edilen yüksek fırın cürufunun kimyasal içerikleri	27
Tablo 1.12. Kil minerallerinin kaya ve iklim şartlarına göre oluşumu.....	29
Tablo 1.13. Diatomitin kimyasal içerik sınır değerleri.....	37
Tablo 1.14. Türkiye Şeker A.Ş. tarafından üretilen ürün özellikleri	39
Tablo 1.15. Dünya diatomit rezervleri	41
Tablo 2.1. Deneylerde referans alınan standartlar	55
Tablo 2.2. Doğal zeminin yıkamalı elek analizi sonuçları	60
Tablo 2.3. Doğal zeminin hidrometre deneyi sonuçları	61
Tablo 2.4. Doğal zeminin MIT zemin sınıflandırma sistemlerine göre içerdiği zemin sınıflarının yüzdeleri	62
Tablo 2.5. Doğal zeminin kıvam limitleri	64
Tablo 2.6. Doğal zemine ait kimyasal analiz sonuçları ve mühendislik parametreleri ...	68
Tablo 2.7. Diatomite ait kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları.....	72
Tablo 2.8. Sönmüş kirecin kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	73
Tablo 2.10. Karışımların pH değerleri.....	75
Tablo 2.11. Çalışmada kullanılmak üzere hazırlanan karışımların isimlendirilmesi	76
Tablo 2.12. Zemin karışımlarının kıvam limitleri ve zemin sınıfları	77
Tablo 2.13. Zemin karışımlarına ait kompaksiyon parametreleri	79

Tablo 2.14. Zemin karışımlarının serbest basınç mukavemetleri.....	85
Tablo 2.15. 1 günlük kür süresi sonrası numunelerin serbest basınç mukavemetleri	87
Tablo 2.16. 7 günlük kür süresi sonrası numunelerin serbest basınç mukavemetleri	89
Tablo 2.17. 28 günlük kür süresi sonrası numunelerin serbest basınç mukavemetleri	91
Tablo 2.18. Donma-çözülme çevrimi sonrası numunelerin serbest basınç mukavemetleri	93



SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Aktivite (etkinlik)
A Za	: Ateş zayılatı (Kızdırma kaybı)
AASHTO	: Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
c	: Kohezyon
ca	: Kalsit
CAH	: Kalsiyum alümina hidrat
CASH	: Kalsiyum alümina silika hidrat
CH	: Kalsiyum hidrat
CH	: Yüksek plastisiteli kil
CL	: Düşük plastisiteli kil
CPT	: Koni penetrasyon deneyi
CSH	: Kalsiyum silika hidrat
c_u	: Drenajsız kayma mukavemeti
D	: Tane Çapı
DSİ	: Devlet Su İşleri
EDS	: Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi
GC	: Killi çakıl
GM	: Siltli çakıl
GP	: Kötü derecelenmiş çakıl
G_s	: Özgül Ağırlık
GW	: İyi derecelenmiş çakıl
H_e	: Efektif Derinlik
Il	: İllit
I_p	: Plastisite indisi
ISO	: Uluslararası Standartlar Teşkilatı
Ka	: Kaolinit
K-Ç-P	: Kireç, çimento ve puzolan kombinasyonu
MH	: yüksek plastisiteli silt

MIT	: Massachusetts Teknoloji Enstitüsü
ML	: Düşük plastisiteli inorganik silt
Mo	: Montmorillonit
MS	: Milattan sonra
MTA	: Maden Tetkik ve Arama
O Ma	: Organik madde
P	: Ağırlıkça elekten geçen malzeme yüzdesi, periklas
Qu	: Kuvars
q_u	: Serbest basınç mukavemetini
Rd	: Düzeltilmiş hidrometre okuması,
Rh	: Gerçek okuma
Rh_1	: Hidrometre okuması
SC	: Killi kum
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SM	: Siltli kum
SP	: Kötü derecelenmiş kum
SPT	: Standart penetrasyon deneyi
SW	: İyi derecelenmiş kum
T	: Sıcaklık
TS	: Tekto silikat
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
vd.	: Ve diğerleri
w_L	: Likit limit
w_{opt}	: Optimum su muhtevası
w_p	: Plastik limit
XRD	: X-ışını difraksiyonu
Z	: Doğal zemin
ZD5	: %5 diatomit içeren zemin karışımı
ZD10	: %10 diatomit içeren zemin karışımı
ZD20	: %20 diatomit içeren zemin karışımı
ZK	: Kireç katkılı zemin
ZKD5	: %5 diatomit içeren kireçli zemin karışımı
ZKD10	: %10 diatomit içeren kireçli zemin karışımı

ZKD20	: %20 diatomit içeren kireçli zemin karışımı
$\gamma_{k,max}$	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık
ρ_k	: Kuru yoğunluk
$\rho_{k,max}$	: Maksimum kuru yoğunluk
ϕ	: Kayma mukavemeti açısı
σ	: Eksenel gerilme
ϵ	: Birim deformasyon



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

İnşaat mühendisliğinde, inşa edilecek yapıların güvenli zeminler üzerine inşa edilmesi, yapı ömrü ve güvenliği açısından önem arz etmektedir. Yapıların stabilitesi, güvenliği ve ömrü, üzerine oturtulduğu ve/veya dolgu malzemesi olarak kullanılan zeminin mühendislik özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Başka bir ifadeyle zeminler, temel sistemleri ile birlikte yapı ağırlıkları ve yapı kullanım yüklerinden meydana gelen gerilmelere karşı koyabilmelidir. Ayrıca çevre ve iklim koşullarından dolayı (kabarma-büzülme, don kabarması, oturma, su muhtevsındaki değişimler gibi) zemin özelliklerinde değişimler meydana gelebilmekte; bu değişimler taşıma gücünde azalmalara ve ilave gerilmelere sebebiyet verebilmektedir. Bu sebepler göz önüne alındığında yapıların uygun özelliklere sahip zeminler üzerine inşa edilmesi gelenekselleşmiş bir düşüncedir.

Giderek artan dünya nüfusu, sanayileşme ve şehirleşmeden dolayı inşası planlanan bina, köprü, yol ve baraj gibi yapılar için uygun, sağlam zemin bulmak güçleşebilmektedir. Mühendislik özellikleri bakımından zayıf olan zeminler üzerine yapı inşa edilmesi gerektiği durumlarda, ilgili mühendisler, bu zemin ile ilgili aşağıda genelleştirilmiş olan alternatiflerinden birine karar vermek durumundadır;

- Uygun olmayan zeminleri olduğu gibi kullanma,
- Uygun olmayan zemin kaldırılarak yerine istenilen özelliklere sahip zemin koyma,
- Uygun olmayan zeminin iyileştirilmesi.

Birinci alternatif, zeminin zayıf özellikleri dikkate alınarak üzerine inşa edilecek yapıya ait temel sistemlerinin bu olumsuzluklara karşı koyabilecek bir şekilde tasarlanmasıdır. Ancak bu durumda, yapı temelinin boyut ve ebatları artmakta; maliyet açısından uygun olamamaktadır. Ayrıca uzun dönem göz önüne alındığında, zeminin olumsuz etkilerinden dolayı yapı güvenliği ve ömrü gibi konularda sorunlar yaşanabilmektedir. İkinci alternatif, uygun olmayan zeminin yerinden kazılarak uygun depo alanlarına taşınması; uygun ocağın, istenilen özelliklere sahip zeminin yapı sahasına taşınıp sıkıştırılması gibi işlemleri kapsadığından zaman alıcı ve maliyetli olarak değerlendirilmektedir. Üçüncü alternatif ise zeminin farklı ıslah teknikleri ile iyileştirilip

uygun hale getirilmesi işlemlerini kapsamaktadır. Bu tür çalışmalara genel olarak zemin stabilizasyonu denilmektedir. Zemin stabilizasyonu çalışmaları, zeminin türüne ve kullanım amacına göre birçok farklı teknik kullanılarak yapılmaktadır.

Zemin stabilizasyon tekniklerinden bir tanesi de kimyasal katkılı stabilizasyondur. Zayıf zemine çimento, kireç, bitüm, puzolan ya da özel kimyasal katkılar katılması ile bu zeminin geoteknik özellikleri istenilen düzeye getirilebilmektedir. Bu ıslah yöntemleri yüzeysel zemin stabilizasyonunda sıklıkla tercih edilmektedir.

Çimento ve kireç gibi kalsiyum kökenli bağlayıcılar ile ıslah edilen zeminlerde çimentolaşma reaksiyonları meydana gelmektedir. Bu reaksiyonlar, zeminlerin mukavemetlerinde büyük bir artışa, şişme potansiyellerinde ise azalışa neden olmakta ve zeminlerin ıslahına katkı sağlamaktadır. Çimentolaşma reaksiyonlarının gerçekleşmesi için ortamda silisyum dioksit, alüminyum oksit ve demir oksit gibi oksitlerin olması gerekmektedir. Çimento, içeriğinde bu oksitleri barındırsa da kireç katkısı ile yapılan stabilizasyon çalışmalarında bu oksitler ince taneli (kohezyonlu, killi) zeminlerin yapısından karşılanmaktadır. Bu tür oksitlerin yetersiz olduğu zeminlerde ise zemine, bu oksitlerce zengin, ince öğütülmüş puzolanların eklenmesi ile çimentolaşma reaksiyonları gerçekleştirilmektedir.

Zemin türlerinden biri olan killi zeminler, içeriğinde yüksek miktarda ince zemin taneleri barındıran zeminlerdir. Bu tür zeminler her zaman istenilen özelliklere sahip olamamaktadır. Mukavemetinin düşük olması, şişme potansiyellerinin yüksek olması, kullanım amacına uygun geçirimsizliğe sahip olmaması gibi nedenlerden dolayı bu tür zeminler sıklıkla zemin stabilizasyon yöntemleri ile ıslah edilmeye çalışılmaktadır.

Killi zeminlerin stabilizasyonunda kireç ve puzolan gibi katkıların kullanılmasına literatürde ve uygulamada sıklıkla rastlanılmaktadır. Farklı doğal ya da yapay puzolanların kullanılması maliyet açısından kazanımlar sağlamaktadır. Giderek artan puzolanik özellik gösteren malzemelerin kullanımı, farklı tür puzolanların zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğinin araştırılması ihtiyacını doğurmaktadır. Bu kapsamda ülkemizde bulunan puzolanların zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğinin araştırılması önemli hale gelmiştir.

Zeminlerin ıslahı düşünüldüğünde, zeminlerin maruz kalabileceği çevre ve iklim koşullarının da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Zira zeminler yıl içerisinde farklı sıcaklıklara ve yağışlara maruz kalabilmektedir. Sıcaklık +4 °C'nin altına düştüğü

durumlarda çimentolaşma reaksiyonları durmakta, ayrıca zemin içerisindeki suyun donarak hacminin genişlemesi zemin mukavemetini olumsuz etkilemektedir.

1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı

Zemin stabilizasyonu ile ilgili detaylı literatür çalışması yapıldığında doğal puzolanların zemin stabilizasyonunda yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca bir diğer stabilizatör olan sönmüş kireç katkısının doğal puzolanlar ile yaygın olarak kullanıldığına da literatürde sıklıkla rastlanmaktadır. Fakat bir doğal puzolan olan diatomitin zemin stabilizasyonunda kullanımı ile ilgili literatürde yapılmış fazla çalışmaya ise rastlanmamaktadır. Bu irdelemeler doğrultusunda, ülkemizde bulunan diatomit yataklarından elde edilen doğal diatomitin, kil zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabilirliğinin araştırılması, bu çalışmanın esas amacını oluşturmaktadır.

Bayburt Güder köyü yakınında bulunan kil ocağından temin edilen, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre yüksek plastisiteli kil zemin, bu çalışmada kullanılan doğal zemini teşkil etmektedir. Sönmüş kireç ve Ankara Kazan diatomiti ile yapılan stabilizasyonun, bu zemine ait kıvam limitlerine, kompaksiyon parametrelerine ve serbest basınç mukavemetine olan etkisi, bu çalışma kapsamında incelenmektedir. Ayrıca kür süresinin ve donma-çözülme çevriminin doğal ve ıslah edilmiş zeminler üzerinde meydana getirdiği etkiler de bu çalışmanın amaçlarından bir tanesidir.

Aynı zamanda bu çalışmada, literatürde Ankara Kazan diatomiti ile ilişkili fazla çalışma bulunmadığından dolayı Ankara Kazan diatomiti hakkında literatüre bilgi kazandırmak da amaçlanmaktadır.

1.3. Zemin Stabilizasyon Teknikleri

Zeminler, yerel koşullara bağlı olarak geoteknik özellikleri bakımından farklılık gösterebilmektedir. Buna bağlı olarak farklı amaçlar için karşılaşılan zeminler, her zaman kullanım amacına uygun özellikler taşıyamayabilirler. İstenilen özelliklere sahip olmayan zemin ile karşılaşıldığı durumlarda farklı birçok yönteme başvurulabilmektedir. Bunlardan biri olan zemin stabilizasyonu (iyileştirme, sağlamlaştırma, ıslah), zeminlerin farklı yöntemler ile iyileştirilip kullanım amacına uygun hale getirilmesi işlemlerine verilen genel

bir isimdir. Zemin stabilizasyonu, zeminin kaldırılıp yerine uygun zemin yerleştirilmesi ya da zayıf zeminin yapı yüklerini taşıyabilmesi için geniş temel sistemlerinin seçilmesi gibi maliyeti yüksek, zaman alıcı işler ile kıyaslandığında birçok açıdan kazanımlar sağlamaktadır. Zemin stabilizasyon çalışmalarındaki amaç, yapının/işin amacına göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu amaçlardan bazıları;

- Zemine ait kayma direncini ve taşıma gücünü artırmak,
- Oturmaları azaltmak ve buna bağlı olarak üst yapıda meydana gelebilecek deformasyonları önlemek,
- Zemin geçirimliliğini istenilen düzeye getirmek,
- Boşluk suyu basıncını düşürmek,
- Şişme/kabarma ve don kabarması gibi üst yapılara fazladan gerilmelere yol açabilecek çevre etkilerini azaltmak gibi sıralanabilmektedir.

Zemin stabilizasyon yöntemleri tam anlamıyla 20. yüzyılın bir mühendislik çalışmasıdır. Eski çağlar ile kıyaslandığında artan dünya nüfusuna paralel olarak yerleşimin ve zemin kullanımının büyük oranda artması, dünyada ve ülkemizde sağlam zemin bölgelerinin gitgide daralmasına sebebiyet vermekte; yetersiz temel zemininin kullanımı ise birçok zorluğu beraberinde getirebilmektedir. Bu tarz zeminlerin kullanım zorluğu ve ayrıca komşu yapıların güvenliğinin korunması gibi faktörler göz önüne alındığında, zayıf zeminler için zemin iyileştirme tekniklerinin kullanılması, yakın tarihimizde önemli ve gerekli hale gelmiştir (Demiröz ve Karaduman, 2009).

Zemin stabilizasyon yöntemleri, zemin türüne ve istenilen iyileştirme amacına göre farklılık gösterebilmektedir. Geoteknik özellikleri bakımından yetersiz görülen zeminlerin ıslahı düşünüldüğünde; zeminin durumuna, türüne ve ıslahı planlanan özelliklerine göre stabilizasyon tekniklerine karar verilmesi gerekmektedir. Ayrıca zemin stabilizasyon teknikleri, zeminin kohezyonlu olup olmamasına, suya doygunluğuna ve içerdiği organik madde miktarına bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir (Yıldırım, 2002).

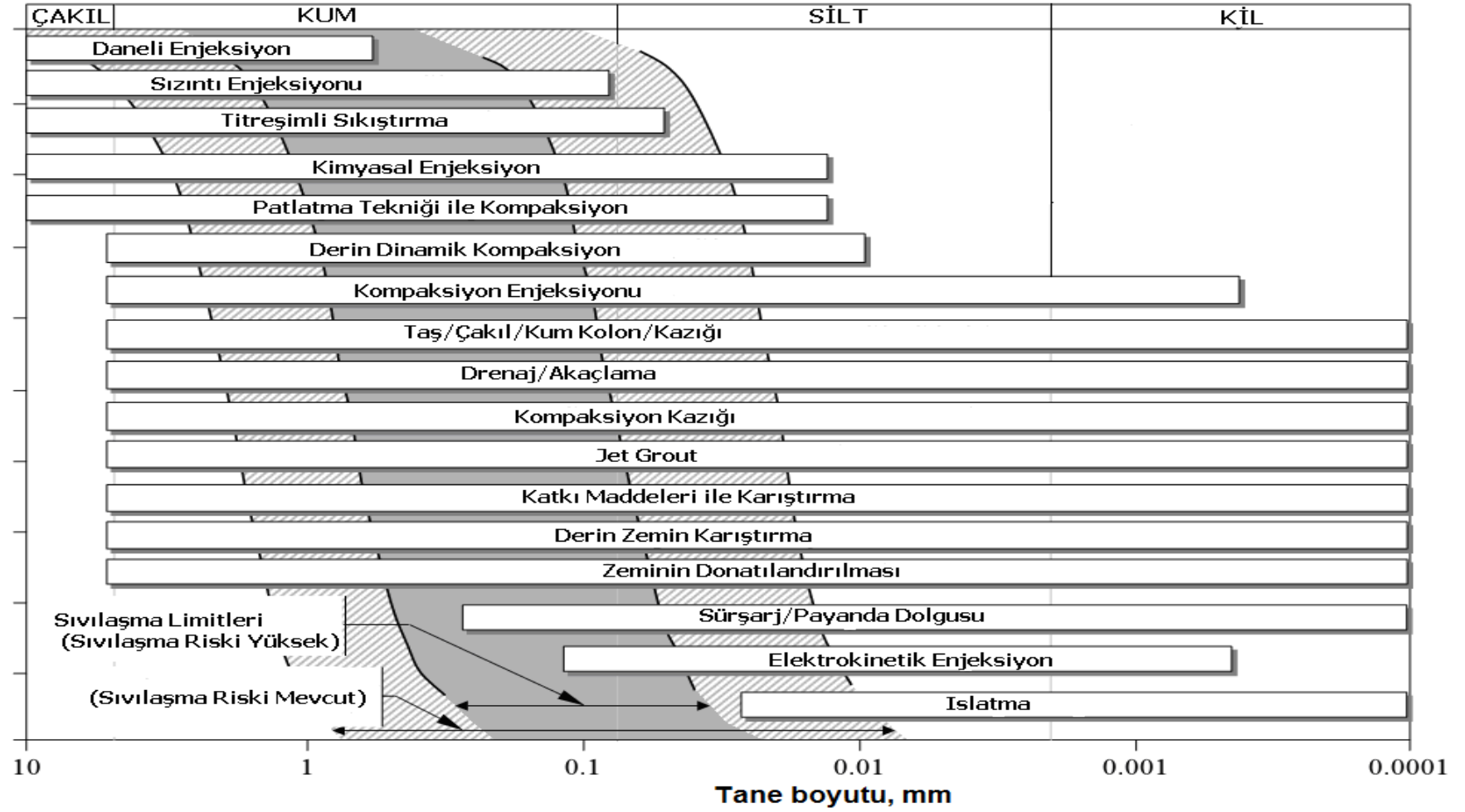
Geçmişten günümüze kadar zemin stabilizasyonunu konu alan birçok çalışma yapılmıştır. Birçok araştırmacı, zemin stabilizasyon yöntemlerini zeminin türüne ve stabilizasyonun amacına göre derin, yüzeysel; katkılı, katkısız gibi farklı kategorilerde sınıflandırılmaktadır.

Zemin stabilizasyonunu derin ve yüzeysel stabilizasyon olarak iki grupta toplayan Uzuner (2019)'e göre zemin stabilizasyonu Şekil 1.1'de görülmektedir.



Şekil 1.1. Stabilizasyon teknikleri (Uzuner, 2019).

Mitchell ve Gallagher (1998) zemin türlerine göre uygun stabilizasyon yönteminin belirlenmesini Şekil 1.2'deki gibi tanımlamaktadır. Hunt (1994) ise zemin türüne göre uygun stabilizasyon yöntemlerini Tablo 1.1'deki gibi sınıflandırmaktadır. Ayrıca da Tablo 1.2'de stabilizasyon amacına göre kullanılabilecek zemin ıslah yöntemleri verilmektedir (U.S. Army Corps. of Eng., 2003).



Şekil 1.2. Zemin türlerine göre stabilizasyon yöntemlerinin belirlenmesi (Mitchell ve Gallagher, 1998).

Tablo 1.1. Zemin türlerine göre stabilizasyon yöntemleri (Hunt, 1994).

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

Tablo 1.2. Stabilizasyon amacına göre kullanılabilecek zemin ıslah yöntemleri (U.S. Army Corps. of Eng., 2003).

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

Şekil 1.2, Tablo 1.1 ve 1.2’de görüldüğü gibi çok sayıda zemin stabilizasyon teknikleri vardır. Hangi zemin stabilizasyonu tekniği kullanılırsa kullanılsın, yapılan uygulamaların sahada standart penetrasyon (SPT) ya da konik penetrasyon (CPT) deneyleri ile kontrol edilmesi son derece önemli olmaktadır. Yapılan çalışmalarda zeminin istenilen özelliklere erişmediği sonucuna varılırsa, zemin istenilen özelliklere gelene kadar, zemine farklı stabilizasyon işlemleri uygulanması gerekmektedir (Kayabalı, 2010).

Zemin stabilizasyonu çalışmaları, zeminin türüne ve iyileştirilmek istenen özelliğine göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu çalışmada, yüksek plastisiteli killerin, kireç ve puzolanlar ile stabilizasyonu inceleneceğinden katkılı stabilizasyon tanımlanmakta ve diğer stabilizasyon işlemlerine değinilmemektedir.

McCallister-Petry (1990), Housman (1990), Lambe vd. (1990), Puppala-Henchaloet (1996) ve Kota (1996) vd. gibi birçok araştırmacıya göre katkılı zemin iyileştirme çalışmaları genellikle mekanik ve kimyasal iyileştirme olarak iki ana grupta toplanabilmektedir. Mekanik stabilizasyon, kimyasal katkı malzemesi kullanmadan, fiziksel işlemlerle zeminin fiziksel, hidrolik ve mekanik özelliklerini değiştirmek için kullanılan yöntemlerdir. Özellikle istenilen granülometriye sahip olmayan zeminlere, ihtiyaca göre ince ya da iri bir diğer zeminin ya da zeminlerin eklenerek karıştırılması işlemidir. Kimyasal stabilizasyon ise, mekanik stabilizasyon işlemleriyle istenilen geoteknik özellikler elde edilemediği durumlarda, zeminlere farklı kimyasal katkılar katılmasıyla yapılan stabilizasyon işlemlerini kapsamaktadır. Kimyasal katkılı stabilizasyon; zeminlerin mukavemetlerinde, geçirimsizliklerinde, sıkışabilirliklerinde, şişme/büzülme potansiyellerinde, sıvılaşmalarında ve işlenebilirliklerinde iyileşmelere yol açan, genellikle çimento, kireç, uçucu kül, bitüm ve çeşitli tuzlar ile yapılan stabilizasyon çalışmalarıdır.

1.3.1. Mekanik Stabilizasyon

Mekanik stabilizasyon, iki ya da daha fazla zeminin, istenilen özelliklere sahip bir zemin elde edilmesi için karıştırılması işlemidir. Bundan dolayı bu işleme granül stabilizasyon da denilmektedir. Mekanik stabilizasyon, ayrıca zeminin bir miktarının uzaklaştırılıp kalan zeminin sıkıştırılmasıyla da yapılabilir.

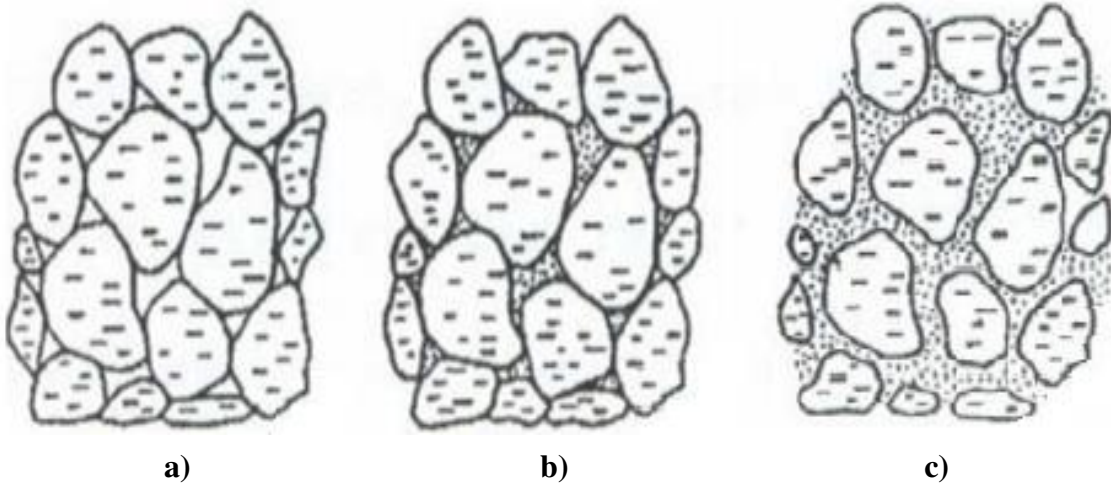
Mekanik stabilizasyon, iyileştirilecek zeminin yerinden kazılması, farklı bir zemin ya da zeminler ile karıştırılarak mekanik özelliklerinin ıslah edilmesi ve tekrar yerine serilip

sıkıştırılması işlemlerinden oluşmaktadır. Zeminin karıştırılması, yerinde, sabit ya da hareketli bir panel yardımı ile yapılabileceği gibi malzeme ocağında da yapılabilmektedir.

Mekanik stabilizasyonda amaç;

- Zeminin granülometrisinin istenilen hale getirilmesi,
- Kıvam limitlerinin azaltılması,
- Dren kabiliyetinin artırılması,
- Uzun dönemli oturmaların ve don duyarlılığını azaltılması,
- Kapilaritenin artırılması,
- Durabilitenin ve mukavemetin artırılması olarak sıralandırılabilir (Winterkorn ve Fang, 1975).

Mekanik stabilizasyon ile elde edilen karışımın granülometrisi ile ince kısmın plastisitesi, stabilizasyonun etkili olmasında önemli olan parametrelerdir. Zeminin granülometrisi; zeminin yoğunluğu, stabilitesi, geçirimsizliği ya da su tutma özelliği üzerinde etkin rol oynamaktadır. Granülometrinin sürekli olması durumunda en yoğun zemin elde edilmekte, ayrıca segregasyon azalmakta ve işlenebilirlik artmaktadır (Jewell, 1969 ve ARRB, 1969). Şekil 1.3'te zeminde bulunan ince ve kaba tane miktarına göre karşılaşılabilecek zemin türleri verilmektedir.



Şekil 1.3. Zemindeki ince malzemenin durumları (Kreps ve Walker, 1971).

Şekil 1.3a'da ince malzeme yok veya çok az bulunduğu durum, Şekil 1.3b'de boşlukları tam dolduracak kadar ince malzemenin olduğu durumu, Şekil 1.3c'de aşırı ince

malzemenin olduğu durum görülmektedir. Tablo 1.3'te bu üç durumdaki zeminin özellikleri özetlenmektedir.

Tablo 1.3. İnce malzemenin zemin gradasyonundaki miktarına göre zemine etkileri

İnce malzeme yok veya çok az	Boşlukları tam dolduracak kadar ince malzeme var	Aşırı ince malzeme var
Taneler arası temas iyi ile vasat arasındır.	Deformasyona karşı direnç, taneler arası temasla artar.	Taneler ince malzeme içinde yüzdüğünden temas yoktur.
Değişken yoğunluğa sahiptir.	Yoğunluk artar.	Yoğunluk düşer.
Geçirgendir.	Orta derecede sıkışır.	Geçirgen değildir.
Yüksek stabilitelidir.	Yüksek stabiliteye sahiptir.	Düşük stabilitelidir.
Çok zor sıkışır.	Orta derecede sıkışır.	Kolay sıkışır.
Dona duyarsızdır.	Dona duyarlıdır.	Dona çok duyarlıdır.
Sudan etkilenmez.	Sudan çok az etkilenir.	Sudan çok fazla etkilenir.

Zeminlerin maksimum tane boyutunun büyük olması, işlenebilirliğini azaltabilmekte; ayrıca kaba kısmının fazla olması, zeminde segregasyona sebebiyet verebilmektedir. Zeminde ince malzemenin fazla olması durumunda ise yüksek su içerikleri karıştırmayı güçleştirebilmekte; düşük su içeriğinde ise topaklanmalar meydana gelebileceğinden homojen bir karışım elde edilememektedir (Rodriguez vd., 1973).

1.3.2. Kimyasal Stabilizasyon

Kimyasal stabilizasyon, mekanik stabilizasyon ile iyileştirilemeyen zeminlerin bir takım kimyasal katkıları ile geoteknik özelliklerini iyileştirmeyi amaçlayan stabilizasyon tekniklerine verilen genel bir isimdir. Kimyasal stabilizasyonda asıl amaç, çevre ve yükleme koşullarına göre ıslahı planlanan zeminlerin, erişimi kolay ve düşük maliyetli katkı malzemeleri ile ıslah edilmesidir. Bu kapsamda genellikle ıslahı düşünülen zeminlere kireç, çimento, uçucu kül, bitüm, puzolanik özellik gösterebilen malzemeler ve bazı özel kimyasal katkıları katılmakta ve zeminin istenilen özelliklere erişmesi sağlanmaktadır. Kimyasal

stabilizasyon yöntemleri, zemin özelliklerinin iyileştirilmesi bakımından oldukça etkili bir yöntemdir. Kimyasal stabilizasyonun uygulanmasında aşağıdaki amaçlar etkili olmaktadır;

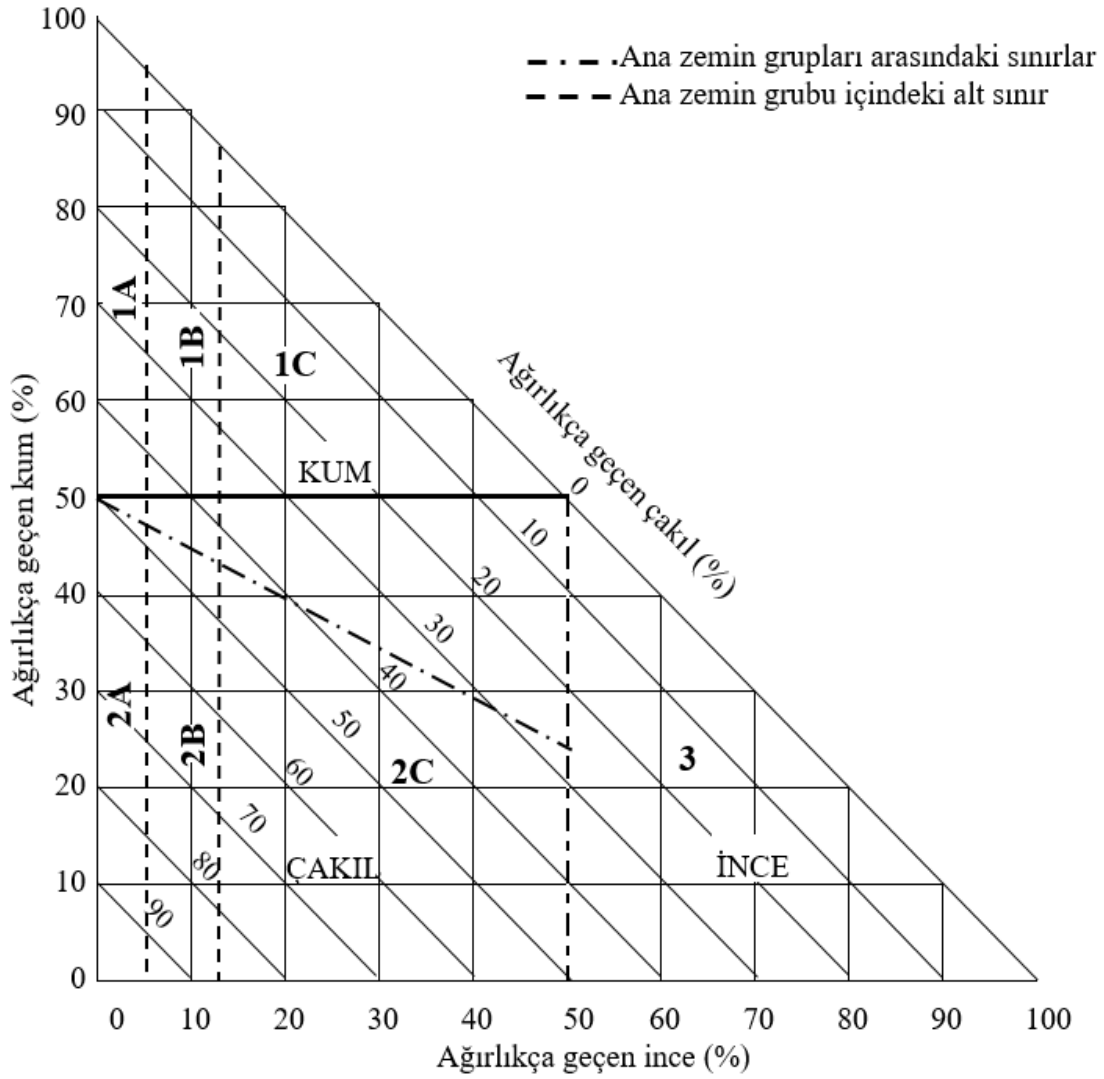
- Hacim sabitliğini sağlamak,
- Zeminin mukavemetini ve taşıma gücünü artırmak,
- Meydana gelebilecek deformasyonları azaltmak,
- Durabiliteyi artırmak,
- Permeabiliteyi stabilizasyon amacına uygun istenilen seviyeye getirmek,
- Aşınabilirliği azaltmak,
- Oturmaları azaltmak,
- Şişme/büzülme problemlerini ortadan kaldırmak ya da azaltmak,
- Şev kaymalarını engelleyebilmek için güvenlik katsayısını artırmak.

Kimyasal stabilizasyonda iki önemli reaksiyon oluşmaktadır. Bunlardan ilki olan kation değişim reaksiyonu (bunu takip eden yumaklaşma ve agregasyon), diğeri ise çimentolaşma reaksiyonlarıdır (Mitchell, 1993). Kation değişimi reaksiyonu oluşabilmesi için kation içeren, kalsiyumlu inorganik ve organik malzemeler gerekmektedir. Çimentolaşma reaksiyonları için ise kireç, çimento, bitüm, puzolan, sodyum silikat, fosforik asit, sodyum hidroksit, jips ya da alüminyum tuzlarının zemine eklenmesi gerekmektedir. Kimyasal stabilizasyonun en etkili sonuçları, bu iki reaksiyonun da aynı anda oluşması ile elde edilmektedir.

Zemin stabilizasyonunda stabilizatör seçimi ayrıca önem arz etmektedir. Stabilizatör seçiminde zeminin türü, stabilizasyon amacı, hangi özelliğinin iyileştirileceği, maliyeti ve malzemenin temin kolaylığı göz önünde bulundurularak uygun stabilizatör seçilmesi gerekmektedir. Ayrıca her zemin için her teknik istenilen düzeyde sonuç verememektedir. Örneğin, çimento ve kireç gibi kalsiyum kökenli katkı malzemeleri, sülfat oranı yüksek zeminlerde kullanıldıklarında zamanla şişme problemine sebebiyet verebilmektedir (Kota vd. 1996). İnce taneli ve organik zeminlerde çimento ile stabilizasyon iyi sonuç vermezken (Haousmann, 1990), sızma probleminin olduğu ve iri taneli zeminlerde ise kireç ile stabilizasyon yapılamamaktadır (McCallister ve Petry, 1990). Bitüm ile stabilizasyon işlemleri ise genellikle iri taneli zeminler için uygun olmaktadır. Ayrıca uçucu küller ağır metal içeriklerinden dolayı çevre kirliliği yaratabilmektedir (Haousmann, 1990).

Zeminin tane boyutları göz önüne alınarak hazırlanan üçgen gradasyon nomogramı (U.S. Army Corps. of Eng.) Şekil 1.4'te verilmektedir. Bilindiği gibi killi zeminler özellikle

kuru halde iken değişik boyutlarda, ufalanması zor ve katı halde bulunmaktadır. Bu nomogram yardımıyla zeminin ufalanma karakteristiği belirlenebilmekte ve bu karakteristik özelliği ile birlikte plastisite indisi ve likit limiti de göz önüne alınarak Tablo 1.4'e göre en uygun stabilizasyon yöntemi seçilebilmektedir.



Şekil 1.4. Zemin üçgen gradasyonu nomogramı (U.S. Army Corps. of Eng).

Tablo 1.4. Zemin stabilizasyonu için katkı malzemesi seçimi (U.S. Army Corps. of Eng).

Alan no	Zemin sınıfı	Önerilen katkı	Kısıtlamalar	200 No.lu elekten geçen	Açıklamalar
1A	SW SP	Bitüm	-	-	
		Çimento	-		
		K-Ç-P*	$I_p < 25$		
1B	SW SP SW-SC	Bitüm	$I_p < 10$	-	
		Çimento	$I_p < 30$		
		Kireç	$I_p < 12$		
1C	SM SC SM-SC	Bitüm	$I_p < 10$	En fazla %30	
		Çimento	**	-	
		Kireç	$I_p > 12$	-	
		K-Ç-P*	$I_p < 25$	-	
				-	
2A	GW GP	Bitüm	-	-	
		Çimento	-		
		K-Ç-P*	$I_p < 25$		
2B	GW GP GW-GC GP-GC	Bitüm	$I_p < 10$	-	Çimento katkısı sadece iyi gradasyonlu zeminlerde ve 4 No.lu (4.75 mm) elekten geçen en az %45 olduğu durumlarda
		Çimento	$I_p < 30$		
		Kireç	$I_p > 12$		
		K-Ç-P*	$I_p < 25$		
2C	GM GC GM-GC	Bitüm	$I_p < 10$	En fazla %30	
		Çimento	**	-	
		Kireç	$I_p > 12$	-	
		K-Ç-P*	$I_p < 25$	-	
				-	
3	CH CL ML ML-CL	Çimento	$w_L < 40$ ve $I_p > 20$	-	Organik ve kuvvetli asidik zeminler uygun olmamaktadır.
		Kireç	$I_p > 12$		

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

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

Katkı malzemesinin temininde zemin türü, stabilizasyon amacı gibi özelliklerin yanı sıra maliyet ve tedarik kolaylığı gibi parametreler de göz önüne alınmalıdır. Belirlenen stabilizatörün, arazide uygulanmadan önce laboratuvar deneylerine tabi tutulması da son derece önemli olmaktadır. Zira arazi uygulamasında, hedeflenen zemin iyileştirilmesi sağlanamaması durumunda maliyet ve zaman kaybı yaşanabilmektedir.

Katkı malzemesi ile stabilizasyon işlemlerine tabi tutulan zemin, gradasyon, mukavemet ve durabilite açısından belirli minimum şartları sağlaması gerekmektedir. Tablo 1.5'te zeminin kireç, çimento, puzolan-kireç, puzolan-çimento-kireç yöntemlerinden hangisi seçilirse seçilsin sağlaması gereken mukavemet değerleri verilmektedir. Bu tabloda, çimento ile stabilizasyon için 7 günlük, kireç ile stabilizasyonlar için 28 günlük kür süresinin sonunda kazanılmış nihai mukavemetin olması gereken minimum değerler verilmektedir (U.S. Army Corps. of Eng).

Tablo 1.5. Kireç, çimento, puzolan-kireç, puzolan-çimento-kireç kombinasyonlarında sağlanması gereken asgari serbest basınç mukavemeti değerleri (U.S. Army Corps. of Eng).

	Esnek kaplama	Rijit kaplama
Yol temel tabakası	5.17 MPa	3.45 MPa
Yol alt temel, yol tabanı, dolgular	1.72 MPa	1.38 MPa

Kimyasal katkılı stabilizasyon birçok katkı malzemesi kullanılabilmektedir. Bunlardan başlıcaları; çimento, bitüm, kireç ve doğal ya da yapay puzolanlardır. Ayrıca farklı kimyasal katkılar, polimerler, sentetikler, sanayi atıkları gibi katkıların da farklı stabilizasyon amaçları için kullanıldığı çalışmalar da vardır.

1.3.2.1. Çimento ile Stabilizasyon

Çimento, doğal kil, kalker ve alçı taşları karışımlarının yüksek sıcaklıkta yakılması ve öğütülmesi ile elde edilen, suyla karıştırıldığında hidrasyon reaksiyonu meydana getiren ve zaman ile mukavemet kazanan bağlayıcı bir malzemedir. Bu özelliklerinden dolayı çimento zemin stabilizasyonunda, stabilizatör olarak sıklıkla tercih edilmektedir. Çimento ile stabilizasyon, zemine kuru ağırlığının %5-15'i kadar çimento karıştırılarak kompaksiyon

uygulanması işlemidir. Çimento, zemin taneleri arasında bağlar oluşturmakta ve bu bağlar da mukavemeti ve stabiliteyi artırmaktadır. Yol inşaatlarında ve havaalanı apronlarında genellikle çimento katkılı stabilizasyon tercih edilmektedir. Yüzeysel stabilizasyon haricinde; şevlerin stabilitesinde, derin kazık stabilizasyonunda ve dolguların altında meydana gelen konsolidasyon oturmalarının hızlandırılmasında da çimento ile stabilizasyon sıklıkla tercih edilmektedir.

Uygun çimento miktarı laboratuvar ortamında yapılan deneyler (serbest basınç deneyi, serbest şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleri gibi) ile belirlenmektedir. Zemine stabilizasyon işlemi için ilave edilen suyun çimentonun sertleşmesi için yeterli olması, dikkat edilmesi gereken unsurlardandır. Zeminde ince malzeme var ise, optimum su içeriği değerinden fazla su ilave edilerek uygulamanın yapılması daha olumlu sonuçlara ulaşılmasını sağlamaktadır. Ayrıca uygulamada çimento ile zeminin üniform olarak karıştırılmasının güç olmasından dolayı laboratuvar deneyleri ile elde edilen optimum çimento oranının bir miktar üzerinde çimento kullanılarak stabilizasyon işleminin gerçekleştirilmesi önerilmektedir. Stabilizasyon işleminin tamamlanmasından sonra çimento katılarak sıkıştırılan zeminin, aynen beton gibi bir süre ıslatması da ayrıca önem arz etmektedir.

Çimentoda yer alan silika, puzolanik aktiviteyi meydana getiren maddedir. Bu yüzden kil mineralleri içermeyen iri taneli (kohezyonsuz) zeminlerde çimento stabilizasyonu sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Fakat saf kohezyonlu ve organik zeminler haricinde tüm zeminler için uygun bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. İri taneli zeminlerde çimento, taneler arasında bağlar oluşturarak zemin mukavemetini artırmakta ve geçirimsizliği azaltmaktadır. İnce taneli (kohezyonlu) zeminlerde ise zeminin mukavemetini artırmanın yanı sıra geçirimsizliğini, plastisite indisini ve buna bağlı olarak işlenebilirliğini de artırmaktadır. Ayrıca yüksek şişme potansiyeline sahip zeminlerin şişme potansiyelinde de kayda değer iyileşmeler meydana getirmektedir.

Çimento ile stabilizasyon bazı durumlarda rötre gibi olumsuz etkiler meydana getirebilmektedir. Zemine eklenen fazla çimento sonucunda zeminde rötre çatlakları oluşabilmektedir. Bu gibi olumsuz etkiler ve maliyet de göz önüne alındığında, zemin sınıflarına göre kuru ağırlığınca zemine ilave edilmesi gereken çimento oranı aralıkları Tablo 1.6'da gösterilmektedir.

Tablo 1.6. Değişik zemin gruplarına ait çimento oranları (Tunç, 2002).

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

1.3.2.2. Bitüm ile Stabilizasyon

Bitüm petrolden elde edilen siyah, yapışkan, sıcakken sıvı olan, hidrokarbon bir üründür. Zemin stabilizasyonunda bitümün kullanılması, zemin içerisinde bulunan suyun zararlarını azaltmakta ve taneler arasında bağ oluşumunu artırmaktadır. Viskozitesi yüksek ve yapışkan bir malzeme olduğundan zemin tanelerini bir arada tutabilmekte; su ve rüzgar erozyonu gibi etmenler sonucu meydana gelebilecek malzeme kayıplarının önüne geçebilmektedir. Ayrıca hem ince hem de iri taneli zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabilen bitüm, özellikle boşluk oranı yüksek iri taneli zeminlerin geçirimsizliğini önemli oranda azaltabilmekte, zemin tanelerini birbirine bağladığından dolayı taşıma gücünü de artırabilmektedir. İnce taneli zeminlerde ise, zeminin yeraltı suyu ile dağılmasının ve yumuşamasının önlenmesinde tercih edilmektedir. Bitüm ile stabilizasyon işlemlerinde katkı malzemesi olarak genellikle zeminin %10-%15'i kadar bitüm kullanılmaktadır.

Zeminlerin boşluk oranları çok yüksek olduğu durumlarda, geçirimsizliği artırmak için kimyasal katkılar kullanmak pek mümkün olmamaktadır. Fakat bitüm kullanımı ile geçirimsizlik önemli oranda azaltılabilmektedir. Çimento ve kireç gibi katkılarla kıyas edildiğinde pahalı bir malzeme olan bitüm, plastik olmayan, iri taneli zeminlerin ıslahında sağladığı yüksek faydadan dolayı, özellikle yol kaplamalarının temellerinde sıklıkla başvuru olan stabilizatör olma özelliği göstermektedir.

Bitüm ile stabilizasyon işleminin, ince taneli zeminlere uygulanmasının zorluğundan ince malzeme içeriği (200 No.lu elek altı) %12'den az olma şartı getirilmiştir. 200 No.lu elek altı malzemenin %12'yi geçmesi durumunda, bağlayıcı olarak katılması gereken bitüm miktarı artmakta ve istenilmeyen düzeyde rijitlik meydana gelmektedir (Tunç, 2001).

1.3.2.3. Kireç ile Stabilizasyon

Katkılı stabilizasyon çalışmalarında kullanılan bir diğer katkı malzemesi ise kireçtir. Zeminlere sönmüş (kalsiyum hidrat ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)) ya da sönmemiş kireç (kalsiyum oksit (CaO)) ilave edilmesi ile zeminlerin geoteknik özelliklerinde bir takım iyileşmeler sağlanabilmektedir. Ayrıca tarım kireci olarak da bilinen kalsiyum karbonatın (CaCO_3), su ile reaksiyon yapabilme yeteneği olmadığından stabilizatör olarak kullanılsa da gradasyonu iyileştirmek için filler olarak kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur (Çalık, 2012).

Kirecin hammaddesi; mercan, foraminifera ve yumuşakçalar gibi deniz canlılarının iskelet parçalarından oluşmuş, bir karbonat tortul kayaç olan kireç taşıdır (Kalker). Genellikle renkleri beyazdır fakat domolit gibi magnezyum karbonat (MgCO_3) içeren kireç taşlarından elde edilen kireçler ise nispeten sarı renkli olabilmektedir.

Kireç taşının 900°C 'de ısıtılma işlemi görmesi (kalsinasyon) ile elde edilen ürünler ve bu reaksiyon Bağıntı 1.1'de verilmektedir.



Kireç taşının Bağıntı 1.1'deki gibi kalsine edilmesi sonucunda sönmemiş kireç (kalsiyum oksit (CaO)) ve karbondioksit (CO_2) ürünleri elde edilmektedir. Sönmemiş kirece Bağıntı 1.2'deki gibi su ilave edildiğinde büyük bir ısı ($300\sim 400^\circ\text{C}$) açığa çıkmakta ve kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ürünü oluşmaktadır. Bu işleme kirecin söndürülmesi işlemi ve elde edilen kalsiyum hidroksit ürününe ise sönmüş kireç adı verilmektedir (Baradan, 2000).



Zeminlerin kireç ile stabilizasyon işlemlerinde sönmemiş kirecin daha çok, iri taneler içeren, ıslak ve doymuş zeminlerde tercih edildiği; sönmüş kirecin ise killi ve siltli zeminler

için uygun olduğu yapılan çalışmalarda görülebilmektedir. Ayrıca literatüre bakıldığında, zemin stabilizasyonunda sönmemiş kirecin, sönmüş kireç ile kıyaslandığında daha etkili sonuçlar verdiğini gösteren çalışmalara da rastlanmaktadır. Bu yüzden uygulamada sönmemiş kirecin sönmüş kirece oranla daha az kullanılması yeterli olmaktadır. Tablo 1.7’de zemin türlerine göre yeterli kireç oranları verilmektedir (Nelson ve Debora, 1992).

Tablo 1.7. Değişik zemin türleri için yaklaşık kireç miktarı (Nelson ve Debora, 1992).

Zemin türü	Tavsiye edilen yaklaşık kireç oranı (%)	
	Sönmemiş kireç	Sönmüş kireç
Killi çakıl	2-3	2-4
Siltli kil	3-8	5-10
Kil	3-6	3-8

Sönmemiş kireç, yakıcı ve tehlikeli olabileceğinden inşaat ekipmanlarının korozyona uğraması, arazide bu işlemi uygulayan personelin vücudunda deri yanması gibi bazı olumsuz ve zararlı etkiler gösterebilmektedir. Ayrıca depolama, taşıma ve uygulama aşamalarında sönmemiş kireç havadaki nem ile kolayca reaksiyona girebilmektedir. Bu reaksiyon sonucunda kalsiyum oksit miktarı azalabilmekte ve istenilen iyileştirme etkinliğinde azalma meydana gelebilmektedir. Bu yüzden kireç ile stabilizasyon işlemlerinde genellikle sönmüş kireç tercih edilmektedir. Yine de arazide stabilizasyon işlemini uygulayacak olan personelin uzun süreli temastan kaçınması gerekmektedir.

Kireç stabilizasyonu genellikle bir miktar kil ve silt içeren, plastisite indisi (I_p) %10 ile %50 arasında olan zeminler için uygundur. Kireç, kil ya da silt gibi ince taneler ile reaksiyona girerek zeminin plastisitesinin düşmesine, şişme/ büzülme potansiyelinin azalmasına, mukavemetinin, durabilitesinin ve işlenebilirliğinin artmasına neden olmaktadır. Kumlu zeminlerde ise reaksiyona gireceği silika miktarının yetersiz olmasından dolayı iyi sonuçlar vermemektedir. Ayrıca zeminde bulunan organik madde miktarı da stabilizasyonu olumsuz etkilemektedir. Bu yüzden kireç ile zemin stabilizasyonu, organik maddenin kireç reaksiyonlarını durdurucu etkisi olduğundan dolayı organik madde içeriği %5’in üzerinde olan zeminler için önerilmemektedir (Arman ve Moonfish, 1972).

Yukarıda bahsedildiği gibi plastisitesi düşük olan ya da plastik olmayan zeminlerde tek başına kireç kullanımı genellikle tatmin edici sonuçlar vermemektedir. Bu durumda

puzolan ilavesi, kireç ile reaksiyonu kolaylaştırmaktadır. İri taneli ya da çok az ince tane içeren zeminlerde kireç-çimento-puzolan kombinasyonu daha etkili sonuçlar vermektedir. Puzolan, çimento gibi silis ve alümina bakımından zengin olduğu için kireç ve su karışımı ile reaksiyona kolaylıkla girebilmekte ve mukavemeti artırabilmektedir (Chu ve Kao, 1993; Dawson vd., 1995; Ferguson, 1993; Miller ve Azad, 2000; Rahman, 1986; Sezer vd., 2006; Tsonis vd., 1983).

Killi zeminlere kireç katkısı, zeminlerin plastisite indislerinde azalmalar meydana getirmektedir. Genellikle kireç katkısında, montmorillonit, illit gibi tabakalı kil mineralleri içeren zeminlerin likit limitlerinde (w_L) bir miktar azalış, plastik limitlerinde (w_P) ise önemli artış gözlemlenmektedir. Kaolonit grubu kil minerali ya da kuvars gibi mineraller içeren zeminlerin ise likit limitlerinde (w_L) ve plastik limitlerinde (w_P) bir miktar artış meydana gelmektedir (Bell, 1996).

Kireçli zeminlerin geçirimsizliğinde artışlar, şişme parametrelerinde ise azalmalar gözlemlenmektedir (Evans ve Bell, 1981; Güney vd., 2007). Ayrıca Eades ve Grim (1960) yaptıkları çalışmada artan kireç oranına göre zeminlerin serbest basınç mukavemetlerinde %200 ile %1000 oranında artışlar gözlemlenmiştir (TRB, 1987).

Kireç miktarı arttıkça zemine ait maksimum kuru birim hacim ağırlık azalırken optimum su içeriğinde bir artış gözlemlenmektedir. Kompaksiyon parametreleri olan maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği, zeminin özgül ağırlığına ve tane çapı dağılımına bağlı olarak değişebilmektedir. Zemine eklenen kireç, zemin taneciklerini sarmakta ve kapladığı hacmi artırmaktadır. Ayrıca çoğu katkı malzemesinin (çimento hariç) özgül ağırlıkları zeminin özgül ağırlığından düşüktür. Bu yüzden genelde kireç miktarı arttıkça zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığı azaltılmaktadır (Ola, 1978; Lees vd., 1982; Rahman, 1986). Optimum su içeriğinde meydana gelen artış ise genellikle zemine eklenen katkı malzemesi ile zemin arasında oluşan puzolanik reaksiyon ile ilişkilendirilmektedir (Manasseh ve Olufemi, 2008).

Kireç ile iyileştirilen zeminler kısa bir süre içerisinde mukavemet kazanmaya başladıklarından dolayı karışımdan sonra yaşanacak gecikmeler sıkıştırma zorluklarına neden olmakta; bundan dolayı zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığında azalmalar meydana gelebilmektedir. Bu nedenle kireç ve su ilave edilmesinden en fazla yarım saat içerisinde zeminin kompaksiyon işlemi başlatılıp kısa bir süre içerisinde tamamlanması önerilmektedir. Ayrıca sönmemiş kirecin su ile reaksiyonunda yüksek ısı açığa çıkmakta ve su içeriğinde bir azalma meydana gelmektedir. Stabilizasyon işleminde sönmemiş kireç

uygulanıyor ise bu durumun yaşanmaması için kompaksiyon çok hızlı gerçekleştirilip küre tabi tutulması gerekmektedir (Quigley, 1975).

Kireç ile stabilizasyonda kullanılması gereken kireç miktarı genellikle laboratuvar deneyleri ile tespit edilmektedir. Eades ve Grim (1960)'e göre kil türüne bağlı olarak kaolin tipi killeri için zeminin kuru ağırlığının %4~%8, illit ve montmorillonit tipi killeri için ise %8 oranın sönmüş kireç ideal olmaktadır.

Ola (1978) özellikle killi zeminlerde %8 oranına kadar eklenen kirecin zeminin mukavemetinde bir artışa neden olduğu fakat bu oranın üzerinde eklenen kirecin ise mukavemeti fazla etkilenmediğini ortaya koymuştur. Ayrıca diğer araştırmacıların elde ettiği verilere göre kireç oranının belirli bir değerin üzerine çıkması durumunda, zemin mukavemetinde artmadan ziyade azalma meydana gelmektedir.

Araştırmacılar optimum kireç oranının tayini için zeminin pH değerine bağlı olan bir yöntem geliştirmişlerdir. ASTM D6276' da tanımlanan bu yöntemde kireç ilaveli zeminin pH değerini 12.4'e denk getiren kireç miktarı, optimum kireç miktarı olarak seçilebilmektedir. Bu yöntem ile ilgili genel bilgiler Bölüm 2'de sunulmaktadır. Ayrıca her zemin için bir kireç doygunluk derecesi bulunmaktadır. Bu doygunluk derecesine kadar eklenen kireç ancak katyon değişimi, yumaklaşma ve agregasyon aşamaları için gereken kireci karşılamaktadır. Bu oranın üzerine eklenen kireç ise çimentolaşma reaksiyonları oluşturmakta ve zeminin zamanla mukavemetini artırmaktadır (Al-Rawas vd, 2002; Mathew ve Rao, 1997).

Killi zeminlere kireç ilave edildiğinde suyun mevcudiyetine bağlı olarak zeminin özelliklerini iyileştiren birtakım reaksiyonlar meydana gelmektedir. Bu reaksiyonlar, yukarıda da bahsi geçen katyon değişimi, yumaklaşma, agregasyon ve çimentolaşma reaksiyonları olarak sıralanabilmektedir (Al-Rawas vd., 2005; Sherwood, 1993).

1.3.2.4. Puzolanlar ile Stabilizasyonu

Puzolanlar, yalnız başına kullanıldıkları zaman bağlayıcılık özelliği göstermeyen ya da çok az gösterebilen; yüksek oranda silisyum dioksit, alüminyum oksit ve demir oksit gibi bileşikler içeren doğal ya da endüstriyel malzemelerdir. Yüksek miktarda kalsiyum oksit (CaO) içeren birincil bağlayıcılar ile kıyaslandığında puzolanlar; yapılarında kalsiyum oksit (CaO) miktarı düşük, silisyum dioksit ve alüminyum oksit miktarının yüksek olmasından dolayı ikincil bağlayıcılar olarak isimlendirilmektedir.

Puzolanlar, su ve kalsiyum hidrat (Ca(OH)_2) içeren bağlayıcılar ile karıştırıldıklarında reaksiyona girerek kalsiyum alümina hidrat (CAH), kalsiyum silika hidrat (CSH) ve kalsiyum alümina silika hidrat (CASH) gibi hidratasyon ürünleri meydana getirebilmektedir.

Puzolanların kalsiyum hidrat (Ca(OH)_2) ile ne kadar iyi reaksiyon verdiğini tanımlamak için kullanılan terime puzolanik aktivite denilmektedir. Silisyum dioksit, alüminyum oksit gibi bileşiklerin kalsiyum oksit ve su ile yapmış olduğu hidratasyon reaksiyonu sonucunda meydana gelen hidratasyon ürünü ne kadar fazla olması puzolanik aktivitenin o derecede yüksek olması ile yorumlanmaktadır.

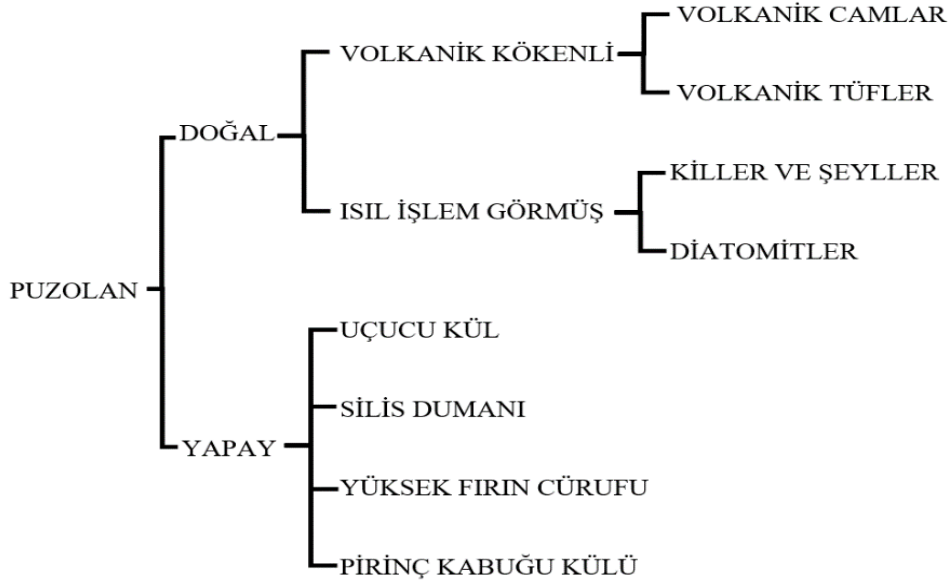
Puzolanik aktivite, puzolanların inceliği, silisli ve alüminli oksit içeriği ve bu oksitlerin kristal veya amorf gibi yapılarda olmalarına göre değişiklik gösterebilmektedir. Kristal yapıda bulunan oksitler, amorf yapıda olmalarına kıyasla daha az reaksiyon gösterdikleri yapılan çalışmalarda gözlemlenmiştir. Puzolanların incelikleri de puzolanik aktiviteyi artırmaktadır. Ayrıca sıcaklık gibi faktörler de puzolanik aktiviteyi etkilemektedir.

Silisyum dioksit, alüminyum oksit ve demir oksit gibi mineraller, çok yüksek sıcaklıklarda ergime durumuna gelmekte (örneğin volkanik olaylar) ve ani soğumalar sonucunda amorf (camsı) yapıya dönüşmektedir (Akman ve Esenli, 1992). Bu yüzden doğal puzolanlar, amorf yapıda mineral içeriklerinin az olması durumunda çok yüksek sıcaklıklara tabi tutularak kristal yapılarının amorf yapıya dönmeleri sağlanmakta ve puzolanik aktiviteleri artırılmaktadır.

Puzolanların minimum puzolanik aktivite değeri ASTM C618’de tanımlanmaktadır. Puzolanik aktivite deneyi ise; kireç, standart kum ve su ile hazırlanan kontrol numunesi ile kireç, standart kum, puzolan ve su ile hazırlanan deney numunesinin 7 ve 28 günlük kür süresi sonundaki basınç dayanımlarının oranı olarak tanımlanmaktadır.

Puzolanların iyileştirme mekanizması, Kireç ile Zemin Stabilizasyonu bölümünde (Bölüm 1.3.2.3.) tanımlanan mekanizmaya benzer özellik göstermektedir. Bu mekanizmada tanımlanmış olan katyon değişimi, yumaklaşma ve agregasyon mekanizmalarında kireç ve çimento gibi kalsiyum içerikli bağlayıcılar önemli rol oynarken puzolanlar daha çok çimentolaşma mekanizmasında hidratasyon ürünlerinin oluşumunda yer almaktadır.

Puzolanların sınıflandırılması birçok araştırmacıya göre farklılık gösterebilmektedir. En yaygın olan sınıflandırmada puzolanlar yapay ve doğal puzolanlar olarak ikiye ayrılmaktadır (Şekil 1.5).



Şekil 1.5. Pozolanların sınıflandırılması

1.3.2.4.1. Doğal Pozolanlar

Doğada kendiliğinden oluşan, yüksek miktarda silikat ve alüminat içeren, volkanik kökenli kayalara ve de ısıtılma tabi tutulmuş kil, şeyl, diatomit gibi malzemelere doğal pozolanlar adı verilmektedir. Genellikle bloklar halinde bulunduklarından dolayı kullanımdan önce öğütülmeleri ve ince taneli hale getirilmeleri gerekmektedir.

Volkanik kökenli doğal pozolanlar, magmanın püskürmesi sonucu oluşmaktadır. Magma şiddetli püskürdüğü zaman pozolanik aktivitesi yüksek camlı malzemeler oluşmaktadır. Daha düşük şiddette püskürmesi sonucu ise volkanik küller meydana gelmekte ve bu küllerin yeryüzünde birikmesiyle oluşan kayalara tuf adı verilmektedir. Volkanik tüfler içeriğinde daha az amorf yapıda mineral barındırdıklarından dolayı volkanik camlara kıyas ile daha düşük pozolanik aktiviteye sahiptir (Erdoğan, 2003).

Killer genellikle plaka veya çubuk şekline sahip ve boyutları 0,002 mm'den daha düşük tanelerden meydana gelmektedir. Genellikle kayaların fiziksel ve kimyasal ayrışması sonucu oluşmaktadır. Şeyller ise genellikle killer ile benzer içeriğe sahip fakat su içerikleri killere kıyas ile daha düşüktür. Killer ve şeyller kristal yapıda olduklarından dolayı pozolanik özellik göstermemektedirler. Ancak 700°C~900°C arasında ısıtılma tabi tutulup öğütüldüklerinde pozolanik özellik kazanmaktadırlar. Isıl işlem, killerin ve şeyllerin kristal yapısını bozup yarı amorf ya da bozulmuş alümina silikat yapısına dönüştürmektedir (Gündeşli, 2008).

Bir diğerk doğalk puzolan ise diatomitlerdir. Diatomit, hücre duvarı, opal ve hidrate silikadan oluşank, mikroskobik ölçekli tek hücreli su canlısı olan diatomların kalıntılarından meydana gelen tortul kayaçlardır. Diatomitlerin puzolanik aktivitesi, içerdiki silika miktarıyla doğrudan ilişkilidir. Diatomitlerin yüksek miktarda kil, kalker, kuvars ve volkanik küllerle ile beraber bulunması (amorf yapıda silikanın azalması, yerine kristal yapıda bulunan minerallerin artması) puzolanik aktiviteyi olumsuz etkilemektedir. Bu yüzden diatomitlerin 760°C~1100°C gibi yüksek sıcaklıklara tabi tutulup öğütölmesiyle puzolanik aktivitesi artırılmaktadır (Ramachandran, 1995).

Tablo 1.8’de doğalk puzolanların ihtiva ettiiki bazı önemli oksitlerin yaklaşık oranları verilmektedir. Bu tablodan anlaşılabacağı gibi doğalk puzolanlar yüksek oranda SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ oksitleri içermektedirler. Ayrıca %22 oranında CaO içeren pişmiş kiler tek başına da bir miktar bağlayıcı özelliğe sahiptir (Erdoğan, 2003).

Tablo 1.8. Doğalk puzolanların kimyasal bileşiminde bulunan bazı önemli oksitler (Erdoğan, 2003).

	Volkanik cam	Volkanik tüf	Diatomit	Pişmiş kil	Pomza taşı
SiO ₂ (%)	65.1	52.1	86.0	42.2	60.5
Al ₂ O ₃ (%)	14.5	18.3	2.3	16.1	17.2
Fe ₂ O ₃ (%)	5.5	5.8	1.8	7.0	3.4
CaO (%)	3.0	4.9	-	21.8	4.2
MgO (%)	1.1	1.2	0.6	1.9	2.1

1.3.2.4.2. Yapay Puzolanlar

Yapay puzolanlar genellikle silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel yan ürünlerdir. Ayrıca pirinç kabuğu gibi zirai yan ürünlerin külleri de yapay puzolan olarak değerkendirilmektedir. Silisyum dioksit, alüminyum oksit ve demir oksit gibi oksitleri yüksek oranda içermeleri hususunda doğalk puzolanlarla aralarında bir fark yoktur. Yapay puzolanların tek farkı doğada doğalk halde bulunmayışları ve genelde endüstriyel yan ürün (sanayi atığı) olmalarıdır. Bu tür yan ürünlerin çevreye verebileceiki potansiyel zararlardan dolayı çeşitli kullanım alanlarında değerkendirilmeleri, hem doğaya he de ekonomiye katkı sağlamaktadır.

Silis dumanı, ergime yöntemiyle silisyum metalinin ya da silisyum metal alaşımlarının üretimi sırasında ortaya çıkan bir yan üründür. Silis dumanı; özgül ağırlığı 2.2~2.3 arasında 1 µm'den küçük, amorf, küresel silis partiküllerinden oluşur ve yüksek puzolanik özelliğe sahiptir. Yüksek saflıktaki kuvarsın 2000°C'de indirgeme işlemiyle silisyum metali ve alaşımları elde edilmektedir. Bu uygulama esnasında yüksek oranda silisyum oksit (SiO) içeren gazlar ortaya çıkmakta ve silisyum oksitin oksijen ile teması ve hızlı bir şekilde soğutulmasıyla amorf yapıdaki silisyum dioksit (SiO₂) partikülleri oluşmaktadır. Bu partiküllerin filler filtrelerden geçirilmesi ile de silisyum dumanı elde edilmektedir (Yeğinobalı, 2003). Tablo 1.9'da ABD, Norveç ve Türkiye'de elde edilen silis dumanına ait içerikler verilmektedir (Erdoğan, 2003). Türkiye verileri Antalya Ferrosilikon fırınından elde edilen verileri göstermektedir.

Tablo 1.9. Farklı ülkelerden elde edilen silis dumanının kimyasal içerikleri (Erdoğan, 2003).

	ABD	Norveç	Türkiye
SiO ₂ (%)	90.0-93.0	90.0-96.0	93.0-95.0
Al ₂ O ₃ (%)	0.5-1.6	0.5-3.0	0.4-1.4
Fe ₂ O ₃ (%)	0.4-0.7	0.2-0.8	0.4-1.0
CaO (%)	0.5-0.8	0.1-0.5	0.6-1.0
MgO (%)	0.3-0.5	0.5-1.5	0.6-1.0
K ₂ O (%)	1.0-1.2	0.4-1.0	0.5-1.0
Na ₂ O (%)	0.1-0.3	0.2-0.7	0.1-0.4

Pirinç kabuğu, çeltik üretimi sonucunda elde edilen bir zirai yan üründür. Pirinç kabuğunun yapısında yüksek miktarda SiO₂ (silisyum dioksit) bulunmaktadır. Pirinç kabuğunun yakılmasıyla elde edilen kül hızlı soğutulursa amorf SiO₂, yavaş soğutulmasıyla kristal yapıda SiO₂ meydana gelmektedir. Amorf yapıda SiO₂ içeren pirinç kabuğu külünün özgül yüzey alanı büyük olduğundan dolayı puzolanik aktivitesi de yüksektir (Mazlum, 1989).

Uçucu küller, termik santrallerde elektrik üretimi için kullanılan pulverize fosil yakıtlarının (linyit, kömür, taş kömürü vb.) yakılması sonucu oluşan atıklardan elde edilmektedir. Termik santrallerde yakılan yakıt atıklarının bir kısmı tabanda birikmekte,

büyük bir kısmı ise (yaklaşık %80) gaz ve toz halinde bacalardan atmosfere doğru sürüklenirken siklon ya da elektro filtreler yardımıyla kül halinde toplanmaktadır. Çapları 0.5~150 µm arasında değişen ince partiküllerden oluşan bu küller “uçucu kül” ya da “pulverize atık külü” olarak adlandırılmaktadır (Erdoğan, 2003). Yakılan pulverize yakıtın kaynağına ve bileşimine bağlı olarak uçucu külün içeriği değişmekte olup tüm uçucu küller önemli miktarda SiO₂ (silisyum dioksit), Al₂O₃ (alüminyum oksit) ve CaO (kalsiyum oksit) içermektedir.

ASTM C618’de uçucu küller, “F ve C sınıfı uçucu küller” olarak iki grupta sınıflandırılmaktadır. Bileşenlerinde toplam SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ miktarı %70’ten fazla, CaO içeriğinin ise %10’dan az olduğu durumlarda uçucu küller “F sınıfı uçucu kül” olarak adlandırılmaktadır. Bu tip uçucu küller sadece puzolanik özelliğe sahiptir. Bileşenlerinde toplam SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ miktarı %50’den ve CaO içeriğinin ise %10’dan fazla olan uçucu küllere ise “C sınıfı uçucu kül” adı verilmektedir. C sınıfı uçucu küller birincil bağlayıcı olarak da kullanılabilir.

Kullanılan yakıtın türüne ve yanma sıcaklığına bağlı olarak uçucu küllerin ve taban külünün kimyasal içerikleri farklılık gösterebilmektedir. Tablo 1.10’da F ve C sınıfı uçucu küle ve taban külüne ait yaklaşık kimyasal içerikler verilmektedir (Alataş, 1996).

Tablo 1.10. Uçucu kül ve taban külünün kimyasal içeriği (Alataş, 1996).

	Uçucu kül		Taban külü
	F sınıfı	C sınıfı	
CaO (%)	0.7-6.7	11.5-29.0	0-22
SiO ₂ (%)	43.6-64.4	23.1-50.5	21-60
Al ₂ O ₃ (%)	19.6-30.1	13.3-21.8	10-37
Fe ₂ O ₃ (%)	3.8-30.1	3.7-22.5	5-37
MgO (%)	0.9-1.7	1.5-7.5	0-4
SiO ₃ (%)	0.4-7.2	0.3-1.9	-

Yüksek fırın cürufu ise demir çelik sanayisinin yan ürünüdür ve kalsiyum oksit ile reaksiyona girebildiği için yapay puzolan olarak isimlendirilmektedir.

Demir cevherleri doğada oksit olarak bulunmaktadır. Ayrıca demir cevherlerinde bir miktar silis, alümin, kükürt, fosfor, mangan gibi yabancı maddeler de yer almaktadır. Demir

elde etmek için demir cevherleri yüksek fırın olarak isimlendirilen fırınlarda, yüksek sıcaklıklarda (1600°C) ergitilerek oksijen ve yabancı maddelerden ayrıştırılmaları gerekmektedir. Bu işlemde yakıt olarak kok kömürü kullanılmakta ve ayrıştırmayı kolaylaştırması için de kalker taşı da demir cevheriyle beraber ısıtılmaktadır. Cevherde bulunan oksijen, kok kömüründe var olan karbon ile birleşerek karbon monoksit (CO) ya da karbondioksit (CO₂) olarak fırından uzaklaşmakta, geride eriyik halde demir ve CaO, SiO₂, MgO, MnO, S gibi yabancı maddeler kalmaktadır. Eriyik durumda bulunan demirin yoğunluğu daha ağır olduğundan alt tarafta toplanırken diğer yabancı maddeler yüzeyde kalmaktadır. Farklı kanallar yardımıyla demir ayrıştırıldıktan sonra geriye kalan atık malzemeye ise yüksek fırın cürufu adı verilmektedir.

Yüksek fırında atık malzemesi olarak ayrıştırılan eriyik durumdaki cüruf yaklaşık 1500°C sıcaklıktadır. Bu eriyiğin, havada yavaş bir şekilde soğutulmasıyla kristal yapılı cüruf elde edilmekte; ani bir şekilde suda soğutulması durumunda ise cüruf amorf bir yapı almaktadır. Ani soğutulması durumunda farklı boyutlarda oluşan cüruf öğütüldükten sonra yapay puzolan olarak kullanılabilir. Ayrıca içerisinde yüksek miktarda CaO bulunmasından dolayı kendiliğinden bir miktar bağlayıcı özelliği de bulunmaktadır. Değişik ülkelere göre yüksek fırın cürufunun kimyasal içerikleri Tablo 1.11’de gösterilmektedir (Erdoğan, 2003).

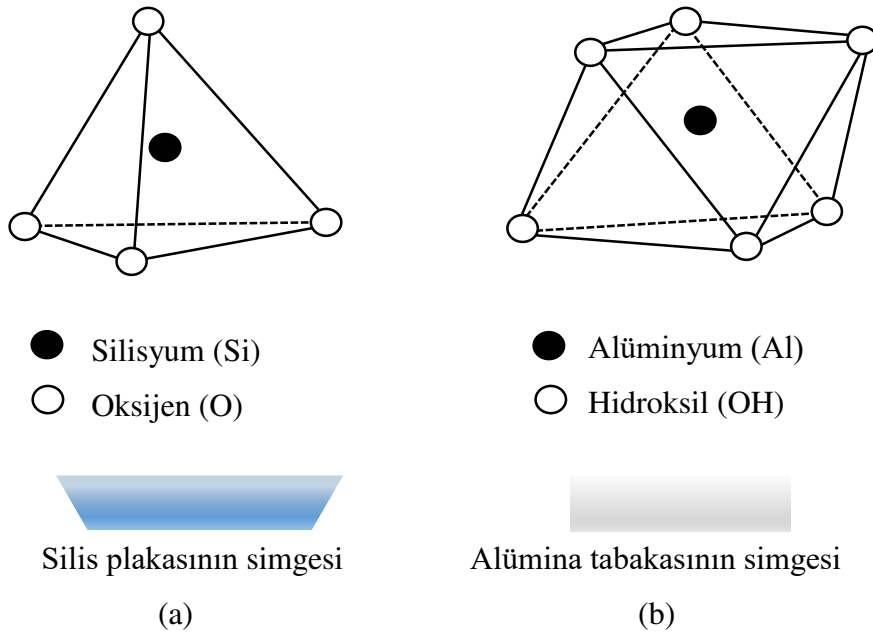
Tablo 1.11. Farklı ülkelere elde edilen yüksek fırın cürufunun kimyasal içerikleri (Erdoğan, 2003).

	ABD	Güney Afrika	Avusturalya	Türkiye
CaO (%)	29-50	30-40	39-44	34-41
SiO ₂ (%)	30-40	30-36	33-37	34-36
Al ₂ O ₃ (%)	7-18	9-16	15-18	13-19
Fe ₂ O ₃ (%)	0.1-1.5	-	0-0.7	0.3-2.5
MgO (%)	0-19	8-21	1-3	3.5-7
MnO (%)	0.2-1.5	-	0.3-1.5	1.0-2.5
S (%)	0-2.0	1.0-1.6	0.6-0.8	1-2

1.4. Kil Mineralleri ve Kireç ile Reaksiyonu

Killer, kayaların kimyasal ayrışması sonucu oluşmuş, yassı biçimli (plaka, yaprak, iğne vb.), 0.002 mm'den küçük olan ince taneli, kohezyonlu zeminlerdir. İnce taneli yapıdan meydana geldikleri için özgül yüzey alanları yüksek olmakta ve bundan dolayı da kütle kuvvetleri yerine yüzey kuvvetleri daha etkili olmaktadır. Bu tarz cisimlere kolloit adı verilmektedir. Yapıları itibarıyla killer su emme özelliğine sahiptir. Bu nedenle daima nemlidir. Su aldıklarında bir miktar şişebilmekte, kurutulduklarında da büzülebilmektedir. Ayrıca su aldığı anda fazla şişebilen kil mineralleri de vardır. Islak iken ise plastik özellik göstermekte ve kolayca şekil alabilmektedir. Bu özelliği killerin plakalı yapıda olması ve bu plakaların su sayesinde birbiri boyunca kayma özelliğine dayandırılmaktadır. Killer kurutuldukları ya da pişirildiklerinde çok sertleşmektedir. Suyu ve elektriği geçirmez ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklıdır.

Killer alüminyum (ve veya demir, magnezyum vb.) silikatlarıdır. Dört oksijen (veya hidroksil) ile bir silisyum atomundan oluşan silis düzgündörtüyüzlüsü (tetrahedron) (Şekil 1.6a) yan yana dizilerek silis plakasını ve altı hidroksil bir alüminyum atomundan oluşan alümine düzgünaltıyüzlüsü de yan yana dizilerek alümina plakasını oluşturmaktadır. (oktahedral) (Şekil 1.6b). Bu plakalar birbirlerine 2:1, 2:1:1, 1:1 gibi farklı oran ve dizilim ile birbirlerine bağlanarak kil tabakalarını oluşturmaktadır.



Şekil 1.6. Silis düzgündörtüyüzlüsü ve alüminyum düzgünaltıyüzlüsü

Killer, karbonasyon, hidratasyon, oksidasyon, hidroliz ve solisyon gibi farkı etkilere maruz kalan silikat minerallerinden; feldspatların, piroksenlerin ve amfibollerin ayrışması sonucu oluşmaktadır. Killerin oluşum sürecinde iklim koşulları, ortamın pH'ı (alkalin ya da asidik), ortamdaki katyon cinsi ve miktarı farklı yapıda ve mineralojide killerin meydana gelmesine yol açmaktadır. Ortamın alkaline oluşu ve yüksek miktarda K^+ , Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} iyonları içermesi; illit, montmorillonit gibi üç plakalı (2:1) ve klorit gibi dört plakalı (2:1:1) kil mineralinin oluşumunda etkili olmaktadır. Eğer ortamda K^+ iyonu fazla ise illit minerali, Mg^{+2} iyon fazla ise montmorillonit minerali, eğer Mg^{+2} iyonu çok fazla ise klorit minerali oluşmaktadır. Ortamın asidik olması durumunda ise ayrışma ürünlerinin hızla ortamdaki kaybolmasına neden olur ve serbest kalan silis asidi ile ortamda bulunan K^+ , Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} iyonları tarafından kaolinit gibi iki plakalı (1:1) mineraller meydana gelmektedir (Aras, 2004).

Doğada 20'den fazla farklı kil minerali bulunsa da genel itibariyle dört mineral öne çıkmaktadır. Tablo 1.12'de dört farklı kil mineralinin oluşum koşullarına ait bilgiler verilmektedir.

Tablo 1.12. Kil minerallerinin kaya ve iklim şartlarına göre oluşumu (Lambe, 1960).

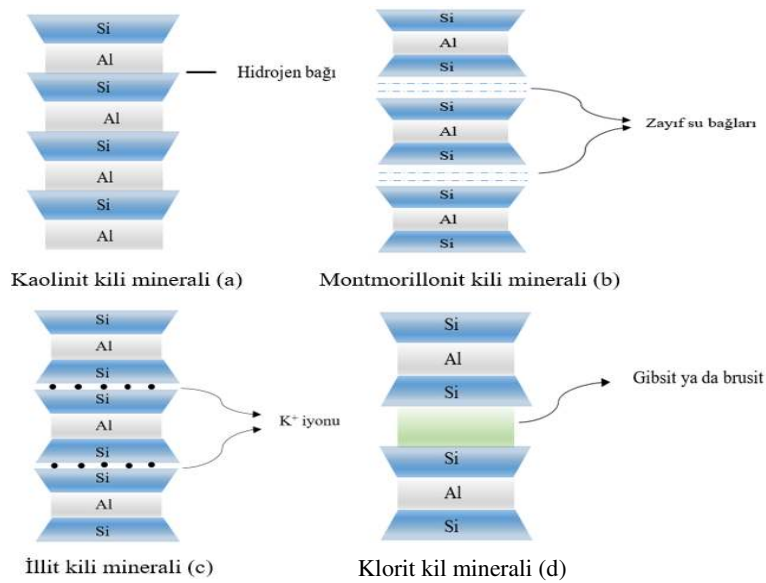
Kil Minerali	Oluşumu
Kaolinit	Tropik ve astropik alanlarda volkanik kökenli kayaların aşınması sonucu oluşur.
Klorit	Metamorfik ana kaya alanlarında, genellikle deniz tortularında ve çökelti kayalarda oluşur.
İllit	Çökelti kayaların sıcak ve kurak bölgelerde ayrışması sonucu oluşur.
Montmorillonit	Volkanik kül ve kayaların zayıf drenaj koşullarından dolayı aşınması sonucu, genellikle kurak alanlarda illit ile beraber bulunur.

Kaolinitler feldspatça zengin magmatik kayaların parçalanması sonucu oluşan iki tabakalı alümina silikatlarıdır. Genel formülü $Al_2Si_2O_5OH_4$ olarak verilebilmektedir (Uddin, 2008). İki tabakalı alümina silikatlar birbirlerine kuvvetli hidrojen ve Van der Waals bağlarıyla bağlı oldukları için su molekülleri bu alümina silikatlar arasına kolaylıkla girememektedir (Şekil 1.7a). Bu durumdan dolayı kaolinit kil minerallerini düşük şişme potansiyeline ve orta plastisiteye sahiptir. Özgül ağırlıklar 2.6~2.8 arasında olup özgül yüzey alanları ise 10~20 m²/g arasında değişmektedir (Önalp, 2013).

Montmorillonit kil mineralleri, iki silis (tetrahedral), bir alümina (oktahedral) plakalarından oluşan üç tabakalı minerallerdir. Bu üç tabakadan oluşan yapı taşları birbirlerine zayıf su bağı ile bağlıdır. Ortamda fazla su bulunması durumunda, su molekülleri plakalar arasına girerek bu bağlar kolaylıkla kopabilmektedir (Şekil 1.7b). Bu özelliklerinden dolayı bu gruptaki killer yüksek şişme potansiyeline sahip olmakta ve kendi ağırlıklarının 20 katına kadar su tutabilmektedir. Genel formülü $(Ca,Na,H)(Al,Mg,Fe,Zn)_2(Si,Al)_4O_{10}.nH_2O$ olarak verilebilmektedir (Uddin, 2008). Özgül ağırlıklar 2.35~2.7 arasında, özgül yüzey alanları ise $50\sim800m^2/g$ arasındadır.

İllit kil minerali, montmorillonit kil mineraline benzer özellik göstermektedir. İki silikat bir alümina plakasından oluşan yapı taşları arasında K^+ iyonu olduğundan bu bağlar (Şekil 1.7c) montmorillonite göre daha zor kopmaktadır. Genel formülü $(K,H)Al_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2.nH_2O$ olarak verilmektedir (Uddin, 2008). Şişme potansiyeli olarak kaolin ile montmorillonit arasında değerlendirilmektedir. Özgül ağırlıkları 2.6~3.0 arasındadır. Özgül yüzey alanları ise $65\sim100 m^2/g$ 'dır (Önalp, 2013).

Klorit kil minerali bir silis, bir alümina, diğer bir silis plakasından sonra gipsit (Al) ya da brusit (Mg) levhalarından oluşmaktadır. Klorit minerali montmorillonit mineraline göre daha az aktiftir (Holtz ve Kovacs). Şekil 1.7-d'de klorit minerali plakaları görülmektedir. Klorit grubu killeri nispeten geniş olup kilden ziyade daha çok fillosilikat olarak değerlendirilmektedir. Bu grupta çok farklı mineraller yer aldığından genel bir formülü bulunmamaktadır (Uddin, 2008).



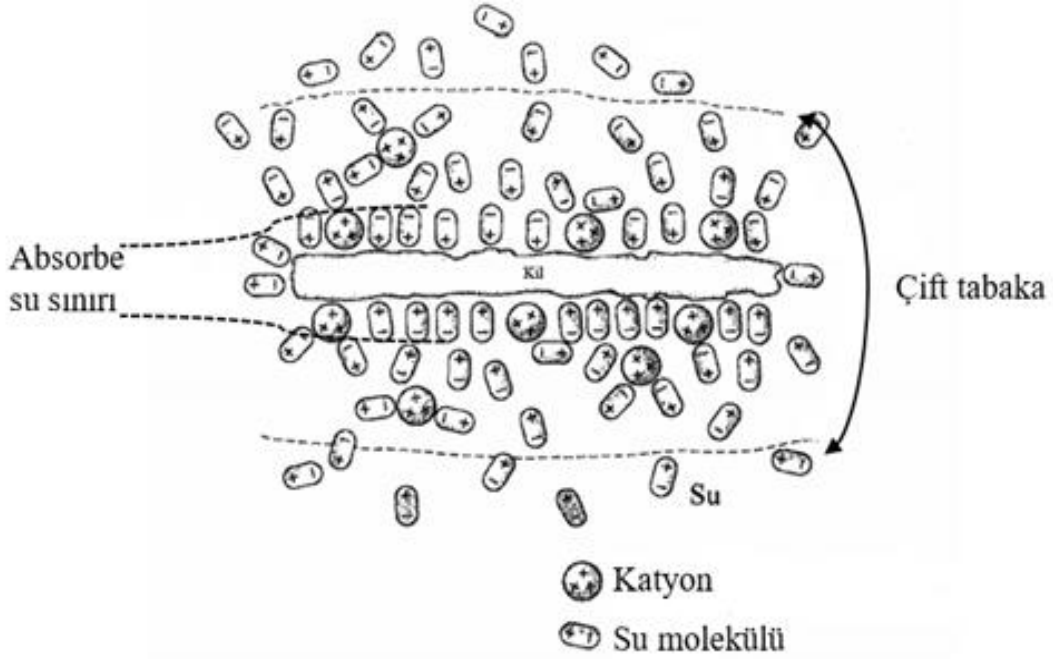
Şekil 1.7. Kaolinit, montmorillonit, illit ve klorit kili mineralleri

1.4.1. Katyon Değiştirme

Silis ve alümina plakalarından oluşan yapı taşlarının yan yana dizilmesi sonucunda, eni boyuna oranla çok küçük olan yassı kil taneleri oluşmaktadır. Oluşan bu kil tanelerinin geniş yüzeyleri negatif yük ile yüklü iken uç kısımları ortamın pH'ına bağlı olarak pozitif ya da negatif yüklü olabilmektedir. Geniş yüzeyin negatif yükü, alüminyum silikat kafeslerinin kırılması ya da kil tanesinin içerisinde bulunan Si^{+4} ile Al^{+3} veya Al^{+3} ile Mg^{+2} iyonlarının izomorf yer değiştirmesi sonucunda oluşmaktadır. Bu negatif yükler zemin içerisinde bulunan Na^+ , K^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2} gibi katyonları kendilerine çekmekte ve yüzeydeki negatif yükü dengelemektedir.

Ortamda suyun olması durumunda bir miktar alkali katyonlar su içerisinde çözünabilmekte ve kilin yüzeyinden uzaklaştıkları için tekrar kilin yüzeyi negatif olmaktadır. Bu negatif yüzey yükü, dipolar su molekülünün pozitif yüklü hidrojen atomunu kendine çekmekte ve kil ile su arasında hidrojen bağı kurulmaktadır. Hidrojen bağıyla bağlı bu su moleküllerine absorbe su adı verilmekte olup viskozitesi oldukça yüksektir. Absorbe su molekülleri yüzeye paralel olarak rahatlıkla hareket edebilmelerine karşın yüzeyden uzaklaşmaları hidrojen bağları tarafından engellenmektedir. Absorbe su ile normal suyu birbirinden ayıran terimsel sınıra ise absorbe su sınırı denilmektedir.

Katyonlar, negatif yüzey ile birbirlerini çekmeleri, aynı yüklü diğer katyonlar ile birbirinden uzaklaşmaya çalışmaları gibi iki ters etkiye maruz kaldıklarından dolayı kil yüzeyine yakın yerde bir katman oluşturmaktadır. Kil tabakasını saran absorbe su tabakasının ve kilin elektriksel etkisi altında kalan katyon bulutunun her ikisine birden çift tabaka adı verilmektedir (Şekil 1.8).



Şekil 1.8. Absorbe su sınırı ve çift tabaka

Kilin yüzeyinde ya da çift tabakada bulunan katyonlar kendilerinden daha yüksek değerlikli katyonlar ile yer değiştirme eğilimindedirler. Bu olaya katyon değişimi adı verilmektedir. Katyonlara ait değişim serisi $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{H}^+ < \text{K}^+ < \text{NH}_4^+ < \text{Mg}^{+2} < \text{Ca}^{+2} < \text{Al}^{+3} < \text{Si}^{+4}$ gibidir (Hanchanloet, 1999).

1.4.2. Kil ile Kireç Reaksiyonu

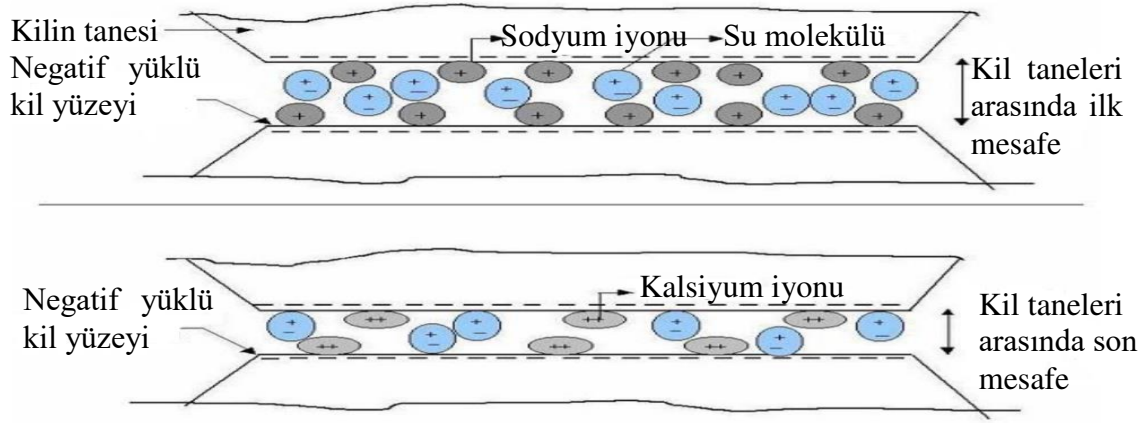
Killi zeminlere kireç ilave edildiğinde suyun mevcudiyetine bağlı olarak, zeminin özellikleri iyileştiren birtakım reaksiyonlar meydana gelmektedir. Bu reaksiyonlar katyon değişimi, yumaklaşma, karbonatlaşma ve çimentolaşma reaksiyonları olarak sıralanabilmektedir (Al-Rawas vd., 2005; Sherwood, 1993).

Zemine kireç katılması durumunda kireç su ile teması ettiğinde Bağntı 1.3'teki gibi iyonlarına ayrışmakta ve zeminde Ca^{+2} katyon miktarı artmaktadır. Ayrıca OH^- iyonları da ortamın pH değerini yükseltmektedir. Ortamın pH değerinin yükselmesi hem katyon değişimini hızlandırmakta hem de çimentolaşma reaksiyonun gerçekleşmesi için uygun ortam sağlamaktadır.



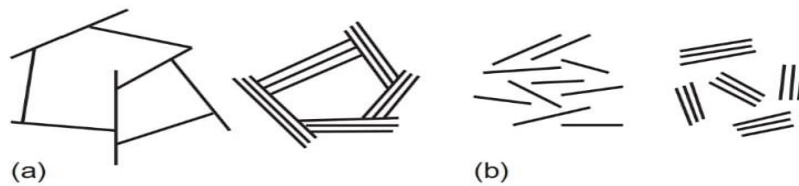
Kirecin ilavesi ile ortamda derişimi artan Ca^{+2} katyonları, zemin içerisinde bulunan Na^+ , K^+ , Mg^{+2} gibi katyonlar ile yer değiştirmektedir. Bu olaya katyon değişimi adı verilmektedir. Genellikle katyon değişimi birkaç saat içerisinde tamamlanmaktadır. Bu da kilin işlenebilirliğini artırmakta ve şişme-büzülmesi ve plastisitesinin azalmasını sağlamaktadır (Bell, 1996).

Katyon değişimi ile zeminde bulunan kil minerallerinin negatif yüzeylerinde Ca^{+2} katyonları aktif rol oynamaya başlamaktadır. Bu durum kil tanelerinin çift tabaka kalınlığının azalmasına yol açmakta ve yumaklaşma ve agregasyon olaylarını başlatmaktadır (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Kil tanelerinin birbirine yaklaşması (Yazıcı, 2004).

Çift tabaka kalınlığı azaldıktan sonra kil taneleri arasında bulunan itme kuvvetinde azalma meydana gelmekte; kil taneleri arasındaki mesafe kısaldığından dolayı kil taneleri arasında Van der Waals bağları oluşmaya başlamaktadır. Kireç ilave edilmeden önce disper (dağınık) yapıda olan kil taneleri (Şekil 10a), bu azalan itme kuvvetinden dolayı tanelerin pozitif uçları ile negatif yüzeyi birbirini çekmesi ile yumak (flok) hale (Şekil 1.10b) gelmektedir (Sumner ve Naidu, 1998).



Şekil 1.10. Yumak (a) ve disper (b) şekilde bulunan kil tanecikleri

Yumak yapıdaki taneler disper yapıya oranla birbirine daha da yaklaşmakta hatta temas bile etmektedir. Komşu kil tanelerinin yaklaştığı ve temas ettiği bu yüzey kesitlerinde kil taneleri, hidrojen ve Van der Waals bağları ile birbirine kenetlenerek büyük kümeler oluşturmaktadır. Bu olaya ise agregasyon adı verilmektedir.

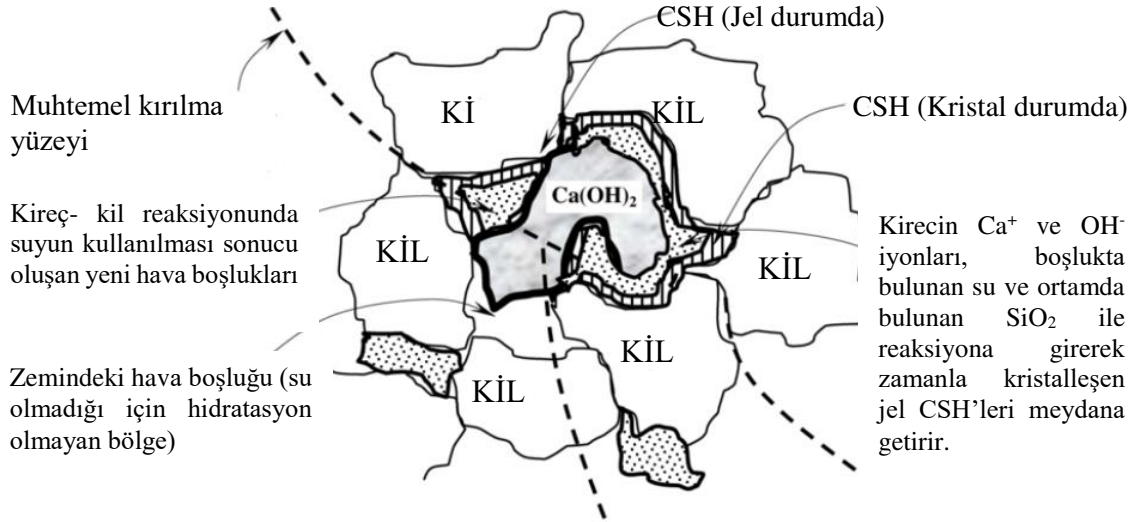
Yumaklaşma ve agregasyon işleminin sonucunda kil tanelerinin mikro yapısında ve efektif boyutlarında değişiklikler meydana gelmekte hatta bu durum killerin silt, kum gibi farklı zemin özellikleri gösteresine sebep olabilmektedir (İpek, 1998).

Bölüm 1.3.2.3'te optimum kireç oranının belirlenmesi verilmektedir. Bu oran, zemin optimum kireç oranıdır ve bu oran kadar eklenen kireç ancak katyon değişimi, yumaklaşma ve agregasyon aşamaları için gereken kireci karşılamaktadır. Bu oranın üzerine eklenen kireç ise çimentolaşma reaksiyonları oluşturmakta ve zeminin zaman ile mukavemetini artırmaktadır (Al-Rawas vd, 2002; Mathew ve Rao, 1997).

Optimum kireç miktarından fazla eklenen kireç iyonlaşmakta ve OH⁻ iyonu ortamın pH değerini 12.4'ün üzerine çıkartmaktadır. Bu pH değerinin üzerinde, kil minarelerinin bileşiminde bulunan SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ gibi oksitlerinde iyonlaşma meydana gelmektedir. Bu iyonlar ortamda bulunan Ca⁺² iyonu ile reaksiyona girerek (Bağıntı 1.4, 1.5, 1.6) kalsiyum silika hidrat (CSH), kalsiyum alümina hidrat (CAH), kalsiyum alümina silika hidrat (CASH) gibi çimentolaşma ürünleri meydana getirmektedir. Eğer ortamda SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ gibi oksitler fazla bulunmuyorsa zemine bir miktar puzolan eklenerek çimentolaşma reaksiyonu için gerekli oksitler sağlanabilmektedir (Atanur, 1973).



Zemine kireç ilave edildiği zaman katyon değişimi ve bunu takip eden yumaklaşma ve agregasyon süreçleri bir gün gibi kısa bir sürede tamamlanmakta iken çimentolaşma ürünleri olan CSH, CAH, CASH reaksiyonları uzun zaman almaktadır.



Şekil 1.11. Çimentolaşma mekanizması

1.5. Diatomit

Diatomitler, diatom (bacillariophyta) adı verilen, ökaryotik, tek hücreli, mikroskopik silisli alglerin fosilleşmiş silisli kabuklarından meydana gelen tortul kayaçlardır (Şekil 1.12). Yaşam döngüsünü tamamlaması ile diatomların organik kısmı çürüyerek kaybolmakta, silis kabukları ise bir araya toplanarak çökmekte ve bu çöktürler sertleşerek diatomit kayaçlarını (rezervini) oluşturmaktadır. Deniz, göl ve durgun nehir yataklarında çökelen bu rezervler, yer kabuğu hareketleriyle yükselerek beyaz görünümlü tepelikleri oluşturmaktadır. Kretasa çağında (135-165 milyon yıl önce) büyük miktarlara ulaşmaya başlayan diatomitler, Miyosen çağında (5-23 milyon yıl önce) ise meydana gelen volkanik faaliyetler sularadaki silis miktarını artırması diatomların yaşama ve çoğalmalarına uygun ortam sağladığı için günümüzdeki birçok diatomit yatakları bu çağda meydana gelmiştir. Genellikle volkanik sahaların yakınlığında bulunan diatomit rezervleri, daha sonra meydana gelen yer kabuğu hareketlerinden dolayı kırılma ve kirlenmelere uğramış ve çağlar boyunca bu rezervler kil, kalker, kuvars ve volkanik küllerle karışık ya da ardışık katmanlar oluşturmuşlardır (Özbey ve Atamer, 1987, Çetin ve Taş, 2012).



Şekil 1.12. Diatomit (URL-1).

Diaomitler, Almanca ve Fransızca literatürlerde “kieselgur- kieselguhr” olarak geçmektedir; İngilizce literatürlerde ise “diatomeaceous earth” ya da “diatomite” olarak isimlendirilmektedir. Ayrıca terrasilicea, moskof toprağı gibi farklı isimler ile de adlandırılmaktadır. Anadolu’nun bazı yörelerinde pekmez şirasının süzülmesinde kullanıldıkları için “pekmez toprağı” olarak da bilinmektedir. Kuzey İrlanda’da, Bann Nehri boyunca bulunan killi diatomitler “Bann kili” olarak isimlendirilmiştir. İskoçya’da Aberdeershire-Ballater yakınlarındaki turbaların altında bulunduğu için dolayısı bu diatomitlere “beyaz turba” adı verilmiştir. Danimarka’da bulunan, içeriğinde %20~25 kil ve tuf ihtiva eden diatomite ise “molar” adı verilmektedir (Çetin ve Taş, 2012).

1.5.1. Diatomitin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Dış görünüşü tebeşire benzeyen diatomitlerin 15 binden fazla çeşidine rastlanılabilmektedir. Işınsal ve bileteral simetri gösterebilen tekerlek, disk top, kayık, merdiven gibi şekillerde olabilen diatomların boyutları 2-200 µm arasında değişiklik gösterebilmekte ve bir inç küpte 40 milyon tane bulunabilmektedir. Saf halde beyaz renkte olan diatomit, içerisinde bulunan yabancı maddelere göre açık sarı, gri, bej gibi renklerde de

olabilmektedir. Organik madde miktarına bağılı olarak diatomitler yeşil, kahverengi tonlarında da olabilmektedir (Özbey ve Atamer, 1987).

Diatomların iskelet yapıları amorf silis-opalden ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) oluşmaktadır. Ayrıca bu opal, çeşitli oranlarda Al, Fe, Ca, Mg, Na, K elementlerinin silikatları ile de beraber bulunmaktadır. Bunun nedeni olarak diatomların yaşamını sürdürebilmesi için bu elementlere ihtiyaç duyduğu verilebilmektedir (Özbey ve Atamer, 1987). Diatomlar, yaşamlarını sürdürebilmek için silis kaynağına ihtiyaç duyduklarından, genellikle volkanik faaliyetlerin yüksek olduğu tatlı sularda, göllerde ve deniz sularında görülebilmektedir (Önem, 2000).

Gözenekli yapısından dolayı diatomitler yüksek poroziteye (%80~85) sahiptirler ve bu değer %95'e kadar ulaşabilmektedir. Porozif yapısından dolayı hem özgül yüzey alanı hem de su emme kapasitesi oldukça yüksektir. İşlenmemiş halde ağırlığının 3~4 katı, kalsinasyon işleminden sonra ise ağırlığının 5~10 katı su emebilmektedir. (Özbey ve Atamer, 1987).

Diatom kavkısının silika içeriğinden dolayı sertliği Mohs ölçeğine göre 4.5~6 olması beklenirken diatomit kayaçlarının kırılma yapısı ve kolay dağılıyor olmasından dolayı sertliği 1.5 olarak tanımlanmaktadır. Isıl iletkenlikleri oldukça düşüktür. Isıl iletkenliği 100-300°C'de 0.08 Kcal/m².C.h, 800 °C'de 0.10 Kcal/m².C.h ve 1200°C'de 0.11 Kcal/m².C.h'dır. Diatomitin erime noktası, saflığına bağılı olarak 1000~1590°C arasında değişiklik gösterebilmektedir (Bozkurt, 1997). Diatomit rezervinden çıkartıldığı zaman pH değeri 5~9 arasındadır (Özbey ve Atamer, 1987).

Diatomit rezervlerinin endüstriyel olarak kullanılabilmesi için içeriğinde bulunan bileşiklere ait sağlaması gereken bazı sınır değerleri Tablo 1.13'te verilmektedir.

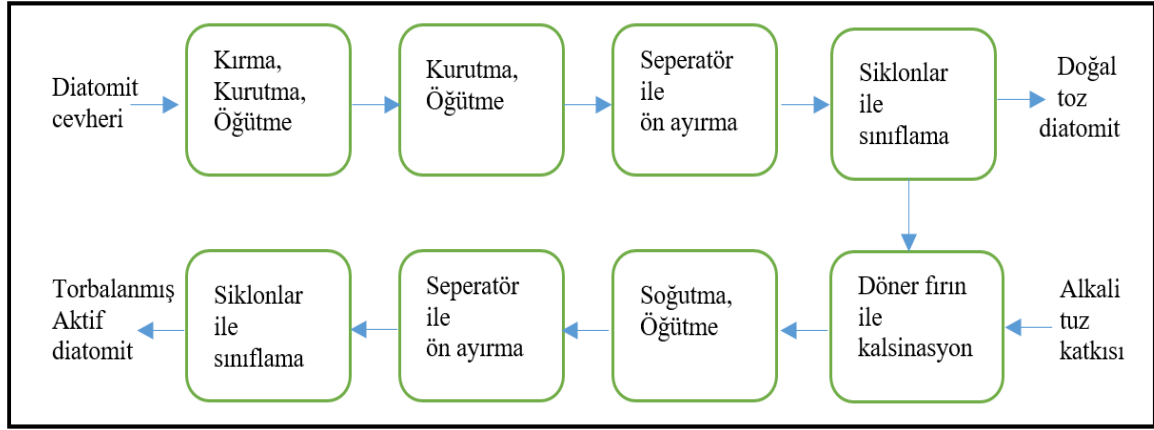
Tablo 1.13. Diatomitin kimyasal içerik sınır değerleri (Özbey ve Atamer, 1987).

Bileşik	Sınır değeri
SiO_2 (%)	Min 85
Al_2O_3 (%)	Maks 5
Fe_2O_3 (%)	Maks 1.5
CaO (%)	Maks 1
MgO (%)	Maks 0.5
Alkali oksitler (%)	Maks 1
Kızdırma kaybı (%)	Maks 6

1.5.2. Diatomitin İşlenmesi ve Kullanıma Uygun Hale Getirilmesi

Diatomit rezervinden alındığında %30~60 arasında nem barındırabilmektedir. Genellikle ocaklardan çıkartılma esnasında ufalanan diatomit farklı büyüklüklerde olmaktadır. Bu haliyle rengi kirli beyazdan açık kahverengiye kadar değişiklik gösterebilmektedir. Diatomitin ocaktan işletme tesisine getirilmesiyle başlayan işlem sürecinde ilk olarak açık alanlarda, güneşli veya yağmurlu olmayan günlerde kalın olmayacak şekilde serilmekte ve doğal yollar ile mümkün mertebede fazla neminden arındırılmaktadır. Zaman ve yerin elverdiği ölçüde bekletilen diatomit daha sonra çekiçli kırıcı bunkerı yardımıyla öğütülerek işleme sürecine başlanılmaktadır. Daha sonrasında öğütülen diatomitler bant yardımıyla ön kurutma kolonlarına gönderilmektedir. Burada sıcaklık hava ile buluşan hammadde neminden, üç kademe halinde, bu kolonlardan geçerken arındırılmaktadır. İçerisinde bulunan nispeten daha ağır kum, kil, gibi yabancı maddeler seperatör yardımıyla ayrıştırılmaktadır. Havalı ayrıştırıcılar ya da siklon yardımı ile sınıflandırılması gerçekleştirilen hammadde paketlenip doğal olarak kullanıma sunulabilmekte, ayrıca da kalsinasyon işlemine de tabi tutulabilmektedir.

Seperatör yardımıyla yabancı maddelerden ayrıştırılan kuru ve nispeten temiz diatomitler akaryakıt ya da gaz ile ısıtılan döner fırınlarda kullanımına uygun olacak şekilde 600~1090°C arasındaki sıcaklıklarda kalsinasyon işlemine tabi tutulabilmektedir. Bu işlem doğal hammadde içerisinde bulunan kristal yapıdaki yabancı minerallerin amorf yapıya bürünmesine yardımcı olmaktadır. Kalsine diatomit içerisinde bulunan demiroksit mevcudiyetinden dolayı pembe renklidir. Flaks kalsinasyon işlemi kalsinasyon işlemi başlamadan önce fırına %3~8 oranında soda (NaCO_3) ya da bir alkali tuzu eklenmesiyle yapılan kalsinasyon işlemine verilen isimdir. Flaks kalsine diatomit, içerisinde bulunan demir oksit ve alüminyum oksit soda ya da alkali tuzu yardımıyla ortamdan uzaklaştırıldığı için beyaz renklidir. Kalsinasyon ve de flaks kalsinasyon işleminden sonra elde edilen ürün bir soğutucudan geçtikten sonra topak kırıcısı yardımıyla öğütülmekte ve daha sonra havalı ayırıcılarda, siklonlarda tane boyutlarına göre sınıflandırılmaktadır (Şekil 1.13) (Özbey ve Atamer, 1987). Tablo 1.14'te Türkiye Şeker Fabrikaları A.Ş tarafından üretilen ürünlerin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmektedir.



Şekil 1.13. Tipik bir diatomit üretim şeması (Bozkurt, 1997).

Tablo 1.14. Türkiye Şeker A.Ş. tarafından üretilen ürün özellikleri (Bozkurt, 1997).

	Doğal	Flaks-Kalsine	Kalsine
SiO ₂ (%)	87.30	92.68	89.91
Al ₂ O ₃ (%)	1.95	1.83	1.72
Fe ₂ O ₃ (%)	3.23	2.60	2.40
CaO (%)	1.09	0.66	1.02
MgO (%)	0.45	0.44	0.30
Na ₂ O (%)	0.47	0.89	3.49
K ₂ O (%)	0.44	0.34	2.26
Kızdırma kaybı (%)	4.43	0.50	0.50
Renk	Kirli beyaz	Beyaz	Pembe
Gevşek ağırl. (g/l)	107.60	95.00	100.00
pH (20°C)	4.49	7	10
Ort. Çap (µm)	-	15	20

1.5.3. Diatomitin Kullanım Alanları

Diatomitlerin kullanımı eski tarihlere dayanmaktadır. Hafif bir malzeme olmalarından dolayı diatomitler MS 530 yılları civarında İstanbul’da inşa edilen Ayasofya’nın kubbesinde kullanıldığı bilinmektedir. Farklı bir kullanım olarak, 30 Yıl Savaşları sırasında Avrupa’da una karıştırılarak ekmek yapımında kullanımı verilebilmektedir. Bilimsel anlamda ilk çalışma (1867) ise Nobel tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada diatomitler dinamit yapımı

için kullanılmıştır. 19. yüzyılın son çeyreğinde şeker kamışı endüstrisi için yayımlanmış olan iki patent (1886 ile 1893) Almanlar tarafından geliştirilerek diatomitin şeker pancarı endüstrisinde filtre yardımcı malzemesi olarak kullanımı araştırılmış ve uygulanmaya başlanmıştır. 20. Yüzyılın başlarına kadar pek fazla uygulama sahası bulamamasına karşın bu tarihten itibaren diatomitler, katkı ve izolasyon malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır (Özbey ve Atamer, 1987, Çetin ve Taş, 2012). Puzolan olarak çimentolu sistemlerde kullanılmaya başlanması ise 1950'li yılları bulmuştur. Diatomitler, kalsinasyon işlemine tabi tutulduktan sonra birçok barajın yapımında kullanılmıştır. Bunlara bir örnek olarak ABD'de bulunan Monticello Barajı verilebilir (Elfert, 1993).

Günümüzde diatomitlerin kullanımı oldukça geniştir. Genel olarak başlıklar altında sınıflandırmak gerekirse aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir.

Filtrasyon: Diatomitler; gözenekli yapıları, kimyasallara karşı dirençli ve steril olmalarından dolayı askıda bulunan katı maddelerin sıvılardan ayrıştırılması işlemlerinde filtre yardımcı malzemesi olarak kullanılabilir. Yardımcı malzeme olarak şeker şerbeti, bira, şarap, viski, meyve suları, nebati yağlar, endüstriyel sıvı atıklar, kimyasallar, vernik gibi birçok sıvının filtrasyonunda kullanılabilir.

Katkı malzemesi ve dolgu malzemesi: Diatomitler; hafif oluşu, dayanıklılığı, ısı-ses-elektrik izolasyonu, emici gözenekli yapısı, kimyasallara karşı dirençli oluşu gibi özelliklerinden faydalanmak için başta boya olmak üzere, kağıt, plastik, diş macunu, ilaç, kozmetik, temizlik malzemeleri gibi ürünlerin üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu alanda kullanılmaları için diatomitin silis oranının %80'den fazla olması gerekmektedir.

Katalizör taşıyıcısı: İçerisinde bulunan silis miktarı %94'ü bulan diatomitler, reaksiyonlara karşı etkisiz oluşlarından dolayı katalizör taşıyıcı olarak kullanılmaktadır. Katalizör taşıyıcı olarak hidrojenasyon işleminde nikel katalizör ve sülfürik asit üretiminde vanadyum katalizör olarak kullanılmaktadır.

Silis kaynağı: İçerisinde bulunan yüksek silis oranından dolayı silis kaynağı olarak birçok alanda kullanımları mevcuttur. Gazbeton üretiminde silis kumu yerine silis kaynağı olarak kullanılmaktadır. Diatomit kullanımı, gazbetonda dayanımı artırabildiği gibi ısı-ses yalıtımı ve düşük birim hacim ağırlığından dolayı daha hafif gazbetonlarının imalatına olanak sağlamaktadır. İçerdiği doğal yüksek silis miktarından dolayı diatomitler, doğal puzolan olarak da değerlendirilmektedir. Ayrıca kalsiyum silikat, magnezyum silikat gibi sentetik silikatların üretiminde kullanılabilir.

Absorbant: Ağırlıklarının 3~4 katına kadar su emebildikleri için evcil hayvanların, ahırların, kümeslerin altlığı olarak kullanımları yaygındır. Ayrıca boya ve ağır metallerin absorbasyonunda da kullanımları mevcuttur.

Hafif yapı ve refrakter malzemesi: Porozitesinin yüksek olmasından dolayı birim hacim ağırlığının düşük olması, diatomitlere hafif yapı elemanları, refrakter tuğla yapımı gibi birçok alanda hafif malzeme olarak kullanım olanağı sağlamaktadır. Ayrıca izolasyonu sağlaması, dayanımı artırması, betonda terlemeyi azaltması gibi olumlu özelliklerinden dolayı da tercih edilmektedir.

Diğer kullanım alanları: gıda sektöründe, besin değeri yüksek gıdaların raf ömrünü artırmak için ambalaj ve paketleme işlemlerinde de kullanımları mevcuttur. Ayrıca amonyum nitrat gübrelerinin topaklanmasını önlemede de diatomitten yararlanılmaktadır (Çetin ve Taş, 2012).

1.5.4. Dünyada Diatomit Rezervleri

Dünyada bilinen rezerv bakımından en zengin kıta Avrupa olup (1200 milyon ton), onu Kuzey Amerika takip etmektedir (600 milyon ton). Bilinen toplam 2 milyar ton diatomit rezervi olmasına karşın, 250 milyon tonu ABD’de olmak üzere toplam 800 milyon ton diatomit rezervi işlenebilir haldedir. Tablo 1.15’te kıtalara göre diatomit rezervleri verilmektedir.

Tablo 1.15. Dünya diatomit rezervleri (Çetin ve Taş, 2012).

Kıta	Rezervler (milyon ton)
Avrupa	1200
Kuzey Amerika	
ABD	500
Diğer	100
Güney Amerika	100
Asya	50
Avusturalya	20
Afrika	20
Toplam	~2000

1.5.5. Türkiye’de Diatomit Rezervleri

Türkiye’nin volkanojen neojeninde oluşması yaygın olup bunlar yörelere göre dört grupta toplanabilmektedir. MTA’nın haritalandırmasına göre Türkiye’de bulunan diatomit yatakları Şekil 1.14’da gösterilmektedir.

İç Anadolu’nun güveydoğusu; Nevşehir, Niğde ve Kayseri illerinde diatomit yatakları bolca bulunmaktadır. Kayseri ilinin 30 km kuzeyinde, alt pliyosen yaşlı, Taşhan formasyonunda yer alan Hırka diatomit yatakları Türkiye’de bilinen en büyük diatomit yatağıdır ve diatomit seviyesi 21 metre mertebesine kadar ulaşabilmektedir (Açıkalın, 1991). Burada saf, tüflü, killi ve karbonatlı olmak üzere dört tipte toplam 50 milyon m³ diatomit yatakları bulunmaktadır. Ayrıca Kayseri ilinde bulunan Keprin-Toklar, Melenki, Oymaağaç, Beydemir köylerinde de diatomit yatakları mevcuttur. (Gabriel vd., 1979). Aksaray Güzeyurt ilçesinde Belisırma ve Ihlara yatakları mevcuttur (Uygun, 1976).

Çankırı- Ankara Yöresi; Çankırı Çerkeş-Orta-Şabanözü ilçeleri arasında kalan bölgede Akhasan, Karaağaç, Bastak diatomit yatakları mevcuttur. Akhasan 4 milyon tonu görünür olmak üzere toplam 20 milyon ton mümkün diatomit yatağına sahip iken Karaağaç’ta 970 bin m³ rezerv bulunmaktadır. Bastak’ta iyi kalite olmayan 1.5 milyon ton diatomit yatakları bulunmaktadır. Ankara ilinde Güvem-Gürcüköy ile Ayaş arasında kalan Başkerte ve Gürcü göz diatomit yatakları bilinmektedir (Uygun, 1976). Yapılan çalışmalarda Çankırı-Ankara diatomitlerinin amorf yapılı, mikro gözenekli yapıda, porozitesi ve su emme değeri yüksek olduğu belirlenmiştir. Fiziksel özellik yönünden her ikisi de ticari değere sahiptir ancak sadece Ankara yöresi diatomitlerin filtrasyon malzemesi olarak kullanılmaları uygun olduğu belirtilmiştir. Ayrıca yüksek oranda amorf silika içerdiklerinden dolayı her ikisi de puzolanik malzeme olarak çimento yapımında kullanılabilir. (Uygun ve Çelik, 1978).

Batı Anadolu Yöresi; Afyon Seydiler’de, Kütahya Alayurt’ta, Uşak Kayaagıl’da, Aydın-Karacasu Dedeler’de, Denizli-Sarayköy Tırnaz ve Karakıran’da, Balıkesir Gönen’de Bursa-Orhaneli Aktepe’de, Çanakkale-Çan Keçialan’da diatomit yataklarına rastlanılmaktadır. Afyon Seydiler diatomit rezervi 180 bin ton civarındadır. Aydın-Karacasu Dedeler’de bulunan, 10 metreye varan kalınlığa sahip diatomit yatakları oldukça kalitelidir. Denizli-Sarayköy Tırnaz ve Karakıran’da 500 bin ton rezerve sahip diatomit yatakları killi ve kükürtlü diatomitlerden oluşmaktadır (Uygun ve Çelik, 1978).

Doğu Anadolu Yöresi; Erzurum-Oltu ve Van-Muradiye’de diatomit yataklarının varlığı bilinmektedir. (Uygun ve Çelik, 1978).



Şekil 1.14. Türkiye diatomit yatakları haritası (MTA, URL-2).

1.6. Literatür Özeti

Hariçhane vd. (2010) tarafından yürütülen çalışmada kil zeminlerin kireç ve doğal puzolan ile stabilizasyonu incelenmiştir. Bu çalışmada doğal zemin olarak yüksek plastisiteli kil ve düşük plastisiteli kil zemin olmak üzere 2 farklı zemin seçilmiştir. Bu zeminler ile %4, %8 ve %10 oranında kireç ve de %10 ve %20 oranında doğal puzolanlar içeren farklı karışımlar hazırlanmıştır. Zemin karışımlarına ait kür süreleri 1, 7, 28 ve 90 gün olarak belirlenmiştir. Her iki zemin sınıfında da artan kür süresi, kireç ve doğal puzolan oranları ile serbest basınç mukavemetinde artış gözlemlenmiştir. Fakat sadece doğal puzolanların kullanıldığı durumlarda ise kayda değer bir artış olmadığı sonucuna varılmıştır.

Liu vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada kireç ve çimento ile stabilize edilen killi zeminlerin donma-çözülme çevrimi sonrasında dinamik özellikleri üzerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Bu çalışmada Çin'de hızlı tren projesi güzergahında yer alan bir sahadan alınan doğal zemin örnekleri ile kireç ve çimento %3, %6, %9 ve %12 oranlarında karıştırılarak farklı zemin karışımları hazırlanmıştır. Bu karışımların kür süresi olarak 7 belirlenmiş ve de bu karışımlar -15°C'de 12 saat, +5°C'de 12 saat olmak üzere 0, 1, 3, 6, 8, 10 donma-çözülme çevrimine tabi tutulmuştur. Kür süresi ve donma-çözülme çevriminden sonra karışımlar, konsolidasyonsuz ve drenajsız (UU) 3 eksenli dinamik basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Yapılan deneyler ile tekrarlanan donma-çözülme çevrimleri sonrasında kireç ve çimento ile modifiye edilmiş zemin karışımlarının mekanik özelliklerinin, doğal zemine göre daha güçlü performans gösterdiğini ortaya koyulmuştur. En etkili sonuçlar ise kireçli stabilizasyona kıyasla çimento ile yapılan stabilizasyon sonucunda meydana geldiği tespit edilmiştir.

Güllü ve Hazırbaba (2010) tarafından yapılan çalışmada, geofiber ve sentetik akışkanın düşük plastisiteli siltli zemin stabilizasyonunda kullanımı araştırılmıştır. Deneylere tabi tutulmak üzere işlem görmemiş doğal zemin, sadece geofiber içeren, sadece sentetik akışkan içeren ve de geofiber ve sentetik akışkan içeren karışımlar hazırlanmıştır. Doğal zemin ile %0.5 geofiber içeren optimum su muhtevasında hazırlanmışken sadece sentetik akışkan içeren karışımlar ise %6 su muhtevası ve %4 sentetik akışkan ile hazırlanmıştır. Hazırlanan toplam 4 farklı karışım kullanılarak 28 günlük kür süresi sonrasında ıslanmış ve ıslanmamış, donma-çözülme çevrimine tabi tutulmuş ve tutulmamış olmak üzere toplam 16 farklı deney grubu üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen verilere göre, ıslanmamış zemin karışımlarında her iki katkının bir

arada kullanılması diğer farklı karışımlara nazaran daha yüksek performans ortaya koymuştur. Bu numunelerin serbest basınç mukavemeti, doğal zemine kıyasla %170 oranında artış sağladığı, sentetik akışkanların yalnız başına katkı maddesi olarak kullanımı, serbest basınç mukavemetinde %21 oranında düşüşe neden olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada, sadece sentetik akışkan ile yapılan stabilizasyonun donma-çözülme çevrimi altında yetersiz sonuçlar verdiği, en yüksek değerlerin her iki katkı maddesinin bir arada kullanılması durumunda elde edildiği sonucuna varılmıştır.

Runigo vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada, uzun dönem hidrolik çevrimin (uzun dönem su ile temas ve su sürkülasyonu), kireç katkılı siltli zeminlerin kayma mukavemetine olan etkisini incelenmiştir. Farklı sıkıştırma enerjilerinde ve farklı kireç oranının da hazırlanan karışımlar uzun dönem hidrolik çevrime maruz bırakılmıştır. Zeminlerin düşük sıkıştırma enerjisi ile sıkıştırıldığı durumlarda, durabilitelerinde artışlar, kayma mukavemetlerinde önemli kayıplar meydana geldiğini gözlemlenmiştir. Bu olumsuzlukların meydana gelmesinde zeminlerin su ile temas süresinden daha çok zemin içerisinde geçen su miktarı ile ilişkilendirilmiş, zeminlerin permeabilitelerinin azaltılmasının, uzun süre hidrolik çevrime maruz kalan zeminlerin olumsuz etkilenmelerini azaltacağı sonucuna varılmıştır. Bundan dolayı bu tarz durumlarda yüksek sıkıştırma enerjisi ile zeminlerin sıkıştırılmasının daha uygun olduğu ileri sürmüştür. Ayrıca bu çalışmada, optimum kireç oranının bir miktar üzerinde eklenen kirecin, zeminin mekanik özellikleri üzerinde meydana getirdiği olumlu sonuçlara da vurgu yapılmıştır.

Yıldız ve Soğancı (2012), yaptıkları çalışmada kireçle stabilize edilmiş düşük ve yüksek plastisiteli killerin, donma-çözülme çevrimi öncesi ve sonrası mukavemet ve permeabilite değerlerinde meydana gelen değişimleri araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada, kireç katkı oranını %6, kür süreleri 1, 3, 7, 21 ve 28 gün olarak belirlenmiştir. Farklı kür sürelerinde bekletilen ve de 3 defa donma-çözülme çevrimine tabi tutulan numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde ve permeabilitelerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. %6 kireç ilavesi ile birlikte düşük ve yüksek plastisiteli numunelerin hidrolik iletkenliklerinde 1000 kat artış gözlemlenmiştir. 3 donma-çözülme çevrimi sonrasında ise permeabilitelerinde 10-20 kat arasında bir artışın daha meydana geldiği belirlenmiştir. Hazırlanan kireçli karışımların serbest basınç mukavemetleri incelendiğinde, 28 günlük kür sonunda, yüksek plastisiteli kil zeminlerde 15 kat artış gözlenmiş, düşük plastisiteli kil zeminlerde ise bu artış 3 kat ile sınırlı kaldığı tespit edilmiştir. Her iki zemin ile hazırlanan

karışımlarda, donma-çözülme çevriminin meydana getirdiği mukavemet kaybı ise %10~15 olarak belirlenmiştir.

Metelkova vd. (2012) yaptıkları çalışmada, %1 ile %8 arasında değişen oranlarda sönmemiş kireç katkısının kohezyonlu zeminlerin boşluk oranına etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada, %1 oranında eklenen kireç ile hazırlanan zemin karışımlarının, portlandit ve kalsit minerallerinin oluşmasından dolayı, makroporozitesinde bir artış olmasına karşın 28 gün sonunda bu artışın durma noktasına geldiğini gözlemlenmiştir. %2 oranında eklenen kireç ile zemin karışımlarının makroporitesinde meydana gelen değişimler 120 gün boyunca devam ettiği tespit edilmiş. %2'den daha fazla eklenen kireç ile hazırlanan zemin karışımlarının, artan kireç ilavesi ile zeminin pH değeri 11.7 değerini aşmasından ve zaman ile çimentolaşma ürünlerinin meydana gelmesinden dolayı, makroporozitesinde 360 gün devam eden bir artış olduğu saptanmıştır.

Li vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada yüksek oranda ham selüloz içeren buğday samanı ve kireç ile kıyıya yakın yerlerde bulunan tuzlu zeminlerin stabilizasyonu araştırılmıştır. Tuzlu zemin içerisinde, buğday sapından elde edilen liflerde meydana gelecek korozyonu önlemek için lifler polivinil alkol ile güçlendirilerek stabilizasyonda kullanılmıştır. 30, 40, 50, 60, 70 mm gibi farklı uzunluklarda, %0.2, %0.25, %0.3 gibi farklı ağırlıklarda kullanılan lifler ile farklı su içeriklerinde hazırlanan kireçli ve kireçsiz karışımlar 7, 14, 21 ve 28 günlük kür süresinin sonunda serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Drenajsız ve konsolidasyonsuz (UU) üç eksenli basınç deneyi için ise aynı oranlarda, 15, 20, 25 mm gibi farklı uzunluklarda lifler kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda buğday sapından elde edilen lifler zemin mukavemetine olumlu katkı yaptığı görülmüştür. Serbest basınç deneyinde ise en iyi sonuca %0.25 oranında zemine katılan, 50 mm uzunluklu lifler ile hazırlanan karışımlarda ulaşılırken, UU 3 eksenli basınç deneyinde ise en iyi sonucu %0.25 oranında zemine katılan 20 mm uzunluklu lifler vermiştir. Ayrıca kireç katkılı zeminlerde sıklıkla rastlanan gevrek kırılmanın aksine, lifli zeminler bir miktar daha sünek kırılma davranışı gösterdiği belirlenmiştir.

Olgun (2013) yaptığı çalışmada pirinç kabuğu külü, kireç ve liflerin birlikte zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini araştırmıştır. Optimum oranın belirlenmesi için bir optimizasyon yöntemi olan tepki yüzey yöntemi (RSM) kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda kullanılacak katkı oranları; kireç için %0 ile %8, pirinç kabuğu külü için %0 ile %15, fiber malzeme için %0 ile %0.8 arasında değişen değerler olarak belirlenmiştir. Hazırlanan karışımlar için kür süresi 28 gün olarak belirlenirken, donma-çözülme çevrimi için ise 28

günlük kür süresinden sonra -23°C 'de 24 saat, $+21^{\circ}\text{C}$ 'de 24 saat olacak şekilde 7 çevrim seçilmiştir. Hazırlanan karışımların kür süresinden ve donma-çözülme çevriminden sonra serbest basınç mukavemetlerinde ve şişme basınçlarında meydana gelen değişimler incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda elde edilen veriler ile yapılan optimizasyon yöntemine göre serbest basınç mukavemetinde, donma-çözülme çevrimi öncesinde en etkili parametre kireç katkısı, donma-çözülme çevriminden sonra ise pirinç kabuğu katkısı olduğu gözlemlenmiştir. Kırılmanın meydana geldiği eksenel deformasyon değerinde en etkili parametre ise fiber ve kireç yüzdesinin olduğu sonucuna varılmıştır. Şişme indislerinde, donma-çözülmeden önceki numunelerde en etkili parametre kireç yüzdesi iken, sonraki parametreler ise pirinç kabuğu külü ve kireç yüzdesi olduğu belirlenmiştir. Yapılan bu çalışmalar ışığında en etkili kireç, pirinç kabuğu külü, fiber oranları donma-çözülme çevrimi öncesi sırasıyla %7.39, %5.78-5.91, %0.8, donma-çözülme çevrimi sonrası sırasıyla %6.46, %14.94-15.0, %0.78-0.79 olarak belirlenmiştir.

Aksakal vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada zemine diatomit katkısının kıvam limitlerinde ve kompaksiyon parametrelerinde meydana getirdiği değişimler incelenmiştir. Üçgen sınıflandırma yöntemine göre siltli lem, lem ve kil zeminlere %10, %20 ve %30 diatomit katkısı ile deneylerde kullanılacak karışımlar hazırlanmıştır. Diatomit katkısının siltli lem zeminde en etkili sonuçları verildiği yapılan deneylerle saptanmıştır. Siltli lem ve lem zeminlerde diatomit oranı arttıkça likit limitin ve plastik limitin önemli derece arttığı gözlemlenmiştir. Kil zeminde ise diatomit katkısının kıvam limitlerine çok etkisi olmasa da %10 diatomit katkısı ile hazırlanan karışım en yüksek likit limit değerine ulaşırken %20 diatomit içeren karışım en yüksek plastik limit değerine eriştiği sonucuna varılmıştır. Artan diatomit oranı ile her üç zeminde de optimum su içeriği artarken maksimum kuru birim hacim ağırlığın azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca Aksakal vd. (2021) tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise donma-çözülme çevriminin yaklaşık aynı tür zeminler ve aynı oranlarda diatomit katkısı ile hazırlanan karışımların kıvam limitlerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada 3, 6 ve 9 donma-çözülme çevrimine tabi tutulan karışımların, artan D-Ç çevrimi ile likit limit ve plastik limitlerinde bir azalma meydana geldiği saptanmıştır. Plastisite indislerinde ise kayda değer olmayan artışlar ya da azalışlar kaydedilmiştir.

Aldaoood vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada, alçı taşı ve kireç katkılarının ince taneli zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Yapılan çalışmalarda %0, %5, %15 ve %20 alçı taşı içeren karışımlara %3 oranında kireç katkısı ilave edilerek kireçli ve kireçsiz karışımlar hazırlanmıştır. Mukavemet ve şişme parametrelerinin

değerlendirildiği bu çalışmada kireçli karışımların %5 oranında alçı taşı içermesi her iki deneyde de en iyi sonucu verdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada ayrıca kür sıcaklığının zemin mukavemetine olan etkisi de araştırılmış ve 50°C’de küre tabi tutulan numunelerin mukavemetleri, 20°C’deki numunelere kıyasla 2 kat daha büyük değerlere ulaştığı sonucuna varılmıştır.

Çalık ve Şadoğlu (2014) tarafından yapılan çalışmada perlitin zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini araştırılmıştır. %0, %10, %20, %30, %40, %50 oranlarında perlit içeren zemin karışımlar ile pH tersti sonuçlarından yola çıkarak %8 (optimum kireç oranı) kireç katkılı ve katkısız olacak şekilde hazırladıkları zemin karışımlarının mühendislik özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Kirecsiz zemin karışımlarında perlit oranı arttıkça likit limit ve plasitiste indisi değerlerinde bir düşüş, kireç katkılı zemin karışımlarının likit limitlerinde ise bir artış meydana geldiğini gözlemlenmiştir. Yapılan bu çalışmada, perlit ve kirecin kullanılmasıyla zeminin şişme basıncı ve yüzdesi azalmış olduğunu belirlenmiştir. Başlangıçta 282 kPa olan şişme basıncı, %40 perlit ile optimum oranda kireç içeren karışımda 42.4 kPa, %7.94 olan şişme yüzdesi ise, %50 perlit ve optimum orada kireç katkılı karışımda %0.95 olarak ölçülmüştür. Sadece perlit içeren zemin karışımlarının serbest basınç mukavemetlerinde bir düşüş gözlemlenmişken, kireç ve perlitli zemin karışımlarında ise artışlar meydana geldiği sonucuna varılmıştır. En yüksek mukavemet değerine ise %30 perlit içeren kireçli zemin karışımının erişmiş olduğu ve doğal zemine kıyasla %2000 katı bir değere ulaştığı gözlemlenmiştir.

Çalık ve Şadoğlu (2014) tarafından yapılan bir diğer çalışmada, kireç ve perlit katkısının zemin durabilitesi üzerine olan etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında deneylere tabi tutulacak zemin karışımlarının perlit oranları %0, %10, %20, %30, %40, %50 olarak belirlenmiştir. Ayrıca karışımlara pH ölçümleri sonucunda elde edilen optimum oranda (%8) kireç katkısı ilave edilmiştir. Durabilite tetkiklerinde hacimsel stabilite ve serbest basınç mukavemetinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. 28 günlük kür süresi sonunda numuneler 12 tekrar ıslanma-kurum çevrimine tutulmuştur. Sadece perlit içeren karışımlar hacimsel stabilitesini koruyamazken, kireç katkılı zemin karışımları ıslanma-kuruma çevrimine karşı direnç gösterdiği gözlemlenmiştir. Islanma-kuruma çevrimin sonucunda ise kirecsiz numuneler hacimsel stabilitesini koruyamadığından ve %0, %10, %20 perlit içeren karışımların mukavemeti %20 oranında düştüğünden dolayı istenilen minimum değerlere ulaşamadıkları gözlemlenmiştir. %30 ve üzeri perlit içeren kireçli zemin karışımların ise bu sınır değeri sağladıkları sonucuna varılmıştır.

Mishra vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada granit katı atıkları ile kireç katkısının yüksek plastisiteli killi zeminin özelliklerine olan etkisini incelenmiştir. Kireç oranı %5 olarak seçilen bu çalışmada, granit katı atığı oranları ise %0, %10, %20 ve %30 olarak belirlenmiştir. Yapılan standart proktor ve CBR (California Bearing Ratio) test sonuçlarına göre artan kireç ve granit katı atığı oranı ile zeminin optimum su muhtevası düşerken, maksimum kuru birim hacim ağırlığı artmıştır. Ayrıca yaklaşık %2 oran CBR değeri, %30 granit katı atığı ve %5 kireç içeren karışımda %7'nin üzerine çıkmıştır. Şişme yüzdesi ise %56.6'dan %4.1 gibi düşük bir değere geriletilerek şişmenin kontrol altına alınabildiği sonucuna varılmıştır.

Swaidani vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada killi zeminlerin kireç ile stabilizasyonunda doğal puzolan kullanılabilirliği araştırılmıştır. Şam yakınlarında bulunan doğal puzolan yataklarından elde edilen siyahımsı doğal puzolan ile yapılan çalışmada puzolan oranı %0, %10 ve %20 olarak seçilmiştir. Kireç oranı ise pH testinde elde edilen optimum kireç oranı %4 ile %0 ve %8 olarak belirlenmiştir. Hazırlanan karışımların kıvam limitlerinde, kompaksiyon parametrelerinde, CBR değerlerinde ve büzülme indislerinde meydana gelen değişimler araştırılmıştır. Optimum oranda ilave edilen kireç ile birlikte likit limit %58.8'den %50.8 düşerken, plastisite indisi %30'dan %44'e yükselmiştir. Artan kireç oranı ve puzolan katkısının ise belirgin bir değişim yaratmadığı sonucuna varılmıştır. Doğal puzolan katkısının optimum su içeriğinde azaltıcı, maksimum kuru birim hacim ağırlıkta ise artırıcı bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. CBR değeri, zemine optimum kireç oranı ilave edildiğinde hızlı bir artış gösterdiği, %8 kireç oranında ise bu artışın düştüğü gözlemlenmiştir. Doğal puzolan katkısı ise her durumda CBR değerini bir miktar artırmıştır. 7 günlük kür süresi sonrasında doğal zemin, kireç katkılı zemin ve doğal puzolan-kireç katkılı zemin örnekleri üzerinde yapılan SEM görüntülemesi ve EDS analizleri sonucunda kireç ile iyileştirilen zeminlerde CSH ve CASH çimentolaşma ürünleri gözlemlenebilmiştir.

Yılmaz (2017) yapılan çalışmada, doğal puzolan olan perlitin inceliğinin zemin mukavemetine olan etkisini incelenmiştir. Doğal zemin ve optimum oranda eklenen kirecin (%6) kuru ağırlığı toplamına %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranında farklı iki incelikte perlit ilave edilmesiyle hazırlanan karışımlar ile yapılan deneysel çalışmalarda; öğütülmemiş perlit içeren zemin karışımlarında, %20 perlit içeren kireçli zemin karışımı en yüksek serbest basınç mukavemetine (3196 kPa) sahip olurken, öğütülmüş perlit içeren zemin karışımlarında ise %15 oranında öğütülmüş perlit içeren kireçli zemin karışımı en yüksek mukavemet değerine (3408.9 kPa) sahip olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan bu

çalışmada, perlitin öğütülmesinin zemin mukavemetinde doğrudan katkı gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Namedzadeh vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada farklı kür süresi ve sıcaklığının farklı oranlarda silika dumanı ve kireç katkıları içeren zemin karışımlarına olan etkileri incelenmiştir. %0, %5 ve %10 silika dumanı, %9, %12 ve %15 kireç katkısı içeren karışımlardan hazırlanan 100 mm çapa, 120 mm yüksekliğe sahip numuneler, 27 ve 40°C’de, 7, 14, 28 günlük kür süresi sonrasında serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucuna göre, kür sıcaklığının artması ve %10 oranında katılan silika dumanı zemin mukavemetini olumlu etkilediği belirlenmiştir. %9, %12 ve %15 oranlarında katılan kirecin ise yaklaşık aynı oranda mukavemete katkı sağladığı görülmüştür. Ayrıca çalışma sonrası yaptıkları lineer regresyon analizine göre verilerinin doğruluk yapı %95.1 olarak hesaplanmıştır.

Keskin vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada kireç, mermer ve pomza tozlarının ince taneli zeminlerin serbest basınç mukavemetine olan etkilerini incelenmiştir. Aynı ayrı %0, %5 ve %10 oranlarında kireç, mermer tozu ve pomza tozu içeren karışımlar hazırlandıktan sonra karışımlara 48 saat, 1 hafta, 1 ay olmak üzere farklı kür süreleri ve 2 donma-çözülme çevrimi sonunda serbest basınç deneyi yapılmıştır. Bu çalışmada, deneylere tabi tutulan numuneler kıyaslandığında kireç katkısının, serbest basınç mukavemetinde belirgin artış sağladığı, %5 pomza tozu ise kür süresine bağlı olarak kireç ile kıyaslandığında daha az bir artışa neden olduğu saptanmıştır. Mermer tozunun ise zemin mukavemetini olumsuz etkilediği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, 1 ve 2 donma- çözülme çevrimine tabi tutulan zeminlerin hepsinde mukavemet kayıpları gözlemlenmiştir.

Yılmaz (2018) tarafından yapılan çalışmada uçucu kül ve mermer tozu katkılarının zemin stabilizasyonuna katkısı incelenmiştir. %25 uçucu kül ve %0, %5, %10, %20 oranlarında mermer tozu ile hazırlanan zemin karışımları 7, 28 ve 84 günlük küre sonunda serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Ayrıca 28 günlük kür süresi sonrasında 12 donma-çözülme çevriminin zemin mukavemetine olan etkisi de incelenmiştir. 28 günlük kür süresi sonrasında, %25 uçucu kül ve %5 mermer tozu ile hazırlanan karışımın en yüksek serbest basınç mukavemetine sahip olduğu saptanmıştır. Ayrıca, donma-çözülme çevriminin zemin karışımlarının serbest basınç mukavemetlerinde belirgin düşüslere neden olduğu saptanmıştır.

Cheng vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada doğal bir puzolan olan volkanik küllerin kireçle birlikte zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliği araştırılmıştır. %0, %1, %3, %6, %9 oranlarında kireç ve %0, %15, %20 ve %25 volkanik kül içeren zemin

karışımlarının, farklı kür süreleri sonrasında pH ölçümleri, serbest basınç mukavemetleri, şişme yüzdeleri ve CBR değerleri belirlenmiştir. Ayrıca karışımların kıvam limitleri ve kompaksiyon parametreleri de değerlendirilmiştir. 1 ve 3 saatlik, 1, 3, 7 ve 28 günlük kür süresinin sonrasında zemin karışımlarının pH değerleri ölçülmüştür. Artan kireç oranı pH değerini artırdığı gözlemlenirken, volkanik külün pH üzerinde pek etkisi olmadığı görülmüştür. Fakat kür süresi ile beraber karışımların pH değerlerinde bir azalma olduğu belirlenmiştir. %3'e kadar eklenen kireç ile beraber likit limit değeri bir miktar artarken, bu orandan fazla eklenen kireç zeminin likit limitinde bir düşüşe neden olduğu gözlemlenmiştir. Plastik limiti ise eklenen kireç oranına bağlı olarak giderek artmıştır. Volkanik külün ise likit limiti azaltıcı bir etkisi olsa da plastik limitte belirgin bir değişim meydana getirmemiştir. Her iki katkı da zeminin CBR değerini artırıcı etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca şişme yüzdesini azaltıcı etkileri olduğundan zeminin şişme problemlerine olumlu katkısı belirlenmiştir. Ayrıca çalışmacılar karışımlarına SEM, IR ve XRD analizleri yapmışlardır. XRD analizi sonucunda kireç ve volkanik kül katkılı karışımların örneklerinde zamana bağlı olarak kireç piklerinin azaldığı, CAH olarak değerlendirilen yeni piklerin meydana geldiği gözlemlenmiştir. IR analizinde ve SEM görüntülemesinde de CAH çimentolaşma ürününün varlığı gözlemlenmiştir. SEM görüntülerinde meydana gelen ipliksi yapılar ve kil tanelerinin korozyona uğrayıp küçülmesi ve laminer şekil alması bu durum ile ilişkilendirilmiştir.

Yılmaz (2020) tarafından yapılan çalışmada, Midyat taşına ait endüstriyel katı atıkların düşük plastisiteli killi zemininin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini araştırılmıştır. Kireçli ve kirecsiz %5, %10, %15 ve %20 oranlarında Midyat taşı katı atığı içeren karışımlarda indeks, mukavemet ve durabilite testleri gerçekleştirilmiştir. Yaptığı deneysel çalışmanın sonucunda, Midyat taşı atığının tek başına katkı maddesi olarak kullanılmasının mukavemet ve durabilite değerleri üzerinde büyük bir etkiye sahip olmadığını gözlemlenmiştir. Kireçle beraber kullanımda ise, %15 Midyat taşı atığı içeren zemin karışımlarının serbest basınç mukavemetinin, 28 günlük kür süresinin sonunda 1394.9 kPa değerine ulaştığı, bu değer doğal zemin için 161.8 kPa olarak ölçüldüğünden %760'ın üzerinde bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Midyat taşı katı atıklarının donma-çözülme üzerinde etkisinin çok kısıtlı olduğu, ıslanma-kuruma üzerinde daha etkili olduğu sonucuna varan Yılmaz, bu atıkların kireçle beraber düşük plastisiteli zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabilir oldukları sonucuna varmıştır.

Khodaparast vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada çinko oksit nano partiküllerinin siltli kil zeminlerin stabilizasyonunda kireçle birlikte kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Optimum oranda (%6) kireç ve de %0, %1, %1.5, %2 oranlarında çinko oksit ile ayrı ayrı hazırlanan karışımlar için kür süresi 7 gün olarak seçilmiştir. Hazırlanan karışımlarda %1.5 çinko oksit içeren karışım en yüksek; serbest basınç mukavemeti, içsel sürtünme açısı, kohezyon ve CBR değerlerine eriştiği, bu oranın üzerinde eklenen çinko oksit ile bu değerlerde bir düşüşün olduğu gözlemlenmiştir.

Tiwari vd. (2021) tarafından yürütülen çalışmada atık küllerin ve doğal lifin şişen zemin stabilizasyonunda birlikte kullanılabilirliği araştırılmıştır. Kimyasal katkı olarak taban külü ve çekme çatlaklarına karşı ise hidsitan cevizi filleri kullanılmıştır. Şişen zemine eklenen %5, %10, %15 ve %20 taban külü ile %0.25, %0.50 ve %1.00 hindistan cevizi lifleri ile hazırlanan karışımların şişme yüzdesi ve basıncında, serbest basınç mukavemetlerinde, yarmada çekme dayanımlarında meydana gelen değişimler incelenmiştir. Serbest basınç mukavemeti belirlenmesinde 28 günlük kür süresi seçilmiştir. Ayrıca 2, 4, 6, 8, 10 donma-çözülme çevriminin de zemin karışımlarının mukavemetlerinde meydana gelen kayıplar tespit edilmiştir. Yapılan çalışmaları sonucunda artan taban külü oranında şişme basıncında ve yüzdesinde bir azalma meydana gelirken en iyi sonuca ise %20 taban külü ve %0.50 lif içeren karışım ulaşmıştır. Katkısız zemin ile kıyaslandığında bu karışımın şişme basıncında %67.65, şişme yüzdesinde ise %84.5 oranında bir düşüş gözlemlenmiştir. Karışımların serbest basınç mukavemetleri ve yarmada çekme dayanımları kıyaslandığında da en iyi sonucu %20 taban külü ve %0.50 doğal lif içeren karışımın sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca artan taban külü ve lif oranının donma-çözülme çevrimi sonrası meydana gelen mukavemet kayıplarını azaltıcı etkisi olduğu sonucuna varılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME

Bu çalışmada, Ankara Kazan diatomitinin zemin stabilizasyonunda kireçle birlikte kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmaktadır. Bu amaca uygun olarak, farklı oranlarda diatomit ve optimum oranda kireç katkılarıyla hazırlanan karışımların geoteknik özelliklerinde meydana gelen değişimlerin belirlenmesi için, bu karışımlar ile laboratuvar ortamında deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Ayrıca da kirecin, zemin ve diatomit taneleri ile yaptığı kimyasal reaksiyonlar sonucu meydana gelen çimentolaşma ürünleri (CH, CAH, CASH, CSH); zemin karışımlarına ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) analizi sonuçları yardımı ile tespit edilmeye çalışılmıştır.

Çalışma kapsamında kullanılan malzemelerin genel tanımları; mineralojik, fiziksel, kimyasal ve geoteknik özellikleri; bu malzemeler kullanılarak deneylere tabi tutulacak karışımların hazırlanması ve isimlendirilmesi; hazırlanan karışımlara uygulanan deneylerin ve yöntemlerin tanımlaması ve bu yöntemler için referans alınan standartlar; bu standartlara uygun olarak yürütülen deneylere ait bulgular ve bu bulguların irdelenmesi bu bölümde sunulmaktadır. Ayrıca 28 günlük kür süresi sonundaki zemin karışımlarına ait SEM görüntüleri ve EDS sonuçları da bu bölümde verilmektedir.

Deneysel çalışmalar için Devlet Su İşleri 22. Bölge Kalite Kontrol ve Laboratuvar Şube Müdürlüğü laboratuvarı kullanılmıştır. Malzemelere ait X-ışını difraksiyonu (XRD) analizleri Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda, kimyasal analizleri Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde, hazırlanan zemin karışımlarına ait numunelerin SEM görüntülemeleri ve EDS analizleri Karadeniz Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

2.1. Deney Şeması

Bu çalışmada kullanılacak olan malzemelerin tanımlanmasında ve tezin içeriğini teşkil eden çalışmaların yürütülmesinde takip edilen deney çalışma şeması Şekil 2.1’de verilmektedir.



Şekil 2.1. Deney şeması

2.2. Yapılan Deneylerde Referans Alınan Standartlar

Doğal zeminin, diatomitin ve kirecin özgül ağırlıkları, ASTM D854-06 (2006) standardına uygun olarak piknometre yardımı ile tespit edilmiştir. Doğal zemine ait tane çapı dağılımının tespiti için elek analizi ve hidrometre deneyleri ASTM D422-63 (2007) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Diatomitin tane çapı dağılımı ise lazer kırınım yöntemi ile belirlenmiştir.

Doğal zeminin organik madde içeriğinin tespitinde ASTM D2974-07a (2007) standardı referans alınmıştır. Karışımlarda kullanılacak optimum kireç miktarının belirlenmesinde ise ASTM D6276-99a (2006) standardından faydalanılmıştır.

Doğal zemine ve hazırlanan zemin karışımlarına ait kıvam limitlerinin belirlenmesi için yapılan deneyler, ASTM D4318-5 (2005) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Kompaksiyon parametrelerinin tespiti için yapılan standart proktor deneyinde ise ASTM D698-07 (2007) standardından yararlanılmıştır. 50 mm çap ve 100 mm yüksekliğe sahip olacak şekilde, optimum su içeriğinde hazırlanan, zemin karışımlarına ait silindirik numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin belirlenmesinde ASTM D2166-06 (2006) ve D5102-04 (2004) standartlarından yararlanılmıştır. Sıcaklık değişimi etkisine maruz bırakılan numuneler ise ASTM D560 -03 (2003) standardı referans alınarak donma-çözülme çevrimine tabi tutulmuştur.

Deneyisel çalışmalarda kullanılan ilgili standartlar Tablo 2.1’de gösterilmektedir.

Tablo 2.1. Deneylerde referans alınan standartlar

Deneyin Adı	Standart
Özgül ağırlık deneyi	ASTM D854-06 (2006)
Elek analizi- Hidrometre deneyi	ASTM D422-63 (2007)
Kıvam limitlerinin belirlenmesi (w_L , w_L ve I_P)	ASTM D4318-5 (2005)
Organik madde tayini	ASTM D2974-07a (2007)
Optimum kireç miktarının tespiti	ASTM D6276-99a (2006)
Standart kompaksiyon deneyi	ASTM D698-07 (2007)
Serbest basınç deneyi	ASTM D2166-06 (2006) ve ASTM D5102-04 (2004)
Donma-Çözülme	ASTM D560-03 (2003)

2.3. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler doğal zemin, diatomit ve kireçtir. Yapılan deneysel çalışmalarda, iyileştirilecek zemin olarak yüksek plastisiteli kil zemin, stabilizatör olarak ise sönmüş kireç (kalsiyum hidroksit) ve Ankara Kazan diatomiti kullanılmıştır. 4 No.lu elek altı doğal zemin, kireç ve diatomit Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Kireç, doğal zemin ve diatomit

2.3.1. Doğal Zemin

Yapılan çalışma kapsamında iyileştirilmeye çalışılan zemin, Bayburt il merkezine 29 kilometre uzaklıkta bulunan Güder köyü yakınındaki kil ocağından temin edilmiştir. 1780 metre rakıma sahip kil ocağı, 40° 07' 31" kuzey enlemi, 40° 07' 30" doğu boylamında bulunmaktadır. Şekil 2.3'te doğal zeminin temin edildiği ocağa ait yer bulduru haritası verilmektedir.



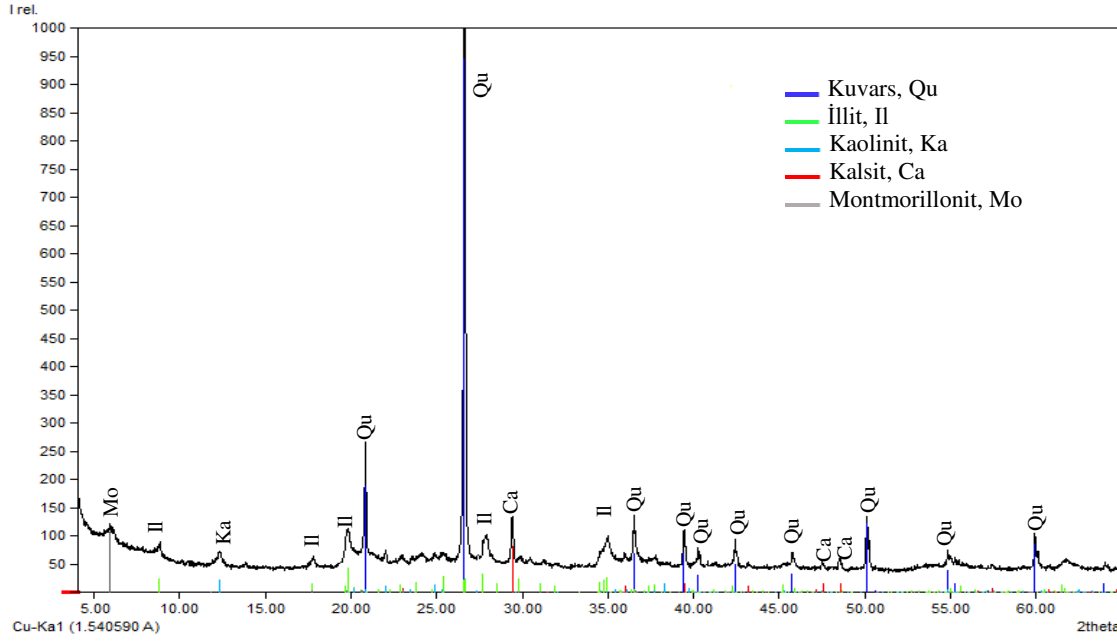
Şekil 2.3. Doğal zemin numunesinin temin edildiği ocağın yer bulduru haritası

Kıl ocağından temin edilen killi zemin numunesi, DSİ 22. Bölge Kalite Kontrol ve Laboratuvar Şube Müdürlüğü laboratuvarına getirilmiştir. Bir hafta boyunca açık havada kurutulmaya bırakıldıktan sonra numunenin su içeriği hesaplanmıştır. Daha sonra, deneylerde kullanılmak üzere 4 No.'lu (4.75 mm elek açıklığı) elekten elenmiş ve uygun ortamda muhafaza edilmiştir.

2.3.1.1. Doğal Zeminin Mineralojisi

200 No.lu elekten elenmiş doğal zeminin X-ışını difraksiyon (XRD) analizi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Doğal zemine ait XRD analizi sonucu Şekil 2.4'te verilmektedir. XRD analizi sonucunda elde edilen pikler literatür ile karşılaştırıldığında, doğal zeminde ağırlıklı olarak kuvars

mineralinin bulunduğu, ikincil mineral olarak illit mineralinin olduğu ve onlara oranla daha az miktarda kaolinit, kalsit ve montmorillonit minerallerinin doğal zemin içerisinde yer aldığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca “Match! 3” programı yardımı ile piklere karşılık gelen mineraller belirlenmiştir.

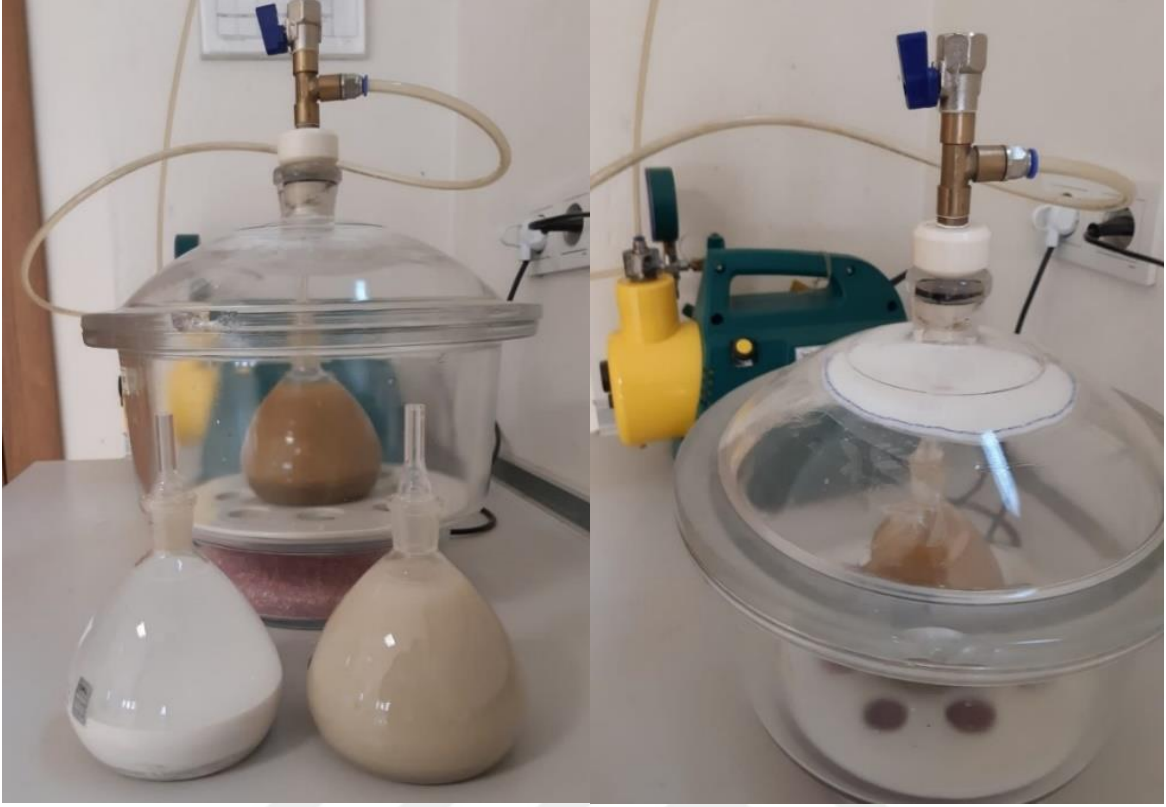


Şekil 2.4. Doğal zeminin XRD analizi sonucu

2.3.1.2. Doğal Zeminin Özgül Ağırlığı

Doğal zeminin özgül ağırlığının hesaplanması için, ASTM D854-06 (2006) standardına uygun olarak piknometre deneyi yapılmıştır (Şekil 2.5). 4 No.lu elekten geçen kuru numuneden bir miktar alınıp, boş ağırlığı bilinen (M_1) piknometre içerisine dökülerek piknometre ile beraber tartılmıştır (M_2). Piknometre içerisine saf su ekleme işleminden sonra vakum yardımıyla havası alınmaya çalışılmıştır. Vakumlama işlemini kolaylaştırmak için arada hafifçe sallanan piknometre, işlem tamamlandıktan sonra tekrar damıtık su ile tamamen doldurulmuş ve tartım işlemi yapılmıştır (M_3). Daha önceden sadece damıtık su ile tamamen dolu piknometrenin ağırlığı (M_4) bilindiğinden dolayı doğal zemine ait özgül ağırlık, bağıntı 2.1’ e göre 2.63 olarak hesaplanmıştır.

$$G_s = \frac{M_2 - M_1}{(M_4 - M_1) - (M_3 - M_2)} \quad (2.1)$$



Şekil 2.5. Piknometre deneyi

2.3.1.3. Doğal Zeminin Granülometrisi

Deneyssel çalışmalarda kullanılacak olan doğal zemine ait tane boyutu dağılımının (granülometri eğrisi) belirlenmesi için, ASTM D422-63 (2007) standardına uygun olarak yıkamalı elek analizi ve hidrometre deneyi yapılmıştır.

Elek analizi, zeminleri oluşturan tanelerin boyutlarının belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Zeminin, farklı gözenek açıklıklarına sahip eleklerden (Şekil 2.6.a) elenmesiyle zemin tanelerinin boyutları belirlenmekte ve o zemine ait granülometri eğrisi çizilmektedir. Fakat kil ve silt oranı yüksek olan, ince taneli zeminlerde taneler birbirine yapışmakta ve bu, zeminlere elek analizi yapılmasını zorlaştırmaktadır. Killi ve siltli zeminler için tane çapının belirlenmesinde sıklıkla yıkamalı elek analizi uygulanmaktadır. Yıkamalı elek analizi, zeminin 200 No.lu elek üstünde yıkanması ile ince taneli malzemeden arındırılması, kalan iri taneli malzemesinin kurutulup tekrardan elenmesi yöntemidir.

Doğal zeminde bulunan taneleri temsil edecek şekilde alınan 1000 g kuru numune ile yıkamalı elek analizi yapılmıştır. 200 No.lu elek üstünde yıkanarak ince tanelerinden

arındırılan numune kurutulmuş ve daha sonra farklı gözenek açıklıklarına sahip elek setinden elenmiştir. Yapılan yıkamalı elek analizi sonuçları Tablo 2.2’de verilmektedir.

Tablo 2.2. Doğal zeminin yıkamalı elek analizi sonuçları

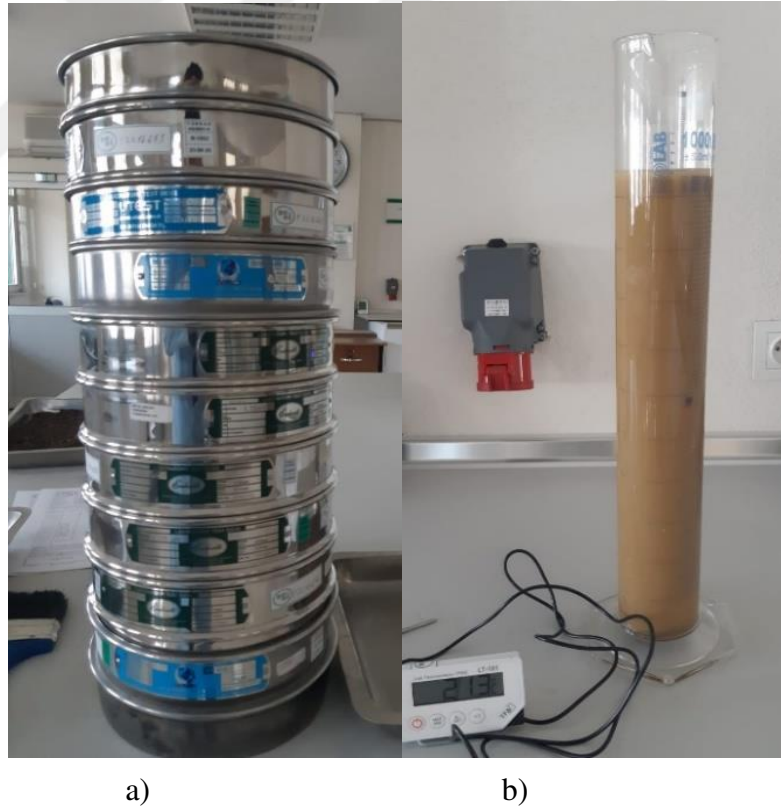
Elek No	Elek Çapı (mm)	Elekte Kalan (g)	Elekte Kalan Toplam (%)	Elekten geçen Toplam, P (%)
4/5"	20.0	0	0	100.0
3/8"	9.5	21.22	2.1	97.9
1/4"	6.3	14.66	3.6	96.4
No 4	4.75	10.88	4.7	95.3
No 10	2.0	29.06	7.6	92.4
No 16	1.19	28.28	10.4	89.6
ISO	0.63	39.96	14.4	85.6
No 40	0.425	25.35	16.9	83.1
ISO	0.20	35.18	20.5	79.5
No 200	0.075	50.32	25.5	74.5
Numunenin toplam ağırlığı (g)		: 1000		
Yıkama sonunda kalan kuru ağırlığı (g)		: 254.91		

Elek analizi ya da yıkamalı elek analizi, zemindeki iri tanelerin boyutlandırılması için uygun yöntem iken ince taneler için uygun değildir. İnce tanelerin tane çapı dağılımının belirlenmesinde ıslak analiz yöntemleri uygulanmaktadır. Hidrometre yöntemi, ıslak analiz için kullanılan yöntemlerden biridir.

Zeminin ince taneli kısmını değerlendirmek için ASTM D422-63 (2007) standardına göre hidrometre deneyi yapılmıştır (Şekil 2.6.b). 200 No.lu elek altı 24.5 g kuru numune ve 125 ml sodyum heksametafosfat ile 1 gün öncesinden hazırlanan süspansiyona hidrometre deneyi uygulanmıştır. Deneye ait sonuçlar Tablo 2.3’te verilmektedir.

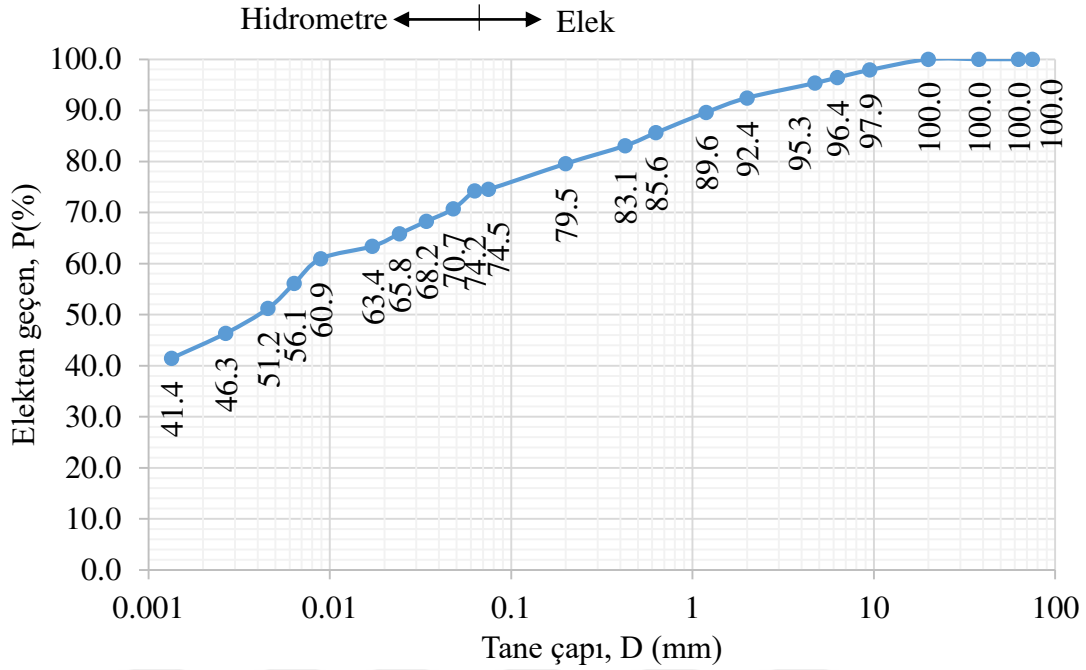
Tablo 2.3. Doğal zeminin hidrometre deneyi sonuçları

Geçen süre, s (dk)	Hidrometre okuması (Rh ₁)	Gerçek okuma, Rh	Efektif Derinlik, H _e (mm)	Sıcaklık, T (°C)	Çap, D (mm)	Düzeltilmiş hidrometre okuması, Rd	Geçen, P (%)
1	17	17.5	127.2	21.7	0.0480	14.5	70.7
2	16.5	17.0	128.4	21.7	0.0341	14.0	68.2
4	16	16.5	129.5	21.7	0.0242	13.5	65.8
8	15.5	16.0	130.7	21.7	0.0172	13.0	63.4
30	15	15.5	131.9	21.7	0.0089	12.5	60.9
60	14	14.5	134.2	21.7	0.0064	11.5	56.1
120	13	13.5	136.5	21.2	0.0046	10.5	51.2
360	12	12.5	138.8	21	0.0027	9.5	46.3
1440	11	11.5	141.1	21.2	0.0013	8.5	41.4



Şekil 2.6. Elek analizinde kullanılan elekler ve hidrometre deneyi

Doğal zemine ait yıkamalı elek analizi ve hidrometre deneyi sonuçları ile elde edilen tane boyutu dağılımı eğrisi Şekil 2.7’de verilmektedir.



Şekil 2.7. Doğal zemine ait tane boyutu dağılımı eğrisi

Şekil 2.7’de görülen tane boyutu dağılım eğrisi dikkate alınarak MIT (Massachusetts Teknoloji Enstitüsü)’e göre doğal zemindeki çakıl, kum, silt ve kil yüzdeleri Tablo 2.4’te verilmiştir.

Tablo 2.4. Doğal zeminin MIT zemin sınıflandırma sistemlerine göre içerdiği zemin sınıflarının yüzdeleri

Sınıflandırma türü	Çakıl	Kum	Silt	Kil
MIT	%7.6	%18.7	%29.8	%43.9

2.3.1.4. Doğal Zeminin Kıvam Limitleri

İnce taneli killer, diğer zemin türlerinin aksine, içerisinde su ihtiva ettikleri durumlarda, Bölüm 1.4’te tanımlandığı gibi yumuşamakta ve kolay şekil verilebilen, plastik bir hal alabilmektedir. Ayrıca içerdiği su miktarına bağlı olarak hacimlerinde bir artış meydana gelebilmektedir. Suyun ortamdan uzaklaştırılması ile de büzülerek katı, sert bir hale dönüşebilmektedir. Bu da killeri diğer zemin türlerinden ayıran en önemli özelliklerinden biridir.

Killi (kohezyonlu) zeminler; tane boyutu, içerdiği silt ve kum miktarı, mineralojik yapısı, katyon değişim kapasitesi, içerisinde bulunan yabancı ya da organik madde miktarı gibi parametrelerden dolayı farklı kıvam limitlerine sahip olabilmektedir. Zeminin taşıma gücüne önemli etkisi olan bu limitlerin belirlenmesi, üzerine inşası planlanan yapının sağlığı için son derece önemlidir.

Doğal zeminin likit limiti, koni düşürme yöntemi ile belirlenmiştir. Desikatörde 1 gün bekletilen numuneye, 80 gram ağırlığındaki konik uç, 5 saniye süre ile batmaya bırakılmış ve batma miktarı mikrometre ile ölçülmüştür (Şekil 2.16). Bu işlem farklı su içeriklerinde, 3 ila 5 defa arasında tekrar edilmiştir. Bu işlemler sonucunda elde edilen su içeriği-batma miktarı grafiğinden 20 mm'lik batmaya karşılık gelen su içeriği tespit edilerek doğal zeminin likit limiti (w_L) belirlenmiştir.

Plastik limitin (w_P) belirlenmesi, desikatörde bekletilen numuneden bir miktar alınarak düz, cam plaka üzerinde, el ile yuvarlanması ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.16). İnce silindirin haline getirilen örneklerin çapı yaklaşık 3 mm olduğu anda çatlama ve kopma belirmişse, o andaki su muhtevassından plastik limit değeri hesaplanmıştır.

Doğal zeminin plastisite indisi (I_P) ise likit limiti ile plastik limitin farkından bulunmuştur. Tablo 2.5'te doğal zeminin kıvam limitleri verilmektedir.



Şekil 2.8. Koni düşürme ve plastik limit deneyi

Tablo 2.5. Doğal zeminin kıvam limitleri

w_L (%)	w_P (%)	I_P (%)
51.4	25.1	26.3

2.3.1.5. Doğal Zeminin Sınıflandırılması ve Aktivitesi

Kıvam limitleri ve granülometri eğrisi doğrultusunda doğal zeminin, USCS (Unified Soil Classification System) zemin sınıflandırma sistemine göre zemin sınıfı CH (Yüksek plastisiteli kil) olarak belirlenmiştir.

Aktivite (A); plastisite indisinin, zeminin 0.002 mm çapına karşılık gelen, geçen yüzdesine oranı ile elde edilmektedir. Zemine ait bu değerin 0.75'ten küçük olması durumunda zemin "aktif değil, 0.75 ile 1.25 arasında olması durumunda "normal" ve 1.25'ten büyük olması durumunda ise "aktif" olarak isimlendirmektedir.

Doğal zeminin plastisite indisinin (% 26.3) kil yüzdesine (% 43.9) bölünmesiyle elde edilen aktivite değeri (0.60) değeri bu zeminin aktif olmadığını göstermektedir.

2.3.1.6. Doğal Zeminin Kompaksiyon Parametreleri

Zeminin boşluklarında bulunan suyun çıkmasıyla elde edilen sıkışmaya (oturmaya) konsolidasyon, havanın çıkmasıyla elde edilen sıkışmaya ise kompaksiyon adı verilmektedir. Zemin taneleri arasındaki boşluklarda bir miktar su ve hava bulunmaktadır. Suyun az olduğu durumlarda, zemin taneleri arasındaki sürtünmeden dolayı zeminin sıkıştırılması zor olmakta ve zemin içerisinde hava boşlukları kalmaktadır. Zeminde bulunan su, taneler arasındaki sürtünmeyi azalttığından dolayı, su içeriği arttıkça zemin, belirli bir kompaksiyon enerjisi altında daha kolay sıkıştırılabilmektedir. Bu durumlarda zeminin hacminde azalış, yoğunluğunda ise artış görülmektedir. Fakat zeminde, bir noktaya kadar eklenen su ile daha iyi sıkışma gözlemlenmesine karşın, suyun fazla olduğu durumlarda, su teorik olarak sıkıştırılamaz olduğundan dolayı zeminin hacminde artmalar, yoğunluğunda azalmalar meydana gelmektedir. Bu eşik noktası o zeminin, belirli sıkıştırma enerjisi altında hacminin en düşük, yoğunluğunun ise en yüksek (maksimum yoğunluk ya da ağırlık cinsinden maksimum birim hacim ağırlık) olduğu en iyi sıkıştırılmaya karşılık gelen su içeriğini vermekte, bu da optimum su içeriği olarak adlandırılmaktadır. Maksimum

yoğunluk (birim hacim ağırlık) ile optimum su içeriği göz önüne alınarak, o zemine ait maksimum kuru yoğunluk (maksimum kuru birim hacim ağırlık) hesaplanmaktadır. Zeminlere ait optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunluk (birim hacim ağırlık), zeminlerin kompaksiyon parametreleri olarak isimlendirilmektedir. Kullanım amacına göre kompaksiyon enerjisi değişiklik gösterebilmekte ve bunlardan en yaygın olanına standart kompaksiyon adı verilmektedir. Standart kompaksiyon parametreleri, standart proktor deneyi ile belirlenmektedir.

Standart proktor deneyinde öncelikle 4 No.lu elekten elenen doğal zemin, bir miktar başlangıç su içeriği verildikten sonra, topaklanma olmaması için iyice yoğurulmuştur. Deneye hazır hale getirilen zemin; ağırlığı bilinen, iç çapı 105 mm, yüksekliği 115 mm olan metal silindir içerisine 3 tabaka halinde, her tabaka da 30.5 cm'den 2.5 kg kütleli tokmağın 25 kez zemine serbest düşmesi ile sıkıştırmıştır (Şekil 2.20). Metal silindirin yüksekliğinden fazla olan zemin kesilip uzaklaştırıldıktan sonra metal silindir tartılmış ve su içeriğinin belirlenmesi için bir miktar örnek alınmıştır. İlave su eklenmesi ile bu işlem 6 defa tekrar edilerek, doğal zemine ait optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık tespit edilmiştir.



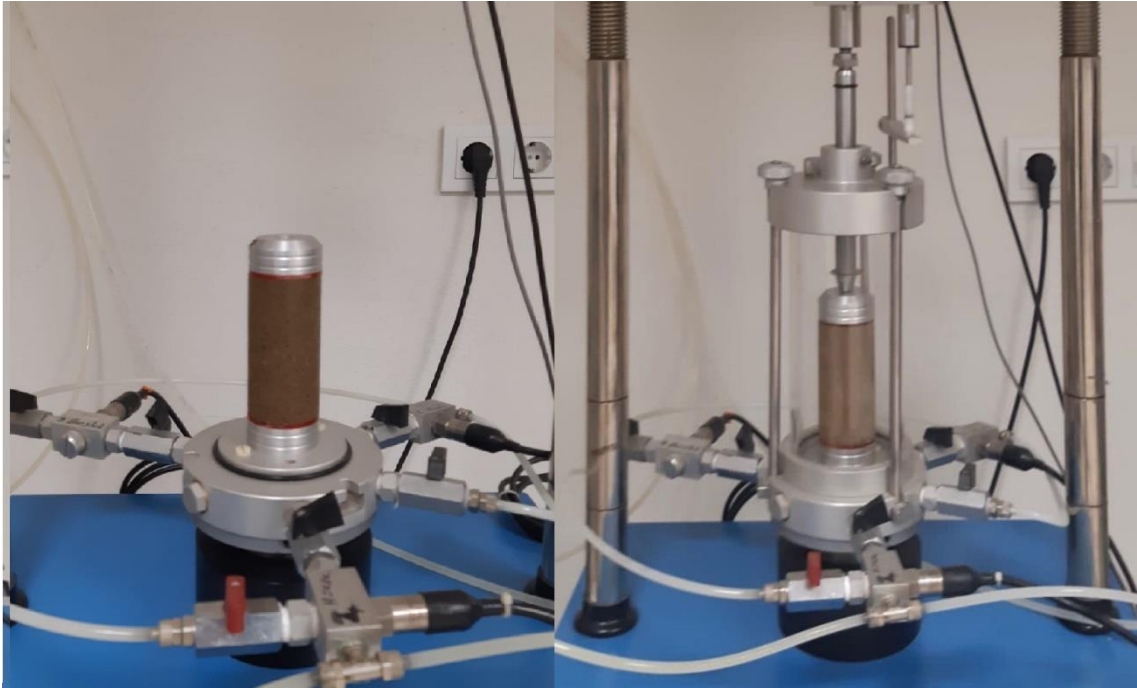
Şekil 2.9. Standart proktor deneyi

2.3.1.7. Doğal Zeminin Serbest Basınç Mukavemetinin Belirlenmesi

Zeminlere ait taşıma gücünün belirlenmesinde farklı birçok yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan biri olan mukavemet parametrelerinin (c , ϕ) belirlenmesi o zemine ait taşıma gücünün hesaplanmasını sağlamaktadır.

Zemine ait mukavemet parametreleri birkaç farklı yöntem ile belirlenmektedir. Bunlardan biri olan serbest basınç deneyi, hem zeminlere ait dayanımın hızlı belirlenmesine hem de drenajsız kayma mukavemetinin (c_u) bulunmasına olanak sağlamaktadır. Serbest basınç deneyi kohezyonlu ($c \neq 0$, $\phi = 0$) zeminlere uygulanan özel bir deneydir. Serbest basınç deneyinde zeminin kırıldığı ana karşılık gelen gerilme, o zeminin serbest basınç mukavemetini (q_u) vermekte, bu değerin yarısı ise o zemine ait drenajsız kayma mukavemetine (c_u) karşılık gelmektedir.

Doğal zeminin serbest basınç mukavemetinin ve göçme deformasyonunun belirlenmesi için ASTM D2166-06 (2006) standardına uygun olarak serbest basınç deneyi yapılmıştır. Kompaksiyon parametreleri ile hazırlanan doğal zemine ait 50 mm çapa 100 mm yüksekliğe sahip silindirik numuneler, 0.5mm/dk hız ile eksenel basınca tabi tutulmuştur (Şekil 2.10). Serbest basınç deneyi sonucunda doğal zeminin serbest basınç mukavemeti 279 kPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.10. Serbest basınç deneyi

2.3.1.8. Doğal Zeminin Organik Madde Miktarı

Kireç ile stabilizasyon uygulaması esnasında, zeminde bulunan organik maddelerin kimyasal reaksiyonu azaltıcı ve yavaşlatıcı etkisi bulunmaktadır. Bu nedenle, organik madde içeriği en fazla %5 olan zeminler için kireç ile stabilizasyon işlemleri uygun olmaktadır (Arman ve Moonfish, 1972; Nelson ve Debora, 1992).

Yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan zeminin organik madde miktarının belirlenmesi, yüksek sıcaklıklara çıkabilen fırında (Şekil 2.8), ASTM D2974-07a (2007) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Kuru numunenin 440 °C’de 2 saat bekletilmesiyle meydana gelen kütle kaybı, numunede bulunan organik maddelerin yakılması sonucu meydana geldiği düşünülmektedir. Bu kütle kaybının numunenin kuru kütlelerine oranı, organik madde içeriğini vermektedir. Yürütülen bu çalışmada, doğal zemine ait organik madde miktarı %3.9 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 2.11. Yüksek sıcaklığa çıkabilen fırın

2.3.1.9. Doğal Zeminin Kimyasal Analizi

Doğal zeminin kimyasal analizi Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde yaptırılmıştır. Doğal zemine ait kimyasal analiz sonuçları, mühendislik parametreleri ile birlikte Tablo 2.5’te verilmektedir.

Tablo 2.6. Doğal zemine ait kimyasal analiz sonuçları ve mühendislik parametreleri

Kimyasal analizler		Mühendislik parametreleri	
SiO ₂ (%)	56.18	Renk	Sarımsı kahverengi
Al ₂ O ₃ (%)	19.48	Özgöl ağırlık, G _s	2.63
Fe ₂ O ₃ (%)	6.62	Kıvam limitler	
CaO (%)	2.51	w _L (%)	51.4
K ₂ O (%)	2.30	w _P (%)	25.1
MgO (%)	1.71	I _P (%)	26.3
TiO ₂ (%)	0.91	Sınıflandırma	
Na ₂ O (%)	0.88	USCS	CH
MnO (%)	0.14	Standart proktor parametreleri	
P ₂ O ₅ (%)	0.12	γ _{k,mak} (kN/m ³)	15.24
V ₂ O ₅ (%)	0.04	w _{opt} (%)	23.6
A Za* (%)	9.10		
O Ma** (%)	3.90		

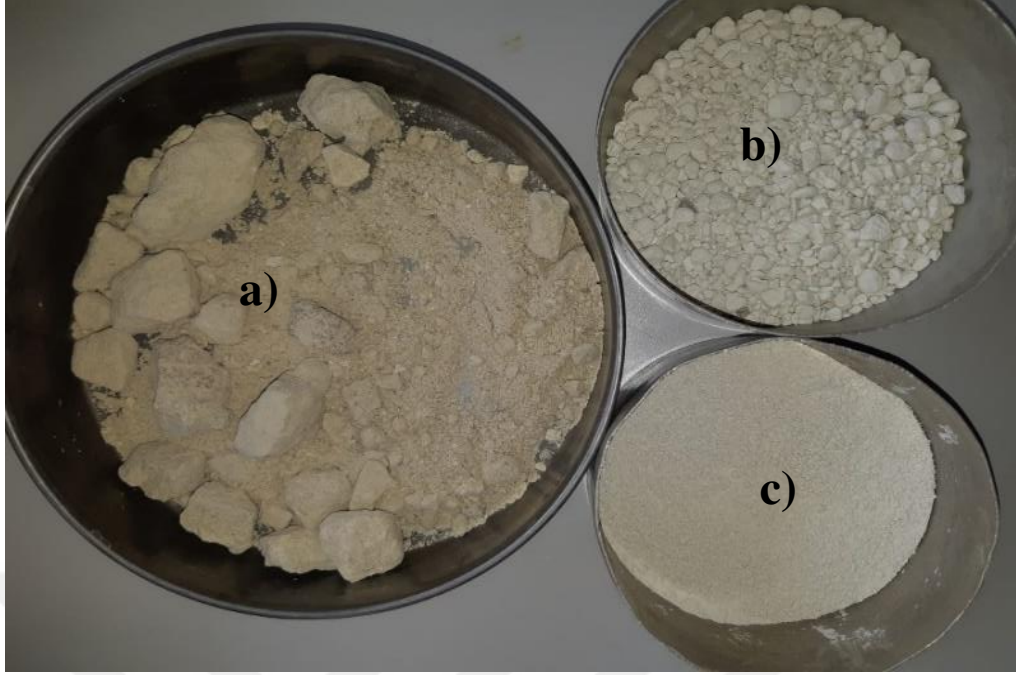
* A Za: Ateş zayılatı (Kızdırma kaybı)

** O Ma: Organik madde (Bu oran kızdırma kaybının içerisinde)

2.3.2. Diatomit

Diatomit; hücre duvarı silikadan oluşan, mikroskobik ölçekli tek hücreli su canlısı olan diatomların kalıntılarına verilen isimdir. Diatomit ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 1.6'da verilmektedir. Diatomitlerin puzolanik aktivitesi, içerdiği silika miktarıyla doğrudan ilişkilidir.

Bu çalışmada, diatomitin zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğinin araştırılması için Ankara Kazan diatomiti ile deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Bentaş Bentonit A.Ş.'nin işletmekte olduğu, Ankara ili Kahramankazan ilçesinde bulunan diatomit yataklarından çıkartılan Ankara Kazan diatomiti Şekil 2.9'da görülmektedir.

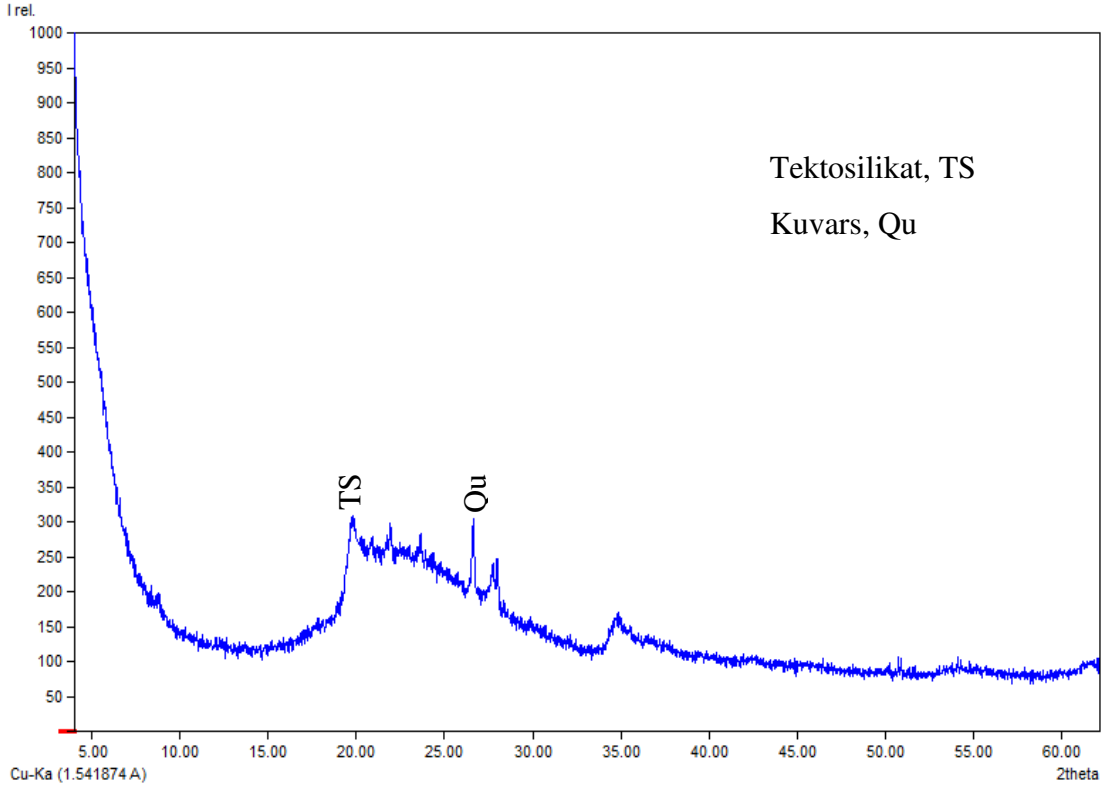


Şekil 2.12. Ankara Kazan diatomiti

Diatomit yataklarından çıkartılan diatomit bloklarının parçalanması ile elde edilen ham diatomit (Şekil 2.9a), içerisinde barındırdığı nemin ve organik maddenin uzaklaştırılması için 300~400°C sıcaklıktaki fırınlarda bekletilmektedir. Sert, topak haline gelen diatomit (Şekil 2.9b), öğütücünden öğütüldükten sonra seperatör yardımıyla içerisinde bulunan kil, kum, tuf gibi malzemelerden arındırılmakta, siklonlar yardımıyla tane büyüklüklerine göre sınıflandırılmaktadır. Çalışmada bu işlemler sonucunda elde edilen doğal diatomit (Şekil 2.9c) kullanılmıştır.

2.3.2.1. Diatomitin Mineralojisi

200 No.lu elekten elenmiş diatomitin X-ışını difraksiyonu (XRD) Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirmiştir. Diatomite ait XRD sonucu Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.13. Diatomitin XRD analizi sonucu

Doğal zeminin aksine diatomite ait XRD grafiğinde sadece iki pik mevcuttur. Mollah vd. (1999), Chaisena A. ve Rangriwatananon K. (2004) 26.62°, 2θ pikine karşılık gelen minerali “kuvars”, 19.80°, 2θ pikine karşılık gelen minerali ise “tektosilikat” olarak tanımlamaktadır.

2.3.2.2. Diatomitin İnceliği

Diatomitlerin puzolan olarak kullanılabilmesi için ince öğütülmüş olmaları gerekmektedir. İnce öğütlen puzolanların özgül yüzey alanı artmakta, kalsiyum bazlı bağlayıcılar ile kolay reaksiyona girebilmektedir. Başka bir ifadeyle puzolanik aktiviteleri artmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan diatomit tanelerinin inceliğinin yani tane boyut dağılımının belirlenmesi, bu diatomitin puzolan olarak kullanılabilirliğinin tespiti için gerekmektedir.

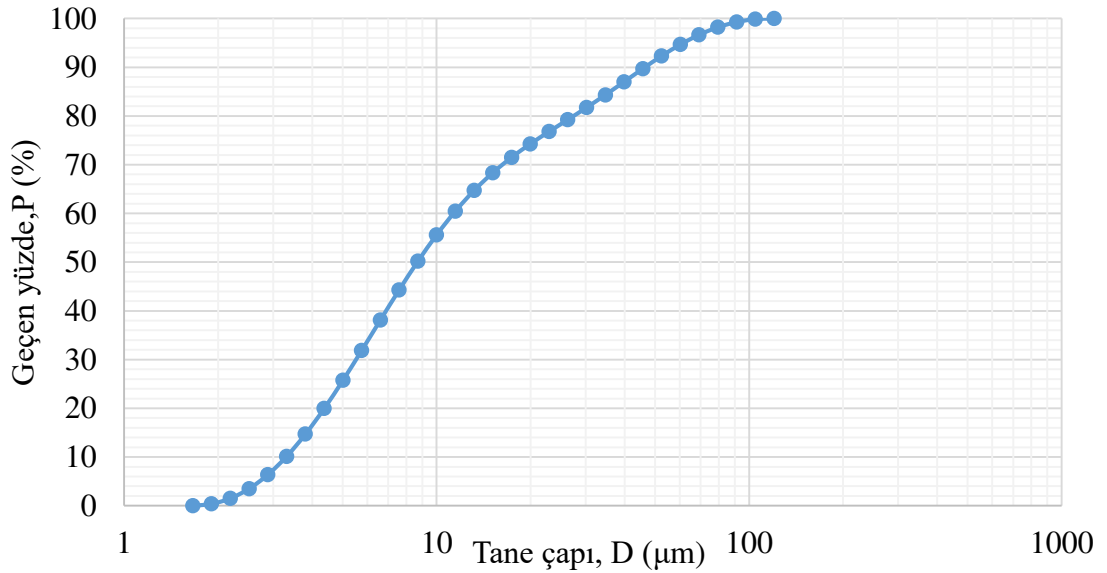
Tane boyutlarının belirlenmesinde kullanılan yöntemlerden biri lazer kırınım yöntemidir. Bu yöntemde ile damıtık su ile hazırlanan düşük derişimli süspansiyon ultra parlak stroboskopik LED ışık kaynağı ile aydınlatılmakta ve oluşan tanelere ait gölgeler

kamera sistemi ile ölçülerek numuneye ait tane boyu dağılımı belirlenmektedir. Şekil 2.11’de bir lazer kırınım cihazı görülmektedir.



Şekil 2.14. Lazer kırınım cihazı

Diatomite ait tane boyutu dağılımı eğrisi (Şekil 2.12), Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nde lazer kırınım yöntemi ile belirlenmiştir.



Şekil 2.15. Diatomite ait tane boyutu dağılımı eğrisi

Elde edilen granülometri eğrisine göre diatomit malzemesinin %89.49’u, 45 µm’den daha küçük tane çağına sahip olduğu tespit edilmiştir.

2.3.2.3. Diatomitin Özgöl Ağırlığı ve Gevşek Ağırlığı

Diatomite ait özgöl ağırlık, piknometre yardımı ile Bölüm 2.3.1’de tarif edildiği gibi belirlenmiş ve 2.39 olarak bulunmuştur.

Diatomitin gevşek ağırlığının belirlenmesi için 1000 ml’lik mezür kullanılarak belirli hacme karşılık gelen sıkıştırılmamış ağırlığı hesaplanmış ve 274.7 g/l olarak bulunmuştur.

2.3.2.4. Diatomitin Kimyasal Analizi

Diatomite ait kimyasal analiz Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde yaptırılmış olup sonuçlar fiziksel analizler ile beraber Tablo 2.6’da verilmektedir.

Tablo 2.7. Diatomite ait kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları

Kimyasal analizler		Fiziksel analizler	
SiO ₂ (%)	72.16	45 µ elek üstü (%)	10.51
Al ₂ O ₃ (%)	9.45	Özgöl Ağırlık, G _s	2.39
Fe ₂ O ₃ (%)	2.84	Gevşek ağır. (g/l)	274.7
CaO (%)	1.81		
MgO (%)	2.83		
K ₂ O (%)	0.90		
TiO ₂ (%)	0.43		
Na ₂ O (%)	0.36		
A Za* (%)	9.22		

*A Za: Ateş zayılatı (Kızdırma kaybı)

Tablo 2.6’da verilen değerlerden anlaşılaacağı üzere, Ankara Kazan diatomitinin 45µ elek üstünde kalan partikül oranının %20’den (%10.51) ve kızdırma kaybının %10’dan (9.81) küçük; içerdiği silisyum dioksit, alüminyum oksit ve demir oksit (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃) oranlarının toplamı ise %70’den (%89.49) büyük olması, puzolanik stabilizatör olarak kullanılabileceğini göstermektedir (ASTM C618-12, 2002).

2.3.3. Kireç

Bu çalışmada, Barkisan Bartın Kireç Sanayi A.Ş. tarafından üretilen CL 80 S sönmüş kalker kireci kullanılmıştır. Kirece ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 2.7’de verilmektedir.

Tablo 2.8. Sönmüş kirecin kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal analizler		Fiziksel analizler	
Aktif CaO (%)	85.80	75 µ elek üstü (%)	2.28
Ca(OH) ₂ (%)	65.00	Özgül Ağırlık, G _s	2.32
MgO (%)	1.40	pH	12.45
SO ₂ (%)	0.23		
Al ₂ O ₃ (%)	0.11		
Fe ₂ O ₃ (%)	0.40		

2.4. Zemin Karışımları ile Yapılan Deneysel Çalışmalar

DSİ 22. Bölge Kalite Kontrol ve Laboratuvar Şube Müdürlüğü laboratuvarında, farklı oranlarda hazırlanan doğal zemin-diatomit-kireç karışımlarına ait kıvam limitlerinin, kompaksiyon parametrelerinin, farklı kür süresi ve donma çözülme çevrimi sonundaki serbest basınç mukavemetlerinin belirlenmesi için deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Ayrıca da Karadeniz Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı’nda bu karışımların taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülemesi ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) analizleri yapılmıştır.

2.4.1. Optimum Kireç Oranının Belirlenmesi

Killi zeminlere kireç ilave edildiğinde suyun mevcudiyetine bağlı olarak zeminin özelliklerini iyileştiren birtakım reaksiyonlar meydana gelmektedir. Bu reaksiyonlar; katyon değişimi, yumaklaşma, karbonatlaşma ve çimentolaşma reaksiyonları olarak sıralanabilmektedir (Al-Rawas vd., 2005; Sherwood, 1993).

Zeminlerin; katyon değişim kapasitesi gibi karakteristik özelliklerine, mineralojik yapılarına göre değişen kirece karşı doğunluk derecesi vardır. Genelde bu değer, sulu ortamda iyonlaşan kirecin, ortamın pH değerini 12.4 dolaylarına çıkarabileceği kireç orandır ve bu orana optimum kireç oranı denilmektedir. Optimum oranda eklenen kireç ancak katyon değişimi, yumaklaşma ve agregasyon aşamaları için gereken kireci karşılamaktadır. Bu oranın üzerinde eklenen kireç ise zemin plastitesinde, şişme-büzülme ve işlenebilirliğinde edinilecek yeni kazanımlardan daha çok çimentolaşma reaksiyonları oluşturmakta ve zeminin zaman ile mukavemetini artırmaktadır (Al-Rawas vd, 2002; Mathew ve Rao, 1997).

ASTM D6276-99a (2006) standardına uygun olarak doğal zemine ait optimum kireç oranı belirlenmiştir. Açık havada kurutulmuş ve su içeriği belirlenmiş olan, 40 No.lu elek altı doğal zeminden, kuru ağırlığınca 25'er gramlık numuneler alınmış, bu numunelere yine kuru ağırlığınca %1'den %7'ye kadar, %1 artacak şekilde kireç ilave edilerek yedi karışım hazırlanmıştır. Her bir karışım ve 2 g kirece 100 ml de-iyonize su eklenmesiyle farklı süspansiyonlar hazırlanmıştır. 25 C sıcaklıktaki su banyosunda (şekil 2.13), her 10 dakikada 30 saniye kuvvetli alkanmak suretiyle 1 saat bekletilen karışımların pH değerleri pH metre ile ölçülmüştür (şekil 2.14). Deney sonucunda elde edilen karışımlara ait pH değerleri Tablo 2.8'de gösterilmektedir. şekil 2.15'de ise 12.4 pH değerine karşılık gelen kireç oranı gösterilmektedir.



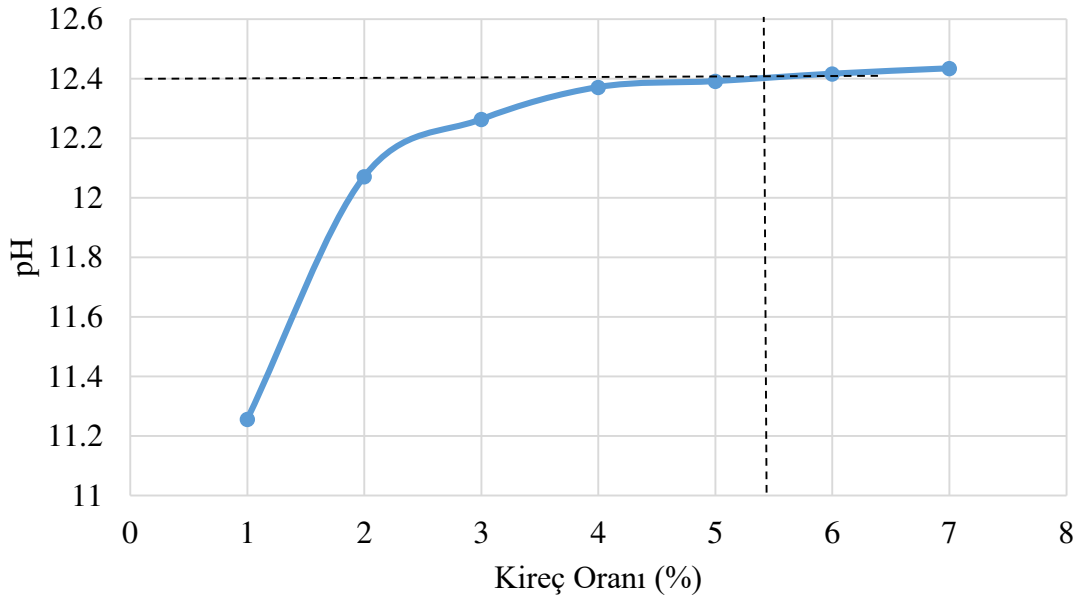
şekil 2.16. Su banyosu



Şekil 2.17. pH metre

Tablo 2.9. Karışımların pH değerleri

Kireç oranı (%)	1	2	3	4	5	6	7	100
pH	11.256	12.071	12.263	12.371	12.391	12.416	12.434	12.456
Sıcaklık (°C)	23.4	23.5	23.5	23.4	23.4	23.5	23.6	23.6



Şekil 2.18. Optimum kireç oranı (12.4 pH değerine karşılık gelen kireç oranı)

Hazırlanan karışımlarda pH değeri 12.4'de denk gelen optimum kireç oranı, %5 ile %6 arasına denk gelmektedir (yaklaşık olarak %5.4). Zeminde çimentolaşma reaksiyonu meydana gelmesi için bu oran %6 olarak seçilmiştir.

2.4.2. Zemin Karışımlarının Hazırlanması ve İsimlendirilmesi

Deneysel çalışmalarda kullanılacak olan zemin karışımlarının hazırlanmasında öncelikle, doğal zemin ile toplam kuru ağırlıkça %0, %5, %10, %20 oranlarında diatomit içeren 4 farklı zemin karışımı hazırlanmıştır. ASTM D6276-99a (2006) standardına uygun olarak belirlenen optimum kireç oranı, bu karışımların yarısına ayrıca ilave edilip, sönmüş kireç katkılı ve katkısız olacak şekilde 8 farklı zemin karışımı elde edilmiştir. Tablo 2.9' da zemin karışımlarına ait oranlar ve isimlendirmeler verilmektedir.

Tablo 2.10. Çalışmada kullanılmak üzere hazırlanan karışımların isimlendirilmesi

Numune ismi	Doğal zemin	Diatomit	Kireç (ilave)
Z	%100	%0	%0
ZD5	%95	%5	%0
ZD10	%90	%10	%0
ZD20	%80	%20	%0
ZK	%100	%0	%6
ZKD5	%95	%5	%6
ZKD10	%90	%10	%6
ZKD20	%80	%20	%6

2.4.3. Zemin Karışımlarının Kıvam Limitlerinin Belirlenmesi

Zemin karışımlarının kıvam limitleri, ASTM D4318-5 (2005) standardına göre hesaplanmıştır. Zemin karışımları, açık havada kurutulmuş, 40 No.lu (425µm) elek altı doğal zemin (40 No.lu elekten geçen yüzdesi dikkate alınarak), diatomit, sönmüş kireç ve saf su ile hazırlanıp 1 gün desikatörde bekletilmiştir. Daha sonrasında zemin karışımlarına ait likit limit ve plastik limitler belirlenmiştir.

Doğal zeminin likit limiti % 51.4, plastik limiti ise % 25.1 olarak tespit edilmiştir. Farklı zemin karışımlarına (Z, ZD5, ZD10, ZD20, ZK, ZKD5, ZKD10, ZKD20) ait kıvam limiti değerleri Tablo 2.10'da verilmektedir.

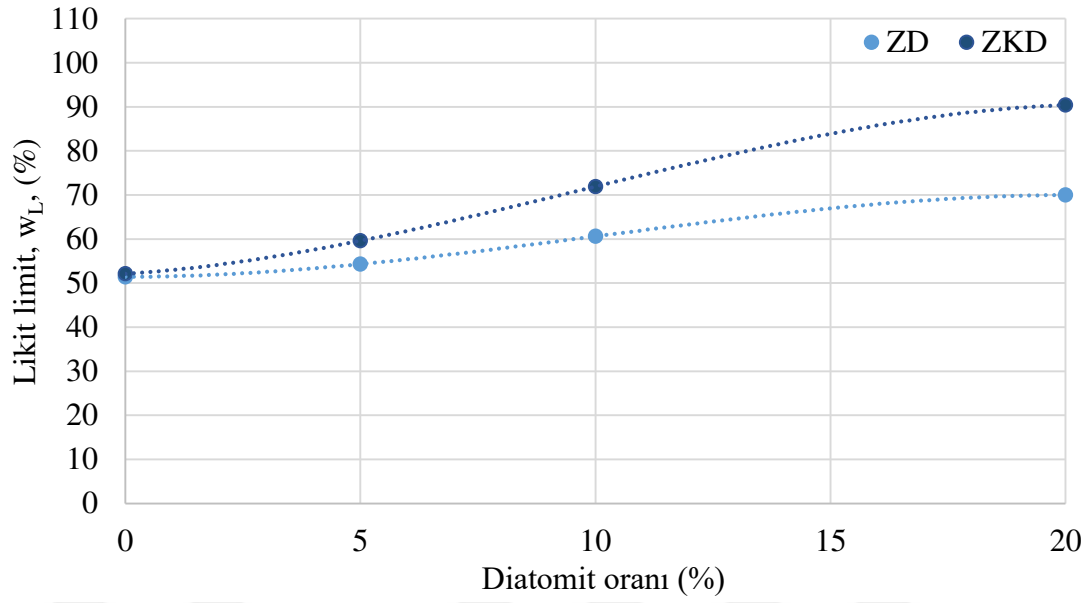
Tablo 2.11. Zemin karışımlarının kıvam limitleri ve zemin sınıfları

Numune ismi	w _L (%)	w _P (%)	I _P (%)
Z	51.4	25.1	26.3
ZD5	54.3	27.4	26.9
ZD10	60.6	33.3	27.3
ZD20	70	40.3	29.7
ZK	52.1	38.5	13.6
ZKD5	59.6	41.1	18.5
ZKD10	71.9	50	21.9
ZKD20	90.4	68.8	21.6

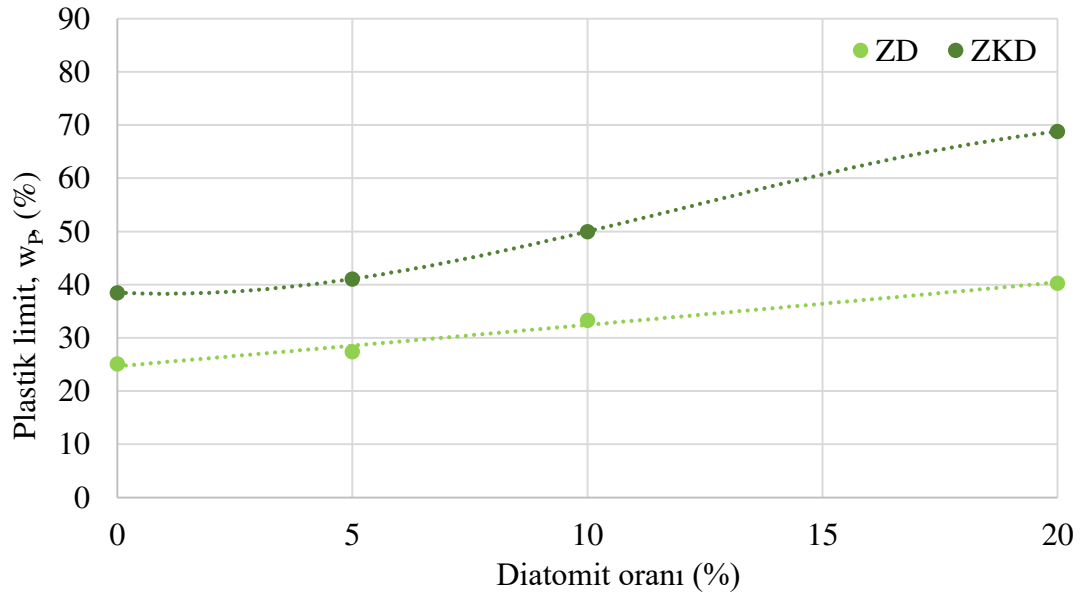
Doğal zemine %6 oranında kireç ilavesi, bu zeminin likit limitinde bir miktar, plastik limitinde ise kayda değer artışa sebebiyet vermiştir. Katyon değişimi reaksiyonları, kireç ile stabilize edilmiş doğal zeminin kıvam limitlerini etkilemektedir. Katyonların zemine nüfuz etmesi, zemin tanelerinin negatif yüklerinin nötralize olmasına neden olarak zemin tanelerinin yapısını değiştirmektedir. Bunun sonucunda da su akışında ve zeminin likit limitinde artış meydana gelmektedir (Rajasekaran, 2005).

Doğal zemine diatomit katkısı katıldığında, doğal zeminin kıvam limitinde artışlar gözlemlenmiştir. Yüksek poroziteye sahip diatomit, yüksek oranda su tutma kapasitesine sahiptir. Zemin karışımlarına eklenen su ile beraber bu boşluklar su ile dolabilmekte, bu durum da zemin karışımının su muhtevasını artırmaktadır.

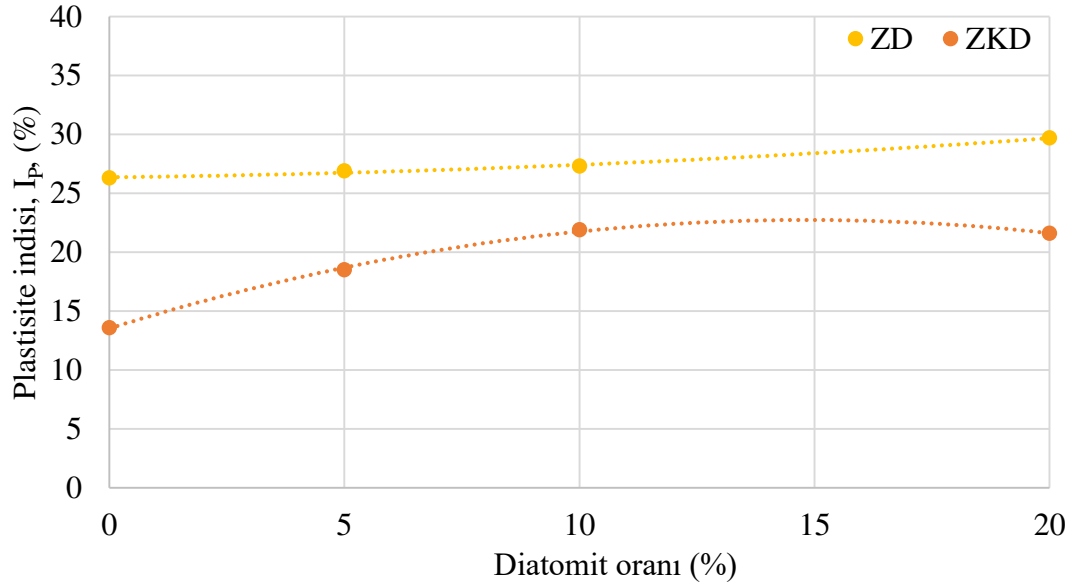
Doğal zemin-diatomit karışımlarına eklenen %6 sönmüş kireç ise karışımların hem likit limitlerinde hem de plastik limitlerinde artışa neden olmuştur. Artan diatomit oranının ve kireç katkısının karışımların likit limitine, plastik limitine ve plastisite indisine etkileri sırasıyla Şekil 2.17, 2.18 ve 2.19'da verilmektedir.



Şekil 2.19. Zemin karışımlarının likit limiti



Şekil 2.20. Zemin karışımlarının plastik limiti



Şekil 2.21. Zemin karışımlarının plastisite indisi

2.4.4. Zemin Karışımlarının Kompaksiyon Parametrelerinin Belirlenmesi

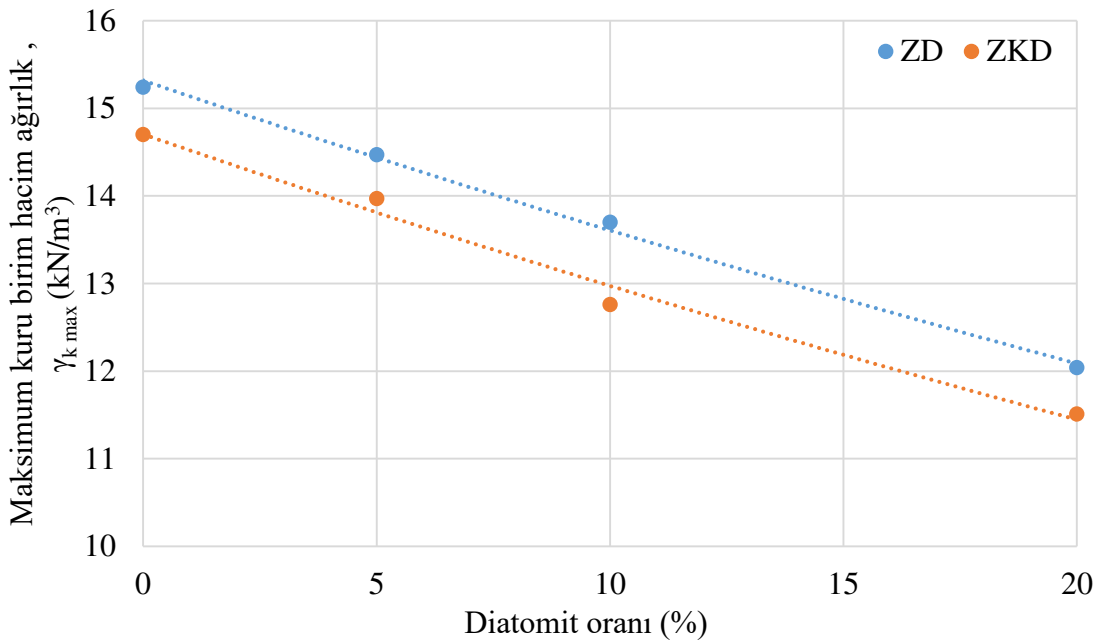
Optimum su içeriklerinin ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının belirlenmesi için, hazırlanan her bir zemin karışımı (Z, ZD5, ZD10, ZD20, ZK, ZKD5, ZKD10, ZKD20) ASTM D698-07 (2007) standardına uygun olarak, ayrı ayrı standart proktor deneyine tabi tutulmuştur. Zemin karışımlarına ait standart proktor deneyi sonucunda elde edilen kompaksiyon parametreleri Tablo 2.11’de verilmektedir.

Tablo 2.12. Zemin karışımlarına ait kompaksiyon parametreleri

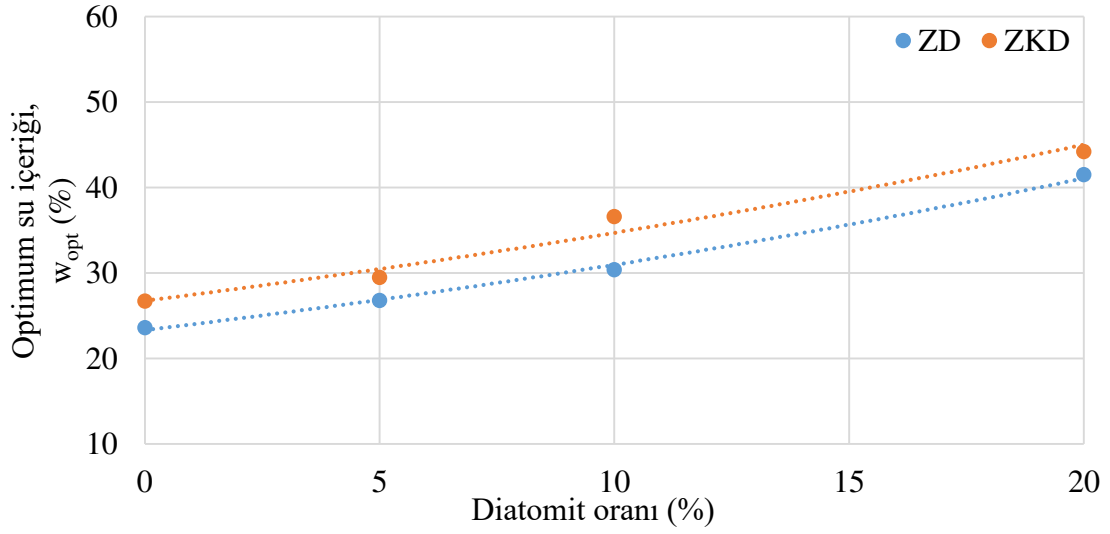
Numune ismi	Maksimum kuru birim hacim ağırlık, $\gamma_k \text{ maks (kN/m}^3\text{)}$	Optimum su içeriği, $w_{opt} \text{ (%)}$
Z	15.24	23.6
ZD5	14.47	26.8
ZD10	13.7	30.4
ZD20	12.04	41.5
ZK	14.7	26.7
ZKD5	13.97	29.5
ZKD10	12.76	36.6
ZKD20	11.51	44.2

Doğal zemine ait maksimum kuru birim hacim ağırlık ($\gamma_{k \max}$) 15.24 kN/m³ ve optimum su muhtevası (w_{opt}) %23.6 olarak belirlenmişti. Doğal zemine diatomit eklenmesiyle $\gamma_{k \max}$ 'ta bir azalma meydana gelirken w_{opt} 'da ise artışlar gözlemlenmiştir. Diatomitin gözenekli yapısından dolayı, diatomit oranı arttıkça su içeriklerinde artışlar meydana gelmiştir. Diatomit oranının artmasıyla artan su içeriğinden ve diatomitin özgül ağırlığının, doğal zemine kıyasla düşük olmasından dolayı zemin karışımlarına ait $\gamma_{k \max}$ değeri, diatomit oranı arttıkça azalmıştır.

Hazırlanan doğal zemin-diatomit karışımlarına kireç ilave edilmesi de $\gamma_{k \max}$ 'da azalışa, w_{opt} 'da ise artışa neden olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 2.21 ve Şekil 2.22). Zemine eklenen kireç, zemin taneciklerini sarmakta ve kapladığı hacmi artırmaktadır. Ayrıca sönmüş kirecin özgül ağırlığı, doğal zeminin özgül ağırlığından düşük olması da zemin karışımlarının γ_k max'larında bir azalmaya sebebiyet vermiştir (Ola, 1978; Lees vd., 1982; Rahman, 1986). Eklenen sönmüş kireç ile zemin karışımlarının optimum su içeriklerinde görülen artış ise puzolanik reaksiyonlar ile ilişkilendirilmektedir.



Şekil 2.22. Zemin karışımlarının maksimum kuru birim hacim ağırlıkları



Şekil 2.23. Zemin karışımlarının optimum su içerikleri

2.4.5. Zemin Karışımlarının Serbest Basınç Mukavemetlerinin Belirlenmesi

Hazırlanan zemin karışımlarının serbest basınç mukavemetlerinin ve göçme deformasyonlarının belirlenmesi için zemin karışımlarına serbest basınç deneyi yapılmıştır. Zemin karışımlarına ait 50 mm çapa, 100 mm yüksekliğe sahip silindirik numuneler, 0.5 mm/dk hızla aksel basınca tabi tutulmuş ve aksel gerilme-birim deformasyon grafikleri elde edilmiştir. Kireç katkılı numuneler için ASTM D5102-04 (2004), kirecsiz numuneler için ASTM D2166-06 (2006) standartları, bu çalışma kapsamında referans alınmıştır. Bu iki ASTM standardında genel olarak yakın talimatlar mevcut iken, ASTM D5102-04 (2004) standardına göre, kireç katkılı numunelerde %5 aksel birim deformasyona kadar bir kırılma gerçekleşmiyorsa %5 aksel birim deformasyona karşılık gelen gerilme değeri serbest basınç mukavemetini vermektedir. Kirecsiz numunelerde ise (ASTM D2166-06, 2006) bu değer %15 olmaktadır.

2.4.5.1. Numunelerin Hazırlanması

Hazırlanan zemin karışımlarının serbest basınç mukavemetlerinin belirlenmesi için, ASTM D5102-04 (2004) standardında tanımlanmış olan sıkıştırılmış numune hazırlama yöntemlerinden ilkinine göre, 50 mm çapa, 100 mm yüksekliğe sahip, her bir karışım ve kür süresi için üçer adet olmak üzere, toplam 96 adet silindirik numune hazırlanmıştır (Şekil

2.23). Maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su içeriğinde hazırlanan kireçsiz zemin karışımları 16 saat, kireç ilaveli zemin karışımları, katyon değişiminin tamamlanmasına karşılık gelen 1 saat ıslak desikatörde bekletilerek sıkıştırılmaya hazır hale getirilmiştir. Kompaksiyon parametrelerinden yararlanılarak, 50 mm çap, 100 mm yüksekliğe sahip bir silindir için gerekli zemin miktarları belirlenmiş ve 6 eşit parça halinde Şekil 2.24'teki kalıpta tokmak yardımı ile sıkıştırılmıştır. Her bir kademenin ne kadar sıkıştırılacağı tokmak üzerinde var olan, silindirin yüksekliğini 3 eşik parçaya bölen çizgiler ile belirlenmiştir. Ara sıkıştırma işlemlerinde, daha sonra eklenecek numune ile aderansı kolaylaştırılmak için sıkışan zemin yüzeyi hafif bir şekilde tahrip edilmiştir.



Şekil 2.24. Hazırlanan numuneler



Şekil 2.25. Silindirik numune hazırlama kalıbı

2.4.5.2. Kür İşlemi ve Donma-Çözülme Çevrimi

Hazırlanan numuneler 25°C sıcaklıkta ve %95 bağıl neme sahip nem dolabında 1, 7, 28 günlük kür sürelerinde bekletilmiştir. Ayrıca 24 adet numune ise, 28 günlük kür süresinde bekletildikten sonra 12 adet donma-çözülme çevrimine tabi tutulmuştur.

Donma-çözülme çevriminde ASTM D560-03 (2003) standardı referans alınmıştır. İlgili standart çimento ile stabilize edilen zeminlerin donma-çözülme çevrimi altında kütle kaybının belirlenmesi ile ilgili bir standart olup, bu çalışmada bu standardın çevrim koşullarından yararlanılmıştır. Numuneler kireç ile stabilize edildiğinden 28 günlük kür süresinde bekletildikten sonra 24'er saat +21°C ve -23°C sıcaklıklarda ve %95 bağıl nemde 12 defa donma-çözülme çevrimine tabi tutulmuştur. Donma-çözülme çevrimi sonrasında numuneler serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Şekil 2.25'te iklimlendirme (donma-çözülme çevrimi) ve nem dolapları görülmektedir.



Şekil 2.26. İklimlendirme ve nem dolapları

2.4.5.3. Serbest Basınç Deneyi

Her bir zemin karışımı ve kür süresi için üçer adet hazırlanan, 50 mm çapa, 100 mm yüksekliğe sahip silindirik numuneler, 1 günlük, 7 günlük, 28 günlük kür süresi ve 28 günlük kür süresinden sonra 12 donma-çözülme çevrimine tabi tutulmuştur. Daha sonra bu numuneler ile serbest basınç deneyi, ASTM D5102-04 (2004) ve ASTM D2166-06 (2006) standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Numuneler, üç eksenli basınç deneyi düzeneğinde çevre basıncı verilmeden, dakikada 0.5 mm deformasyon hızı ile (Şekil 2.26) tek eksenli basınca tabi tutulmuş ve eksenel gerilme-birim deformasyon grafikleri elde edilmiştir.

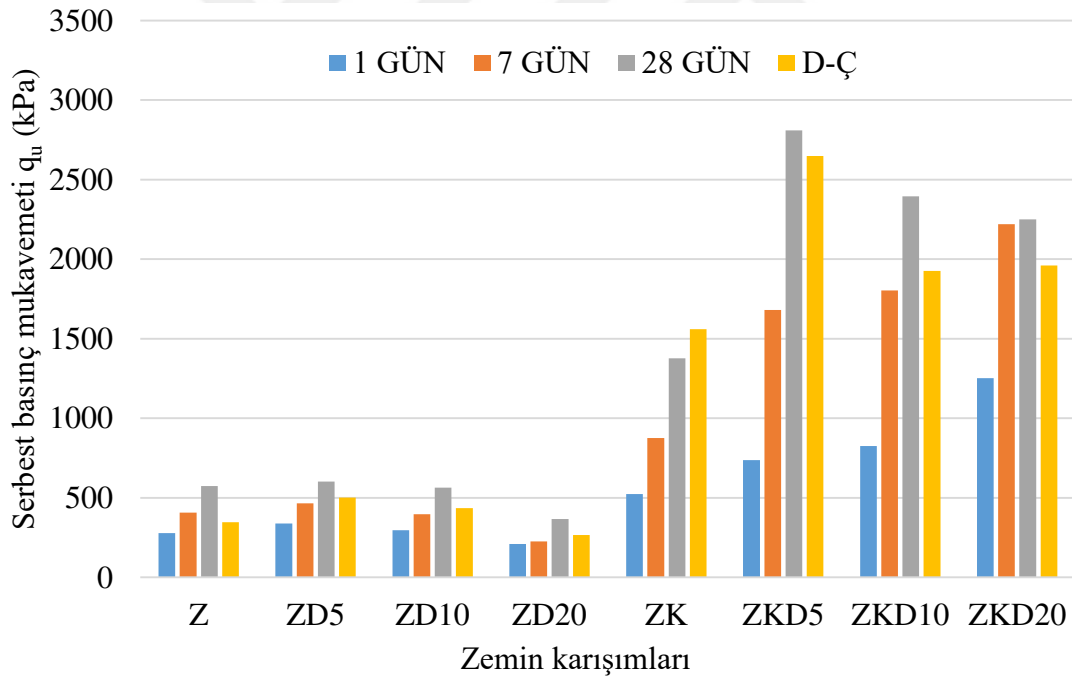


Şekil 2.27. Serbest basınç deneyi

Farklı kür sürelerinde zemin karışımlarına ait ortalama serbest basınç mukavemeti değerleri Tablo 2.12 ve Şekil 2.27’de verilmektedir.

Tablo 2.13. Zemin karışımlarının serbest basınç mukavemetleri

Numune ismi	Serbest basınç mukavemeti q_u (kPa) 1 günlük kür	Serbest basınç mukavemeti q_u (kPa) 7 günlük kür	Serbest basınç mukavemeti q_u (kPa) 28 günlük kür	Serbest basınç mukavemeti q_u (kPa) D-Ç çevrimi
Z	279	408	574	347
ZD5	339	465	602	501
ZD10	297	397	565	435
ZD20	210	227	367	266
ZK	524	875	1377	1560
ZKD5	738	1681	2810	2648
ZKD10	826	1804	2395	1927
ZKD20	1252	2220	2251	1960



Şekil 2.28. Zemin karışımlarının serbest basınç mukavemetleri

Doğal zemin numunesinin serbest basınç mukavemeti (q_u) 279 kPa olarak belirlenmiştir. %5 diatomit içeren karışımına ait mukavemet değerinin, doğal zemin ile kıyaslandığında yaklaşık %10 oranında arttığı belirlenmiştir. Zemin karışımının %10 oranında diatomit içermesinin mukavemeti çok değiştirmedığı, %20 diatomit içermesinin ise

serbest basınç mukavemetini olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir. Farklı oranda diatomit içeren zemin karışımlarına kireç ilavesi ise, zemin mukavemetinde çok büyük oranlarda artış meydana getirdiği belirlenmiştir.

Kireçsiz numunelerde kür süresi, serbest basınç mukavemetlerini bir miktar olumlu etkilemiştir. Kireç katkılı numunelerde ise; kireç, diatomit ve zemin taneleri arasında meydana gelen çimentolaşma reaksiyonlarından dolayı artan kür sürelerinde, karışımların serbest basınç mukavemetlerinde kayda değer artışlar meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Hazırlanan karışımlara ait numunelerin serbest basınç mukavemetleri kıyaslandığında en yüksek değere, 28 günlük kür süresi sonunda, 2810 kPa ile ZKD5 zemin karışımının eriştiği gözlemlenmiştir. ZD20 numunelerinin ise her kür süresince en düşük mukavemet değerine sahip olduğu belirlenmiştir.

ZKD20 zemin karışımı, 7 günlük kür süresi sonunda en yüksek mukavemet değerine (2220 kPa) erişmiş olsa da 28 günlük kür süresi sonunda mukavemetinde, diğer zemin karışımlarına oranla daha az artış (2251 kPa) gözlemlenmiştir. ZKD20 zemin karışımı, diğer kireçli zemin karışımlarına oranla daha yüksek oranda silika kaynağı içermesinden dolayı puzolanik reaksiyonların daha kısa sürede tamamlandığı düşünülmektedir. 7 günlük kür süresi sonrasındaki mukavemet değeri ile 28 günlük kür süresi sonrasındaki değer arasında fazla bir farkın bulunmaması bu durum ile ilişkilendirilmektedir.

Sıcaklığın $+4^{\circ}\text{C}$ 'nin altına düştüğü durumlarda puzolanik reaksiyonlar durmakta, sıcaklığın, tekrar bu değerin üzerine çıktığı zamanlarda ise kaldığı yerden devam etmektedir. Bu durum, donma-çözülme çevriminde, zemin karışımlarında meydana gelen puzolanik reaksiyonların tamamlanmasını geciktirmektedir. Ayrıca, sıcaklığın 0°C 'nin altına düştüğü durumlarda, zemin içerisindeki su donmakta ve suyun hacminde artış olmaktadır. Artan su hacmi, zemin taneleri arasında meydana gelen bağlara hasar vererek zemin mukavemetini olumsuz etkileyebilmektedir (Bell, 1996).

Donma-çözülme çevrimi sonrasında ZK numunesi hariç, diğer numunelerin mukavemet kaybettiği gözlemlenmiştir. Bu durum, kireç içermeyen zemin karışımlarında puzolanik reaksiyonun olmamasından, diatomit içeren kireçli zemin karışımlarında ise puzolanik reaksiyonların erken tamamlanmasından dolayı donma-çözülme çevrimi esnasında dayanımda yeni kazanımlar edinemedikleri, aksine zemin içerisindeki donan suyun, zemin taneleri arasındaki bağlara hasar vermeyesiyle mukavemeti olumsuz etkilemiş olmasıyla ilişkilendirilmektedir. ZK zemin karışımında ise çimentolaşma reaksiyonları devam ettiğinden donma-çözülme çevrimi, mukavemet kazanma hızını yavaşlatsa da çevrim

sonrası zemin mukavemetinde bir miktar artış gözlemlenmiştir. Yine de donma-çözülme çevrimi sonrasında, kireç katkılı zemin karışımları arasında en düşük değere (1560 kPa) ZK zemin karışımı erişmiştir.

2.4.5.3.1. 1 Günlük Kür Süresi Sonrası Serbest Basınç Mukavemeti

Zemin karışımlarına ait toplam 24 adet silindirik numune, nem dolabında (25°C sıcaklık, %95 bağıl nem) 1 günlük kür süresinde bekletildikten sonra serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Zemin karışımlarına ait serbest basınç mukavemeti değerleri Tablo 2.13'te verilmektedir.

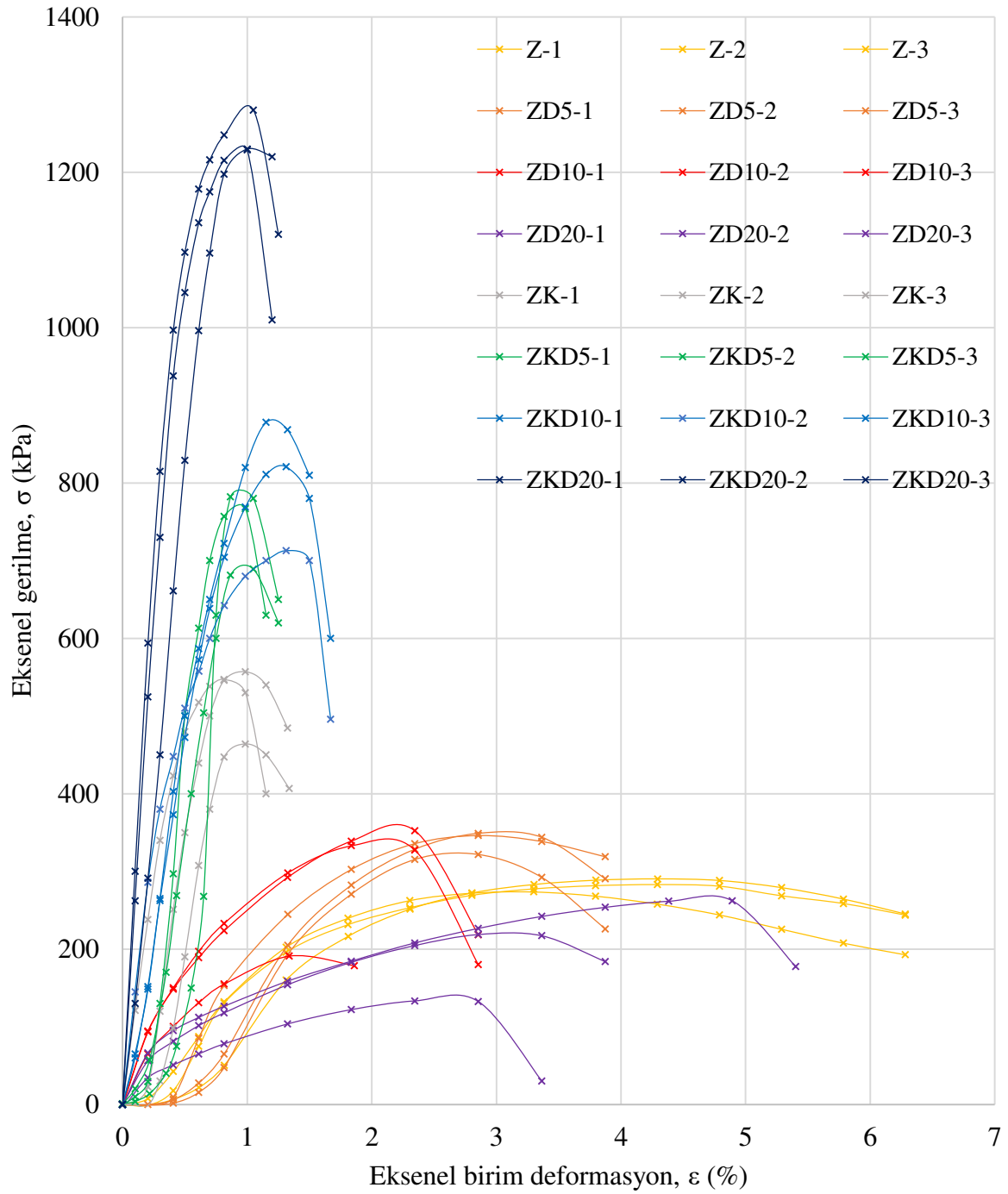
Tablo 2.14. 1 günlük kür süresi sonrası zemin karışımlarına ait numunelerin serbest basınç mukavemetleri

Numune	Serbest basınç mukavemeti, q_u (kPa)							
No	Z	ZD5	ZD10	ZD20	ZK	ZKD5	ZKD10	ZKD20
1	271	323	338	220	557	697	856	1280
2	287	344	358	135	550	750	878	1229
3	280	350	194	274	464	767	745	1246
Ortalama	279	339	297	210	524	738	826	1252

1 günlük kür süresi sonrasında doğal zeminin ortalama serbest basınç mukavemeti 279 kPa olarak belirlenmişti. Zemin karışımının kuru ağırlığınca %5 oranında diatomit içermesi, doğal zemin ile kıyaslandığında mukavemet değerini yaklaşık %19 oranında arttırdığı görülürken, %10 diatomit içermesinin mukavemette kayda değer bir değişiklik meydana getirmediği tespit edilmiştir. %20 diatomit ile hazırlanan karışımın serbest basınç mukavemeti ise %25 oranında düşmüştür. Kırılma anındaki eksenel birim deformasyonların, %10 diatomit oranına kadar azaldığı yani zeminin daha gevrek hale geldiği gözlemlenmiştir. %20 diatomit içeren karışımlarda ise tekrar bir miktar attığı kaydedilmiştir.

Doğal zemine kuru ağırlığınca %6'sı kadar kireç ilave edilmesi doğal zemine ait serbest basınç mukavemetini yaklaşık iki katına çıkarmıştır. ZKD5 zemin karışımının, doğal zemin ile kıyaslandığında serbest basınç mukavemeti 2.5 kattan fazla bir değere, ZKD10 ve ZKD20 zemin karışımlarının ise sırasıyla yaklaşık 3 ve 4.5 katı değerlere eriştiği

gözlemlenmiştir. Kireç ilavesi numuneleri daha gevrek bir yapıya büründürdüğünden dolayı, kırılma anındaki birim deformasyonları %0.8~1.3 aralığında olup, bu oran kireçsiz numunelere kıyasla epey düşüktür. Şekil 2.28’de zemin karışımlarının 1 günlük kür süresi sonunda eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği verilmektedir.



Şekil 2.29. 1 günlük kür süresi sonundaki zemin karışımlarına ait eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği

2.4.5.3.2. 7 Günlük Kür Süresi Sonrası Serbest Basınç Mukavemeti

Zemin karışımlarına ait toplam 24 adet silindirik numune, nem dolabında (25°C sıcaklık, %95 bağıl nem) 7 günlük kür süresinde bekletildikten sonra serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deneye ait sonuçlar Tablo 2.14'te verilmektedir.

Tablo 2.15. 7 günlük kür süresi sonrası zemin karışımlarına ait numunelerin serbest basınç mukavemetleri

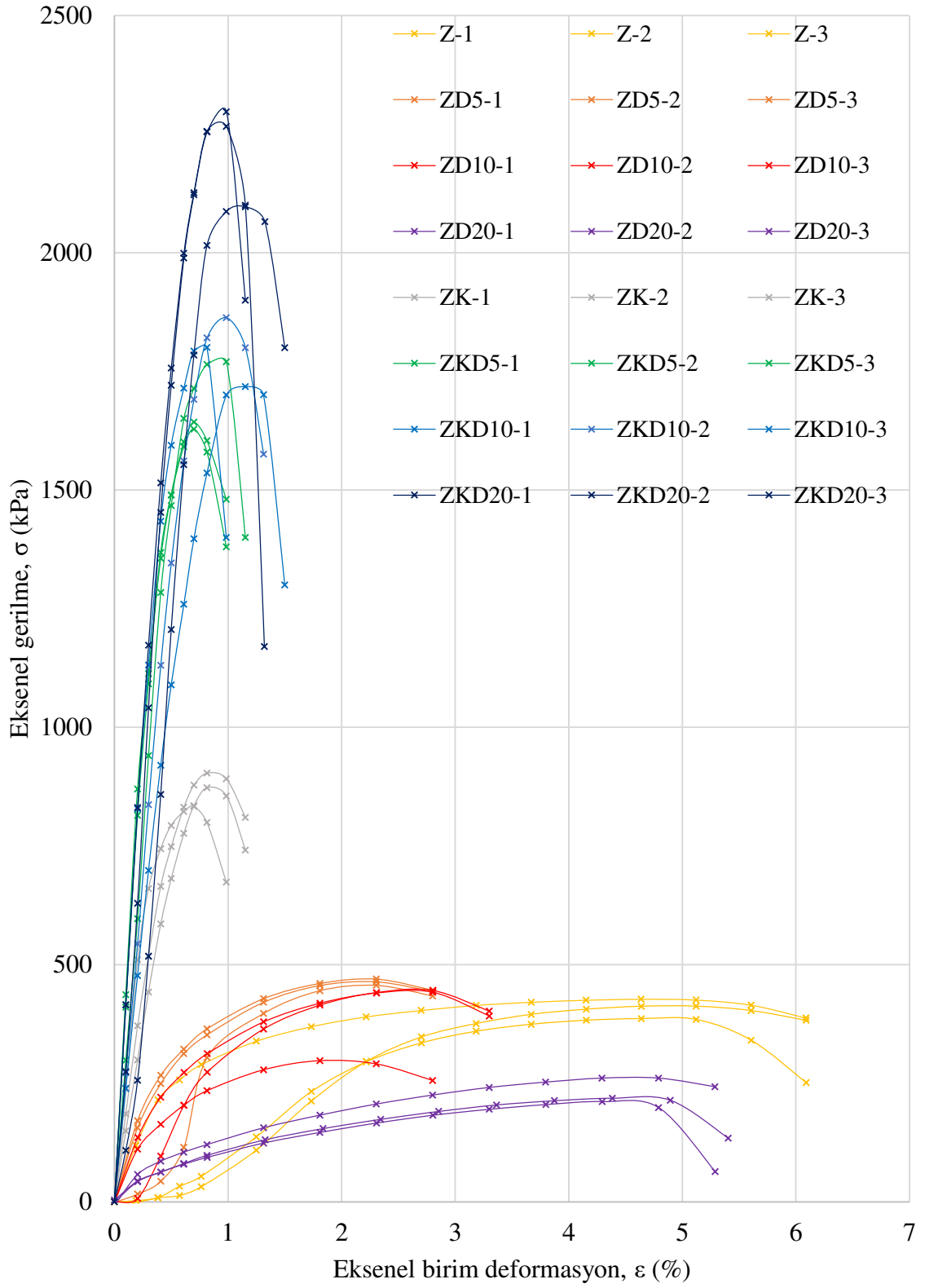
Numune		Serbest basınç mukavemeti, q_u (kPa)						
No	Z	ZD5	ZD10	ZD20	ZK	ZKD5	ZKD10	ZKD20
1	423	459	446	210	922	1775	1832	2266
2	381	473	301	216	833	1628	1863	2097
3	421	462	444	256	870	1641	1718	2297
Ortalama	408	465	397	227	875	1681	1804	2220

%5 diatomit içeren kireçsiz zemin karışımının mukavemeti, doğal zemin ile kıyaslandığında yaklaşık %15 oranında arttığı gözlemlenmiştir. %10 diatomit içeren karışımlar doğal zemin ile yaklaşık aynı değerlerde kalırken, %20 diatomit içeren numunelerin mukavemetlerinde düşüş gözlemlenmiştir. 1 ve 7 günlük küre tabi tutulan zemin numunelerinin hem serbest basınç mukavemetleri hem de kırılma anındaki eksenel birim deformasyon değerleri birbirine benzemektedir. 6 gün fazla kür süresi serbest basınç mukavemeti değerlerinde bir miktar artışa sebebiyet vermiştir.

ZK zemin karışımının 7 günlük kür süresi sonundaki serbest basınç mukavemetlerinde, 1 günlük kür süresi sonunda edindiği değer ile kıyaslandığında %60'ın üzerinde bir artış, doğal zemin numuneleri ile kıyaslandığında ise yaklaşık %115'lik bir artış gözlemlenmiştir.

Diatomit içeren kireçli zemin karışımlarının 7 günlük kür süresi sonrasındaki mukavemetleri, doğal zemin numuneleri ile kıyaslandığında 4.5~5.5 kat arttığı saptanmıştır. Bu zemin karışımlarına ait en yüksek mukavemet değerine (ortalama 2220kPa) ZKD20 karışımı sahip iken ZKD5 zemin karışımında kür süresinin etkisi ön plana çıkmaktadır.

7 günlük kür süresi sonundaki zemin karışımlarına ait eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği Şekil 2.29'da gösterilmektedir.



Şekil 2.30. 7 günlük kür süresi sonundaki zemin karışımlarına ait eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği

2.4.5.3.3. 28 Günlük Kür Süresi Sonrası Serbest Basınç Mukavemeti

Kireç ile stabilizasyonda nihai mukavemetin 1 ila 3 ay arasında olduğuna ve en az 28 günlük kür süresinin gerekliliğine dair birçok araştırma mevcuttur. Bu araştırmaların sonucunda, hazırlanan karışımların 28 günlük kür süresinin sonrasında eriştikleri mukavemet değeri, diatomit ve kireç katkısının stabilizasyona etkisinin değerlendirilmesinde önemli olmaktadır. 28 günlük kür süresine tabi tutulan karışımlar üzerinde serbest basınç deneyi yapılmıştır. Zemin karışımlarının 28 günlük kür süresi sonrası serbest basınç mukavemetleri Tablo 2.15'te verilmektedir.

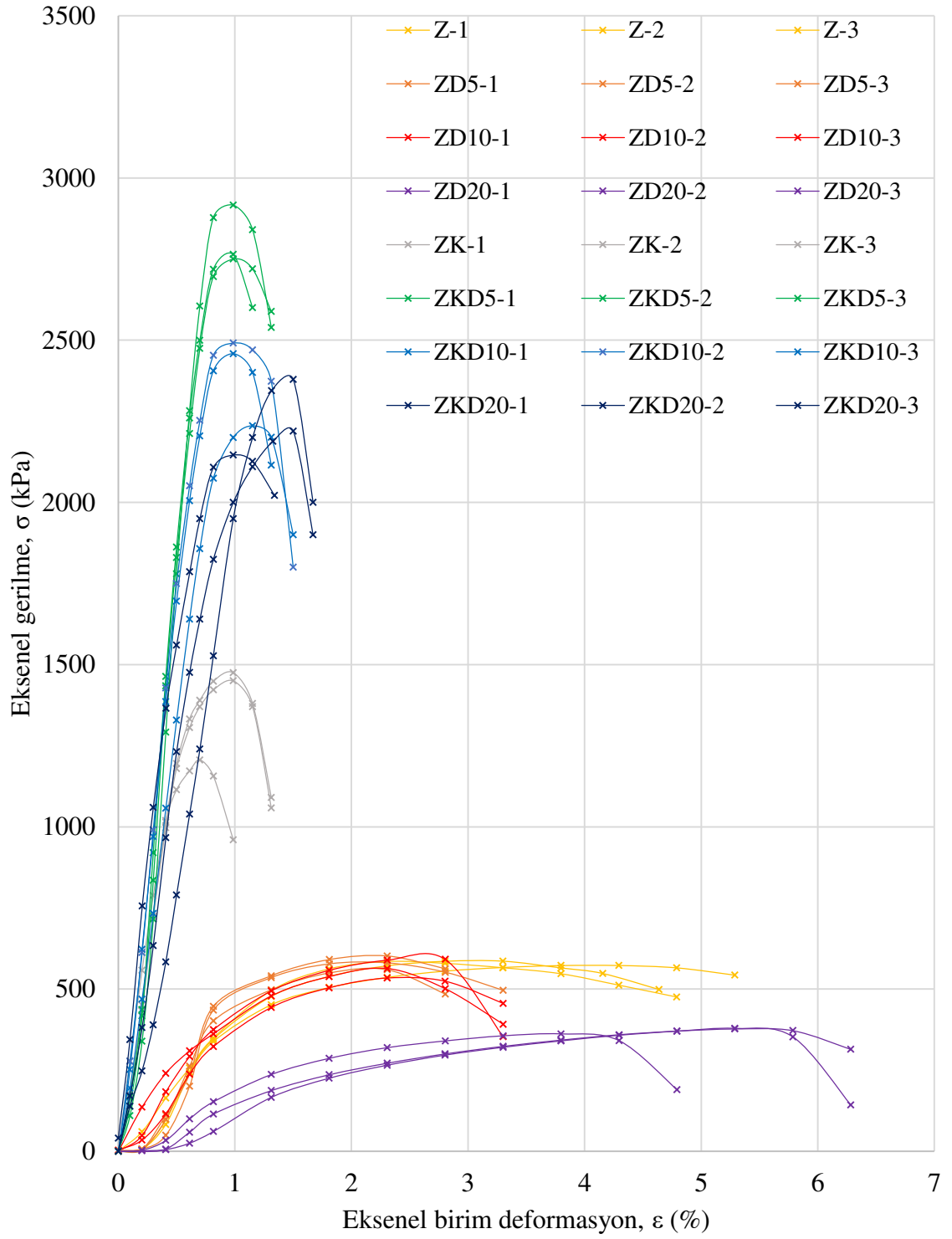
Tablo 2.16. 28 günlük kür süresi sonrası zemin karışımlarına ait numunelerin serbest basınç mukavemetleri

Numune	Serbest basınç mukavemeti, q_u (kPa)							
No	Z	ZD5	ZD10	ZD20	ZK	ZKD5	ZKD10	ZKD20
1	565	599	538	371	1206	2750	2458	2379
2	587	606	593	360	1475	2764	2491	2146
3	570	601	564	370	1450	2916	2236	2228
Ortalama	574	602	565	367	1377	2810	2395	2251

Doğal zemin-diatomit karışımlarının mukavemet değerleri, 1 günlük kür süresi sonrasındaki değerlere oranla %75~%90 oranında artmıştır. Kırılma anındaki eksenel birim değişimlerinde ise yaklaşık 0.5 değerinde bir azalma gözlemlenmiştir.

Kireç katkılı karışımlar için, doğal zemin ile kıyaslandığında ZK zemin karışımının serbest basınç mukavemeti 2 katından fazla bir değere ulaşırken %10 ve %20 diatomit içeren karışımlar için bu değer yaklaşık 4 katına çıkmıştır. %5 diatomit içeren zemin karışımına ait serbest basınç mukavemeti, 28 günlük kür süresi sonunda yaklaşık 5 katına çıkmış ve en yüksek değere (ortalama 2810 kPa) ulaşmıştır. 28 günlük kür süresi sonucunda %5 diatomit içeren kireç katkılı zemin karışımı, sönmüş kireç ve diatomit ile stabilizasyonda en etkili sonucu verdiği gözlemlenmiştir.

28 günlük kür süresine tabi tutulan zemin karışımlarına ait eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği Şekil 2.30'da verilmektedir.



Şekil 2.31. 28 günlük kür süresi sonundaki zemin karışımlarına ait eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği

2.4.5.3.4. Donma-Çözülme Çevrimi Sonrasında Serbest Basınç Mukavemeti

Sıcaklığın $+4^{\circ}\text{C}$ 'nin altına düştüğü durumlarda puzolanik reaksiyonlar durmakta, sıcaklığın tekrar bu değerin üzerine çıktığı zamanlarda ise kaldığı yerden devam etmektedir. Bu durum, donma-çözülme çevriminde zemin karışımlarında meydana gelen puzolanik reaksiyonların tamamlanmasını geciktirmektedir. Ayrıca sıcaklığın 0°C 'nin altına düştüğü durumlarda zemin içerisindeki su donmakta ve artan hacim zemin taneleri arasında meydana gelen bağlara hasar vermektedir (Bell, 1996).

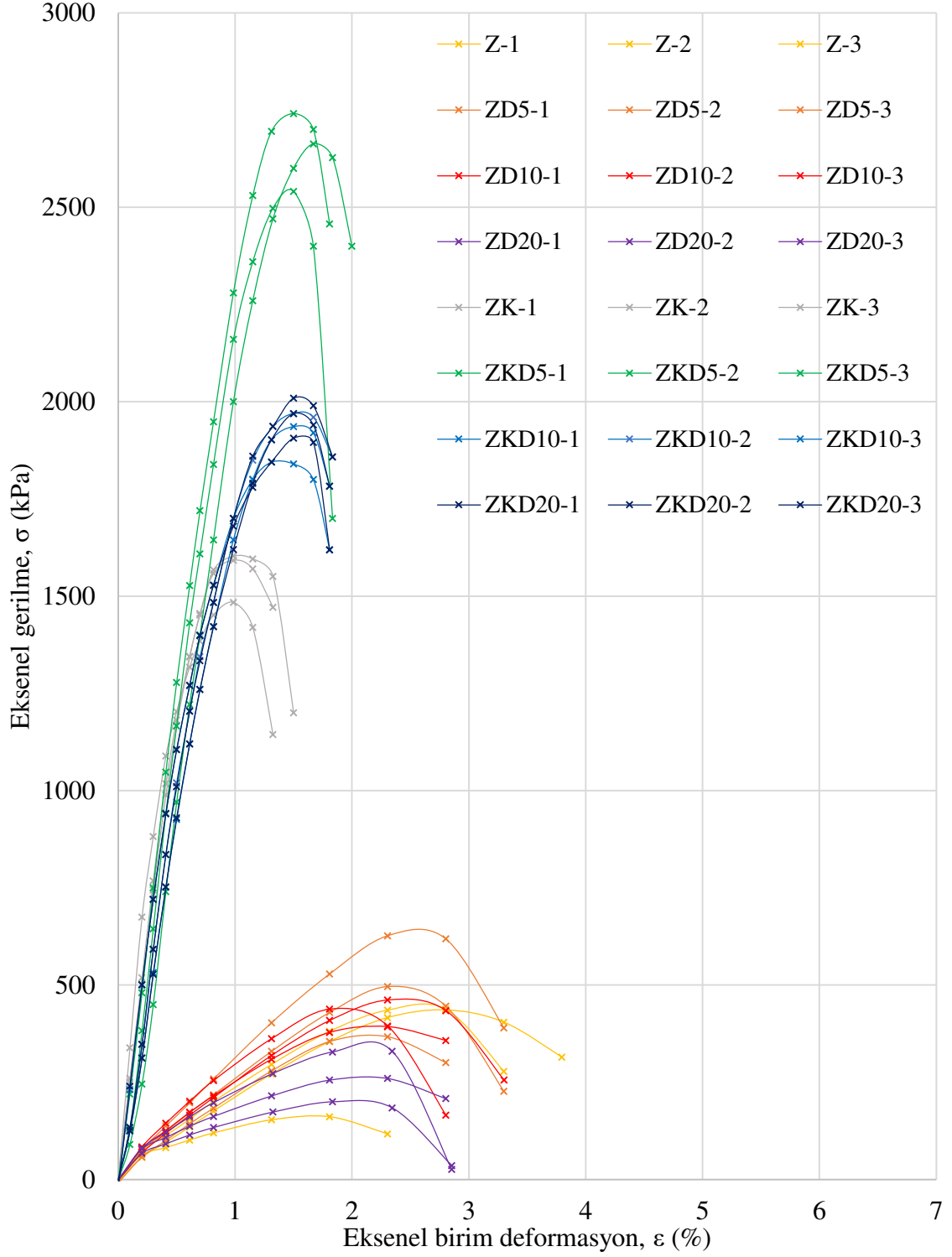
Donma-çözülme çevriminde, ASTM D560-03 (2003) standardındaki iklimlendirme koşullarından yararlanılmıştır. Numuneler kireç ile stabilize edildiğinden 28 günlük kür süresi sonunda 24'er saat $+21^{\circ}\text{C}$ ve -23°C sıcaklıklarda ve %95 bağıl nemde 12 defa donma-çözülme çevrimine tabi tutulmuştur. Donma-çözülme çevriminden sonra serbest basınç deneyine tabi tutulan zeminlere ait serbest basınç mukavemetleri Tablo 2.16'da verilmektedir.

Tablo 2.17. Donma-çözülme çevrimi sonrası zemin karışımlarına ait numunelerin serbest basınç mukavemetleri

Numune	Serbest basınç mukavemeti, q_u (kPa)							
No	Z	ZD5	ZD10	ZD20	ZK	ZKD5	ZKD10	ZKD20
1	438	633	465	333	1603	2541	1876	1969
2	164	370	443	203	1484	2663	1970	1902
3	439	499	396	263	1592	2741	1936	2009
Ortalama	347	501	435	266	1560	2648	1927	1960

Donma-çözülme çevriminden sonra zemin mukavemetlerinde azalmalar gözlemlenmiştir. Doğal zemin yaklaşık %40 oranında değer kaybederken, diatomit içeren kireç katkısız zemin karışımlarında bu oran %17 ile %29 arasında olduğu belirlenmiştir. Donma-çözülme çevrimi öncesi ortalama 2810 kPa dayanıma sahip ZKD5 karışımı yaklaşık %6 mukavemet kaybederek ortalama 2648 kPa dayanım göstermiştir. ZK karışımında ise donma-çözülme çevrimi süreci boyunca çimentolaşma reaksiyonları devam etmiş ve serbest basınç mukavemetinde bir düşüş gözlemlenmemiştir.

Donma-çözülme çevrimine tabi tutulan zemin karışımlarına ait eksenel gerilme-birim deformasyon grafikleri Şekil 2.31’de verilmektedir.

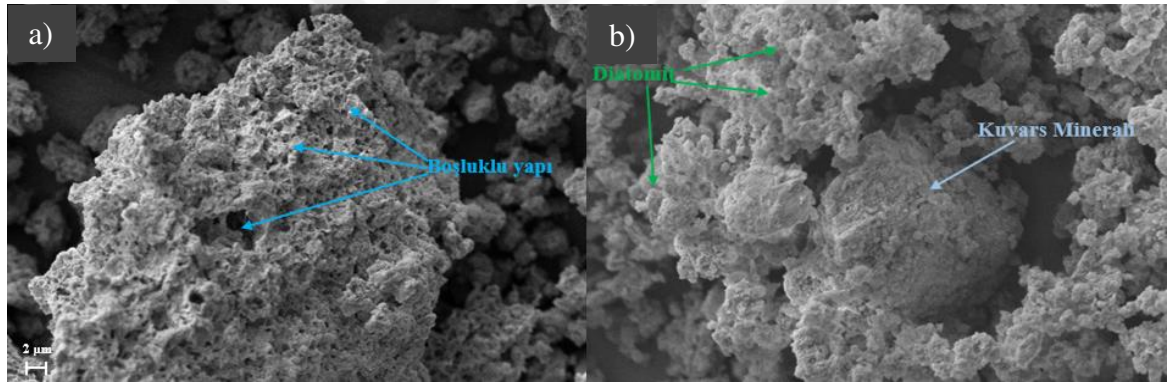


Şekil 2.32. Donma-çözülme çevrimi sonundaki zemin karışımlarına ait eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği

2.5. Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntülemesi ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi Analizi

Hazırlanan karışımların 28 günlük kür süresi sonundaki örneklerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülemesi ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) analizi Karadeniz Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca doğal zemin, işlem görmüş ve görmemiş diatomit için de bu işlemler uygulanmıştır.

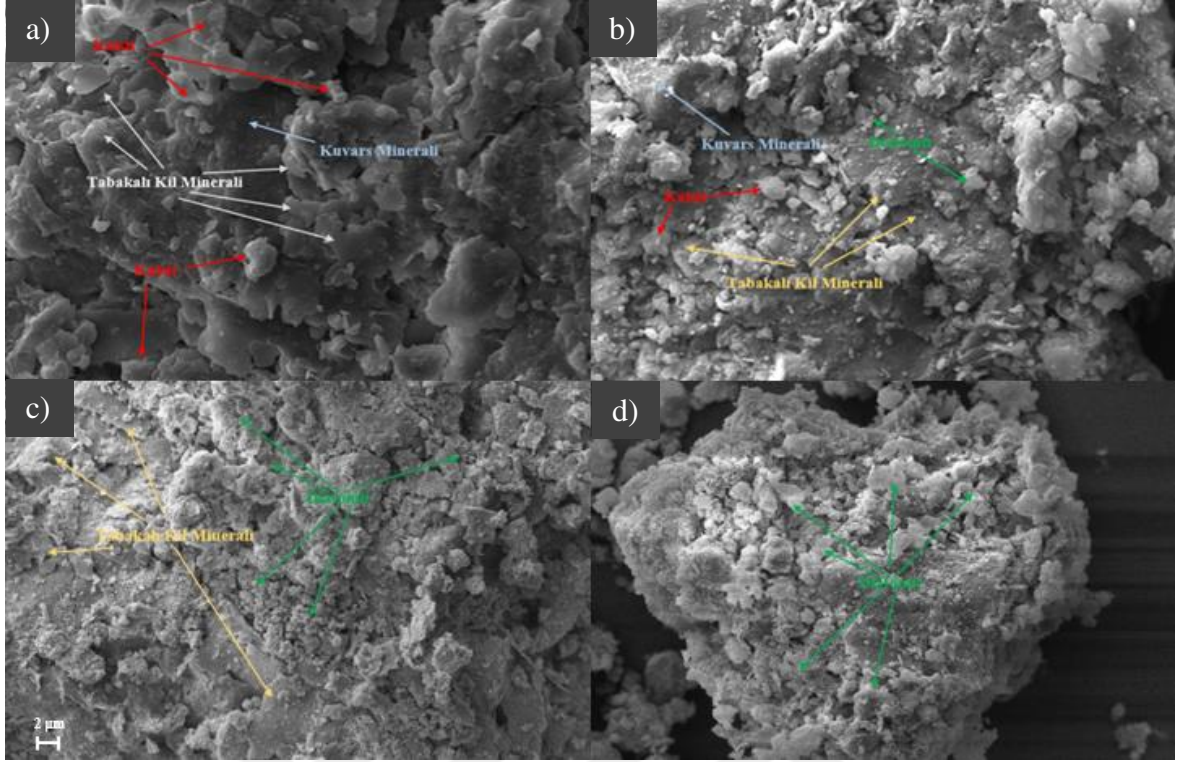
İşlem görmemiş diatomitin boşluklu yapısı, SEM'de 5000 kat büyütülmesi ile gözlemlenmiştir (Şekil 2.33a). Fakat diatom canlılarının kalıntılarına rastlanılamamıştır. Düşük sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulup, öğütülen diatomitin ince yapısı ve de içerdiği az miktardaki kuvars mineralleri, SEM görüntülemesinde gözlemlenebilmiştir (Şekil 2.33b).



Şekil 2.33. Diatomitin SEM görüntüsü

Doğal zemine ait mineraller, örneklerin SEM ile 5000 kat büyütülmesi ve EDS analizi sonucunda belirlenmeye çalışılmıştır. Noktasal EDS analizi ve EDS haritalaması ışığında, doğal zeminde bulunan mineraller Şekil 2.34'te verilmektedir.

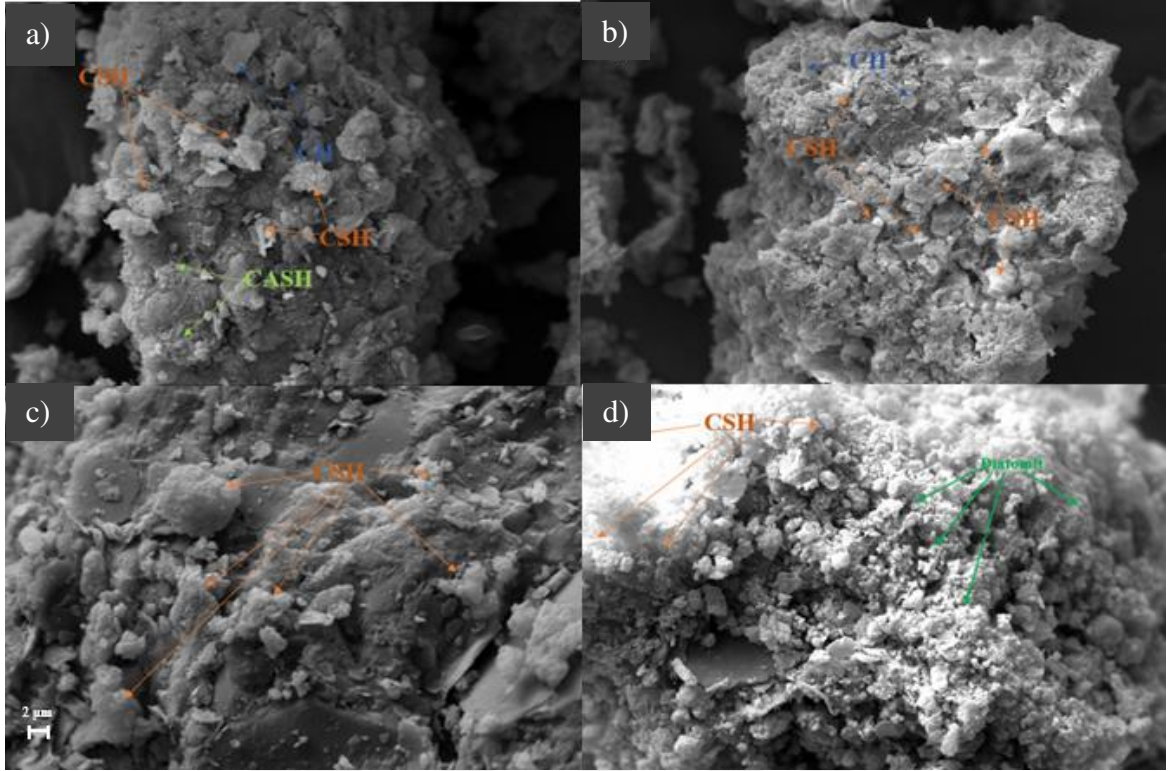
Doğal zemin-diatomit karışımlarının SEM ile 5000 kat büyütülen görüntülerinde çimentolaşma ürünlerine rastlanılamamıştır. Diatomit oranı arttıkça taneleri saran diatomitin arttığı SEM görüntüleri ile gözlemlenebilmektedir. ZD5, ZD10 ve ZD20 zemin karışımlarına ait SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 2.34b, 2.34c ve 2.34d'de verilmektedir.



Şekil 2.34. Kireç katkısız zemin karışımlarının SEM görüntüleri

28 günlük kür süresi sonunda ZK zemin karışımında CH, CSH ve CASH çimentolaşma ürünlerine rastlanmaktadır (Şekil 35a). Noktasal EDS analizi ve EDS haritalama sonucunda bu ürünler tespit edilebilmiştir. Ayrıca literatürde tanımlandığı şekilde, lifli yapıların CAH ya da CASH olduğu, köşeli yapıların CH, kristal yapıların CSH olduğu düşünülmektedir.

ZKD5, ZKD10 ve ZKD20 zemin karışımları içerdiği diatomitten dolayı yüksek oranda silika kaynağına sahiptir. Bu durum sönmüş kirecin kolaylıkla puzolanik reaksiyon göstermesine olanak sağlamaktadır. Bu reaksiyonlar sonucunda sıklıkla çimentolaşma ürünü olan CSH meydana gelmektedir. Bu karışımlara ait 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüleri ile noktasal EDS analizi ve EDS haritalama sonucunda, 28 günlük kür süresi sonrasında zemin karışımlarının içerisinde CSH çimentolaşma ürünlerine rastlanmıştır. CH, CAH, CASH çimentolaşma ürünlerine ise daha seyrek rastlanılmıştır. ZKD5, ZKD10 ve ZKD20 zemin karışımlarına ait 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 2.35b, 2.35c ve 2.35d'de verilmektedir.



Şekil 2.35. Kireç katkılı zemin karışımlarının SEM görüntüleri

3. SONUÇLAR

Zayıf zeminlerin iyileştirilmesinde katkılı zemin stabilizasyonu sıklıkla kullanılmaktadır. Bu bağlamda farklı katkılar ile birçok çalışma yürütülmüştür. Bunlardan biri olan doğal puzolanlar ile yapılan stabilizasyon çalışmaları hem maliyet hem de zaman açısından uygun olmaktadır. Diatomit yüksek oranda SiO_2 içerdiğinden dolayı doğal puzolan olarak değerlendirilebilmektedir. Bu çalışmada, bünyesinde yüksek miktarda SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 bileşiklerini (toplam %89.49) içeren, ince öğütülmüş Ankara Kazan diatomitinin katkı malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Diatomit, aktif CaO eksikliğinden dolayı puzolanik (çimentolaşma) reaksiyonların meydana gelebilmesi için, birincil bağlayıcı olan sönmüş kireç ile beraber kullanılmıştır.

Diatomitin zemin stabilizasyonunda kireçle birlikte kullanılabilirliğinin araştırılması için, %0, %5, %10 ve %20 oranında diatomit içeren zemin karışımlarına optimum oranda (%6) kireç ilave edilmesiyle kireçli ve kireçsiz olmak üzere hazırlanan 8 farklı karışım (Z, ZD5, ZD10, ZD20, ZK, ZKD5, ZKD10 ve ZKD20) üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda, diatomit ve kireç katkılarının, zeminin kıvam limitlerinde, kompaksiyon parametrelerinde, farklı kür süreleri ve donma-çözülme çevrimi sonrasında serbest basınç mukavemetinde meydana getirdiği değişimler incelenmiştir.

Diatomit ve kireç katkısının, doğal zeminin kıvam limitlerine olan etkisi incelendiğinde; yüksek porozitesinden dolayı diatomit katkısı, zeminin su talebini artırmakta, zeminin likit limit ve plastik limitinde artışa sebebiyet vermektedir. Yapılan çalışmalarda, doğal zeminin likit limiti %51.4 ve plastik limiti %25.1 olarak bulunmuştur. Zemin karışımının %20 oranında diatomit içermesi durumunda (ZD20) likit limitin %70'e, plastik limitin ise %41.4'e yükseldiği gözlemlenmiştir. Kireç katkısının ise, literatürle uyumlu olarak doğal zeminin likit limitinde düşük oranda, plastik limitinde ise belirgin oranda bir artışa sebebiyet verdiği tespit edilmiştir. Sadece %6 kireç katkılı karışımda (ZK) likit limit %54.3, plastik limit ise %38.5 değerine yükselmiştir. Her iki katkının ilavesiyle kıvam limitlerinin kayda değer bir oranda arttığı görülmektedir. %20 diatomit içeren kireç katkılı zemin karışımında (ZKD20) likit limitin %90.4, plastik limitin ise %68.8 gibi yüksek değerlere eriştiği gözlemlenmiştir.

Karışımlar ile yapılan standart proktor deneyi sonucunda; diatomit ve kireç katkılarının zeminin optimum su içeriğinde de artışa sebebiyet verdiği tespit edilmiştir.

Doğal zeminin %23.6 olan optimum su içeriği, %20 diatomit içeren, %6 kireç katkılı zemin karışımında (ZKD20) %44.2 gibi yüksek bir değere ulaşmıştır. Kireç ve diatomit katkıları ile artan su içeriğinden ve de diatomitin ve kirecin özgül ağırlıklarının, doğal zemine kıyasla daha düşük olmasından dolayı, hazırlanan karışımlarda diatomit ve kireç oranının artmasıyla maksimum kuru birim hacim ağırlıkta bir düşüş gözlemlenmiştir. Doğal zeminin 15.24 kN/m^3 olan maksimum kuru birim hacim ağırlığının, %20 diatomit içeren kireç katkılı zemin karışımında (ZKD20) 11.51 kN/m^3 değerine kadar düştüğü görülmektedir.

Yapılan serbest basınç deneylerinde; doğal zeminin bir günlük kür sonrası serbest basınç mukavemeti 279 kPa olarak belirlenmiştir. Doğal zeminin kireçsiz diatomit katkısı ile serbest basınç mukavemetinde kayda değer bir artış olmadığı, aksine %20 diatomit içeren kireçsiz zemin karışımında (ZD20) bu değer düşüğü gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, diatomitin kireç ile beraber kullanıldığı karışımların (ZD5, ZD10, ZD20) serbest basınç mukavemetlerinde ise önemli ölçüde artışlar meydana geldiği görülmüştür. 1 ve 7 günlük kür süresi sonrasında en yüksek serbest basınç mukavemeti değerine %20 diatomit içeren kireçli zemin karışımı (ZKD20) erişmiştir (2220 kPa). Fakat devam eden 3 haftalık kür süresi sonunda, mukavemet değerinde kayda değer bir artış gözlemlenmemiştir (2251 kPa). 28 günlük kür süresi sonunda en yüksek mukavemet değerine ise %5 diatomit içeren kireç katkılı zemin karışımı (ZKD5) ulaşmıştır (2810 kPa).

Donma-çözülme çevrimi sonrası doğal zeminin serbest basınç mukavemetinde %40'lık bir düşüş gözlemlenirken, diatomit içeren kireçsiz karışımlarda (ZD5, ZD10, ZD20) bu düşüşün %17 ile %29 arasında olduğu tespit edilmiştir. Diatomit içeren kireç katkılı zemin karışımlarında (ZKD5, ZKD10, ZKD20) ise %6 ile %20 arasında bir mukavemet kaybı olduğu belirlenmiştir. Fakat kireç içeren karışımında (ZK) mukavemet artışı bir miktar daha devam etmiştir (1377 kPa değerinden 1560 kPa değerine çıkmıştır). Yine de bu değer, diatomit içeren kireçli zemin karışımlarının (ZKD5, ZKD10, ZKD20) donma-çözülme çevrimi sonrasındaki mukavemet değerlerine (sırasıyla 2648 kPa, 1927 kPa, 1960 kPa) erişememiştir. Bu durum, diatomit ve kireç katkılı zemin karışımlarında puzolanik reaksiyonların hızlı tamamlanıp durma noktasına gelmesi ve sadece kireç katkılı zemin karışımında bu reaksiyonların devam etmesiyle ilişkilendirilmektedir.

Hazırlanan karışımların 28 günlük kür süresi sonrasına ait SEM görüntüleri incelendiğinde, kireçli zemin karışımlarında meydana gelen çimentolaşma ürünleri gözlemlenebilmiştir. Diatomit içeren kireçli karışımlarda (ZKD5, ZKD10, ZKD20) CSH

Çimentolaşma ürünü ağırlıklı olarak gözlemlenirken, ZK zemin karışımda ise, yeterli silika kaynağı olmadığından, CSH ürününün yanı sıra CH ve CASH ürünlerine de rastlanmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalarda, diatomit katkısının, kireçle birlikte kullanıldığı durumlarda çimentolaşma reaksiyonlarını hızlandırıcı bir etki gösterdiği ve kısa kr sürelerinde, zeminin serbest basınc mukavemetinde büyük oranda iyileşmeler meydana getirdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca yüksek porozitesinden dolayı diatomit katkısının, yüksek plastisiteli killi zeminlerin kıvam limitlerinde ve optimum su içeriklerinde bir artışa, maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında ise bir azalışa sebep olduğu da belirlenmiştir.



4. ÖNERİLER

Diatomit ve kireç ile yapılan staibilizasyon çalışmasında, diatomit katkısının serbest basınç mukavemetine olumlu etki yaptığı görülmüştür. %5, %10, %20 diatomit içeren kireçli zemin karışımlarından %5 diatomit içeren ZKD5 zemin karışımı, 28 günlük kür süresi sonrasında en yüksek dayanım değerine ulaşmıştır. Bu kür süresi sonunda, diatomit oranı arttıkça kireçli zemin karışımlarının serbest basınç mukavemetlerinde azalmalar gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, en ideal diatomit oranının belirlenmesi için %2 ile %10 arasında, %1 oranında artacak şekilde hazırlanan diatomit içeren kireçli karışımlar ile serbest basınç deneyinin yapılması önerilmektedir.

Ayrıca yapılan çalışmalarda, diatomit katkısının puzolanik (çimentolaşma) reaksiyonları hızlandırıcı etkisi görülmüştür. ZKD20 zemin karışımı kısa sürede dayanım kazanırken, yaklaşık 1 aylık kür süresi sonrası ise ZKD5 zemin karışımı en yüksek serbest basınç mukavemeti değerine ulaşmıştır. Artan diatomit oranında, zamana bağlı olarak, zemin karışımlarının kazandığı dayanımların artış hızı azalmıştır. Bundan dolayı; 3 ay, 1 yıl gibi uzun kür süresinin, diatomit ve kireç ile hazırlanan karışımların dayanıma olan etkisi araştırılması önerilmektedir.

Stabilizasyon çalışmasında kullanılan diatomitin yüksek poroziteye sahip olması, kıvam limitlerinde ve optimum su içeriğinde artışlara sebebiyet vermiştir. Bu artışın azaltılması için diatomitin farklı kimyasal katkılar ile birlikte kullanımının araştırılması önerilmektedir.

Bu çalışmada düşük ısı işlem gördükten sonra öğütülen doğal diatomit kullanılmıştır. Kalsine ve flaks kansine diatomitin stabilizatör olarak kullanılabilirliğinin araştırılması önerilmektedir.

Son olarak diatomit katkısının, zeminin şişme basıncı ve yüzdesine, geçirimsizliğine, konsolidasyon parametrelerine olan etkisinin de incelenmesi önerilmektedir.

5. KAYNAKÇA

- Açıklan, N., 1991. "Türkiye'de ve Dünyada Diatomit", M.T.A Genel Müdürlüğü, F.E.D., Ankara, 1-30.
- Akman, S. ve Esenli, F., 1992. "A Comparative Study of Natural Pozzolans Used Blended Cement Production", IV. Canment / ACI International Conference of Fly Ash, İstanbul, 471-477.
- Aksakal, E., L., Aydın, I. ve Oztas, T., 2013. "Effects of Diatomite on Soil Consistency Limits and Soil Compactibility", Cetane, 101, 157-163.
- Aksakal, E., L., Aydın, I. ve Sarı, S., 2021. "Effects of Freeze-Thaw Cycles on Consistency Limits of Soils Amended with Diatomite", Soil and Tillage Research, 213, 105144.
- Alataş, T., 1996. "Afşin Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Yol Stabilizasyonunda Çeşitli Maddelerle Kullanımı Üzerine Bir Araştırma", Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Aldaoood, A., Bouasker, M. ve Al-Mukhtar, M., 2014. "Geotechnical Properties of Lime-Treated Gypseous Soils", Applied Clay Science, 88-89, 39-40.
- Al-Rawas, A., A., Hago, A., W. ve Al-Sarmi, H., 2005. "Effect of Lime, Cement and Sarooj (Artificial Pozzolan) on the Swelling Potential of an Expansive Soil from Oman", Building and Environment, 40, 681-687.
- Al-Rawas, A., A., Taha, R., Nelson, J., D., Al-Shab, T., B. ve Al-Siyabi, H., 2002. "A Comparative Evaluation of Various Additives Used in the Stabilization of Expansive Soils", Geotechnical Testing Journal, 25, 2, 199-209.
- Aras, A., 2004. "The change of phase composition in ceramic bodies in kaolinite-and illiterich clay-based ceramic bodies" Applied Clay Science , 24, 257-269.
- Arman, A. ve Moonfish, G., A., 1972. "Lime Stabilization of Organic Soils", Research Record No: 381, Highway Research Record , Washington, 37-45.
- ARRB, 1969. "Symposium on the Selection and Construction of Base Materials in Roads", Bulletin, 5, Melbourne.
- ASTM C618-12, 2002. Annual Book of ASTM Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, American Society for Testing and Materials, PA.
- ASTM D2166-06, 2006. "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil", ASTM, Pennsylvania.

- ASTM D2850-03a, 2007. "Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils", ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D2974-07a, 2007. "Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils", ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D422-63, 2007. "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils", ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D4318-5, 2005. "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils", ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D5102-04, 2004. "Standard Test Methods for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures", ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D560-03, 2003. "Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures", ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D6276-99a, 2006. "Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization", ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D698-07, 2007. "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort", ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D854-06, 2006. "Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer", ASTM, Pennsylvania.
- Atanur, A., 1973. "Kireç Stabilizasyonu ve Yol Yapımındaki Tatbikatı", Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara, 11-17.
- Baradan, B., 2000. "Yapı Malzemesi II", Mühendislik Fakültesi Yayınları No. 207, Dokuz Eylül Üniversitesi Matbaası, İzmir, 1-7.
- Bell, F., G., 1996. "Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils", Engineering Geology, 42, 223-237.
- Bozkurt, R., 1997. "Endüstriyel Hammaddeler", Anadolu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Yayınları, 97, Eskişehir, 74-81.
- Calik, U. ve Sadoglu, E., 2014. "Classification, Shear Strength, and Durability of Expansive Clayey Soil Stabilized with Lime and Perlite, Natural Hazards", 71,3, 1289-1303.
- Calik, U. ve Sadoglu, E., 2014. "Engineering Properties of Expansive Clayey Soil Stabilized with Lime and Perlite", Geomechanics and Engineering, 6, 4, 403-418.

- Chaisena, A. ve Rangriwatananon, K., 2004. "Effects of Thermal and Acid Treatments on Some Physico-Chemical Properties of Lampang Diatomite" School of Chemistry, Institute of Science, Suranaree University of Technology, 289-299.
- Chenga, Y., Wang, S., Li, J., Huang, X., Li, C. ve Wua, J., 2018. "Engineering and Mineralogical Properties of Stabilized Expansive Soil Compositing Lime and Natural Pozzolans" Construction and Building Materials, 187, 30, 1031-1038.
- Chu, S., C. ve Kao, H., S., 1993. "A Study of Engineering Porperties of a Clay Modified by Fly Ash and Slag", ASCE Fly Ash for Soil Improvement-Geotechnical Special Publication, New York.
- Çalık, Ü., 2012. "Perlitin Puzolanik Katkı Olarak Kireç ile Birlikte Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı", Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Çelik, M.S., Ersoy, B., 2004. "Electrokinetics of Mineral Particles", Encyclopedia of Nanoscience and Nonotechnology, 1991-2005.
- Çetin, M. ve Taş, B., 2012. "Biyolojik Orjinli Tekdoğal Mineral: Diatomit" Ordu Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Ordu.
- Dawson, A., R., Elliot, R., C., Rowe, R., C. ve Williams G., M., 1995. "Assesment of Suitability of Some Industrial By-Products for Use in Pavement Bases in the UK", TRB Record No. 1486, Transportation Research Board, Washington, 114-123.
- Demiröz, A. ve Karaduman, M., 2009. "Zemin İyileştirme Metotları", Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergi, 8, 3, 176-192.
- Eades, J., L. ve Grim, R., E., 1960. "The Reaction of Hydrated Lime with Pure Clay Minerals in Soil Stabilization", Bulletin No. 262, Highway Research Board,, 51-63.
- Elfert, R. J., 1973. "Bureau of Reclamation Experiences With Fly Ash and Other Pozzolans in Concrete", 3th International Ash Utilization Symposium, Information Circular No. 1c8640, US Bureau of Mines, 80, Washington.
- Erdoğan, T., Y., 2003. "Beton", Middle East Technical University Press, Ankara, 169-207.
- Evans, G., L. ve Bell, D., H., 1981. "Chemical Stabilization Odloes, New Zealand, 10th ICSMFE", 3, Stockholm, 649-658.
- Ferguson, G., 1993. "Use of Self-Cementing Fly Ash as a Soil Stabilizing Agent", ASCE, New York.
- Gabriel, M., Malecha, A., Kartal, G. ve Özer, H., 1979. "Diatomite deposits near Belisırma and Ihlara Turkey", Geocome-I First Geological Congress of the Middle East, 621-636.

- Gullu, H. ve Hazirbaba, K., 2010. "Unconfined compressive strength and Post-Freeze-Thaw Behavior of Fine-Grained Soils Treated with Geofiber and Synthetic Fluid", Cold Regions Science and Technology, 62, 142-150.
- Gündeşli, U., 2008. "Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması", Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Güney, Y., Sari, D., Cetin, M. ve Tuncan, M., 2007. "Impact of Cyclic Wetting-Drying on Swelling Behavior of Lime-Stabilized Soil", Building and Environment, 42, 681-688.
- Hanchanloet, S., 1999. "Evaluation of a New Chemical Stabilization Method on Physical and Strength Properties of Cohesive Soils", Master Thesis, The University of Texas, USA.
- Harichane, K., Ghrici, M., Khebizi, W. ve Missoum, H., 2010. "Effect of Combination of Lime and Natural Pozzolana on the Durability of Clayey Soils", The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 15, 1194-1210.
- Holtz, R. ve Kovacs, W., 2010. "Geoteknik Mühendisliğine Giriş", Çev. Kayabalı, K. Gazi Kitabevi, Ankara.
- Hunt, R., E., 1994. "Geotechnical Engineering Investigation Manual", McGraw Hill, New York.
- İpek, T., 1998. "Stabilization of Expansive Soils Using Lime, Cement and Fly Ash", Yüksek Lisans Tezi, Middle East Technical University, Natural and Applied Sciences Ankara.
- Jewell, R., J., 1968. "An Evaluation of Criteria for Selection of Pavement Base Course Materials in Western Australia", Master Thesis, University of Western Australia, Australia.
- Kayabalı, K., 2010. "Geoteknik Mühendisliğine Giriş", Gazi Kitabevi, Ankara.
- Keskin, S., N., Sungur, A., Akan, R. ve Uzundurukan, S., 2017. "İnce Daneli Zeminlerde Katki Maddelerinin ve Donma-Çözülme Çevriminin Serbest Basınç Dayanımına Etkisi" Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 5, 3, 473-478.
- Khodaparast, M., Rajabi, M., A. ve Mohammadi, M., 2021. "Mechanical Properties of Silty Clay Soil Treated with a Mixture of Lime and Zinc Oxide Nanoparticles" Construction and Building Materials, 281, 122548.
- Kota, P., B., V., Hazlett, D. ve Perrin, L., 1996. "Sulfate-Bearing Soils: Problems with Calcium Based Stabilizers", Record No. 1546, Transportation Research Board, Washington.
- Kreps, R., D. ve Walker, R., D., 1971. "Highway Materials", McGraw Hill, USA.

- Lambe, P., C., Khosla, N., P. ve Jayaratne, N., N., 1990. "Soil Stabilization in Pavement Structures", , Transportation Studies Research, Report No. 232411-88-1, North Carolina, USA.
- Lambe, T. W., 1960. "The Character and Identification of Expansive Soils", Federal Housing Administration, USA.
- Lees, G., Abdelkader, M., P. ve Hamdani, S., K., 1982. "Effect of the Clay Fraction on Some Mechanical Properties of Lime-Soil Mixtures", Journal of Highway Engineering, 29, 11, 2-9.
- Li, M., Chai, S.X., Zhang, H.Y., Du, H.P. ve Wei, L., 2012. "Feasibility of Saline Soil Reinforced with Treated Wheat Straw and Lime", Soils and Foundations, 52, 2, 228-238.
- Liu, J., Wang, T. ve Tian, Y., 2010. "Experimental Study of the Dynamic Properties of Cement- and Lime-Modified Clay Soils Subjected to Freeze-Thaw Cycles", Cold Regions Science and Technology, 61, 29-33.
- Manasseh, J. ve Olufemi, A., I., 2008. "Effect of Lime on Some Geotechnical Properties of Igumale Shale", Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 13, 1-12.
- Mathew, P., K. ve Rao, S., N., 1997. "Effect of Lime Cation Exchange Capacity of Marine Clay", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123, 2, 183-185.
- Mazlum, F., 1989. "Pirinç Kabuğu Külünün Puzolanik Özellikleri ve Külün Çimento Harcının Dayanıklılığına Etkisi", Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- McCallister, L., D. ve Petry, T., M., 1990. "Property Changes in Lime Treated Expansive Clays under Continious Leaching", Report No. DACA 39-88-M-0550, US Army Corps of Engineers, Washington.
- Metelkova, Z., Bohac, J., Prikryl, R. ve Sedlarova, I., 2012. "Maturation of Loess Treated with Variable Lime Admixture: Pore Space Textural Evolution and Related Phase Changes" Applied Clay Science, 61, 37-43.
- Miller, G. ve Azad, S., 2000. "Influence of Soil Type on Stabilization with Cement Kiln Dust", Journal of Construction Build Materials, 14, 2, 89-97.
- Mishra, J., Yadav R., K. ve Singhai, A., K., 2014. "Effect of Granite Dust on Index Properties of Lime Stabilized Black Cotton Soil", International Journal of Engineering Research and Science&Technology, 3, 1, 19-23.
- Mitchell, J., K. ve Gallagher, P., M., 1998. "Guidelines for Ground Improvement of Civil Works and Military Structures and Facilities", Publication No. ETL 1110-1-185, U.S. Army of Corps. Of Engineers, Washington, 109.
- Mitchell, J., K., 1993. Fundamentals of Soil Behavior, Wiley, New York.

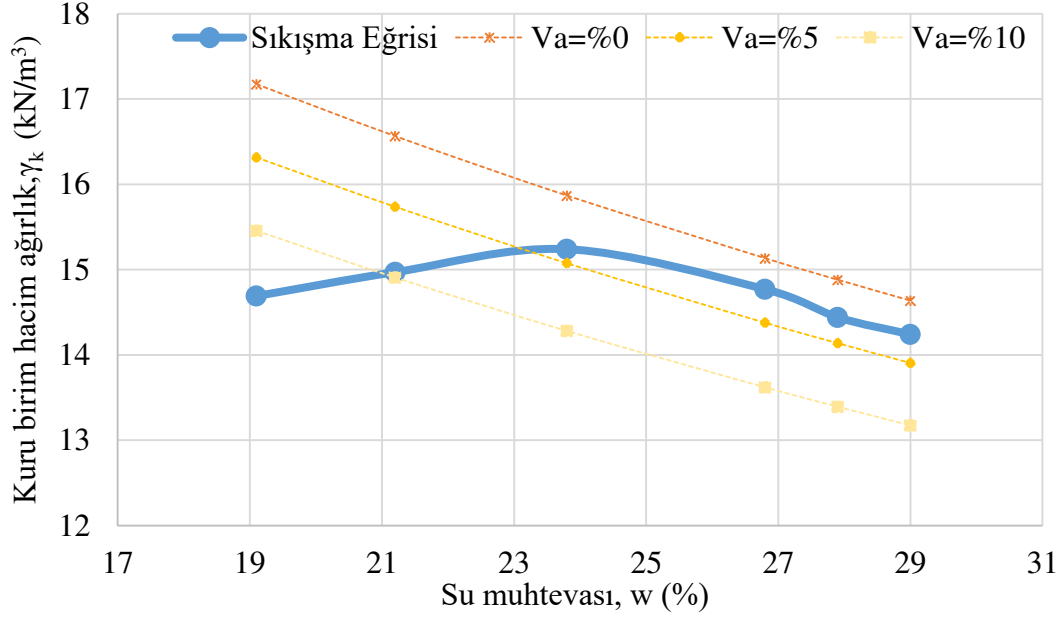
- Mollah, M.Y.A., Promreuk, S., Schennach, R., Cocke, D.L., and Guler, R. (1997). "Cristobalite Formation From Thermal Treatment of Texas Linite Fly Ash" *Fuel*, 78, 1277-1282.
- Nelson, J., D. ve Debora, J., M., 1992. "Expansive Soils-Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering", John Willey&Sons Inc., London, 259-261.
- Nematzadeh, M., Panam Zarfam, P. ve Nikoo, M., 2017. "Investigating Laboratory Parameters of The Resistance of Different Mixtures of Soil-Lime-Fume Using The Curing and Administrative Method" Case Studies in Construction Materials, 7, 263-279.
- Ola, S., A., 1978. "The Geology and Geotechnical Properties of the Black Cotton Soils of North-Eastern Nigeria", A.A. Balkema, Rotterdam, 131-144.
- Olgun, M., 2013. "The Effects and Optimization of Additives for Expansive Clays Under Freeze-Thaw Conditions", Cold Regions Science and Technology, 93, 36-46.
- Önalp, A., 2007. "Geoteknik Bilgisi 1 Çözümlü Örneklerle Zeminler ve Mekanığı", Birsen Yayınevi.
- Önem, Y., 2000. "Sanayi Hammaddeleri", Kozan Ofset, Ankara.
- Özbey, G. ve Atamer, N., 1987. "Kizelgur (Diatomit) Hakkında Bazı Bilgiler", 10. Türkiye Madencilik Bilimsel Teknik Kongresi, Ankara, 493-502.
- Puppala, A., J. ve Hanchanloet, S., 1999. "Evaluation of a New Chemical Treatment Method on Strength and Resilient Properties of a Cohesive Soil", Record No. 990389, Transportation Research Board, Washington.
- Quigley, R., M., 1975. "Compaction-Strength-Stabilization Properties of Weathered Surface Clays of Southwestern Ontario", OJT CRP Project L-3, Ministry of Natural Resources, USA, 96-98.
- Rahman, M., A., 1986. "The Potentials of Some Stabilizers for Use of Laterite Soil in Construction", Journal of Building and Environment, 21, 1, 57-61.
- Rajasekaran, G., 2005. "Sulphate Attack and Ettringite Formation in The Lime and Cement Stabilized Marine Clays", Ocean Engineering, 32, 1133-1159.
- Ramachandran, V., S., 1995. "Concrete Admixtures Handbook", Noyes Publication, New Jersey.
- Rodriquez, A., R., Castillo, H. ve Sowers, G., F., 1973. "Soil Mechanics in Highway Engineering", Trans Tech Publications, Germany.
- Runigo, B. L., Ferber, V., Cui, Y. J., Cuisinier, O. ve Deneele, D., 2011. "Performance of Lime-Treated Silty Soil Under Long-Term Hydraulic Conditions", Engineering Geology, 118, 20-28.

- Sezer, A., Inan, G., Yılmaz, H., R. ve Ramyar, K., 2006. Utilization of a Very High Lime Fly Ash for Improvement of Izmir Clay, Building and Environment, 41, 1, 150-155.
- Sherwood P. T., 1993. “The effect of Sulphates on Cement and Lime Stabilised Soils”, Roads and Road Construction, 34-40.
- Sumner, M. ve Naidu, R., 1998. “Sodic Soils-Distribution, Properties, Management and Environmental Consequences”, Oxford Univ. Press, New York, 3-17.
- Swaidani, A., Hammoud, I. ve Meziab, A., 2016. “Effect of Adding Natural Pozzolana on Geotechnical Properties of Lime-Stabilized Clayey Soil”, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 8,5, 714-725.
- Tiwari, N., Satyam, N. ve Anand J.Puppala, A., J., 2021. “Strength and Durability Assessment of Expansive Soil Stabilized with Recycled Ash and Natural Fibers” Transportation Geotechnics, 29, 100555.
- TRB, 1987. “State of the Art Report”, Transportation Research Board, 5, Washington D.C.
- Tsonis, P., Christoulas, S. ve Kolias, S., 1983. “Soil Improvement with Coal Ash in Road Construction”, The 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, 961-964.
- Tunç, A., 2001. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul.
- Tunç, A., 2002. Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları, Atlas Yayın Dağıtım, Ankara.
- U.S. Army Corps. of Eng., 2003. “Guidelines on Ground Improvement for Structures and Facilities”, Research No. 20314-1000, Department of the Army, Washington.
- Uddin, F., 2008. “Clays, Nanoclays, and Montmorillonite Minerals” Metallurgical and Materials Transactions, 39, 2804-2814.
- URL-1, 2021. “<http://www.cihangrup.com.tr/diatomit-madeni>”, Diatomit madeni, 12 Ocak 2021.
- URL-2, 2021. “https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/images/b_h/di_dis.jpg”, Diatomit, Disten, Profilit, Talk, Asbest Yatakları Haritası, 8 Şubat 2021.
- Uygun, A. ve Çelik, E., 1978. “Endüstriyel Hammaddeler Diatomit, Yeryuvarı ve İnsan”, Yatağının Jeokimyası ve Oluşumu, T.J.K. Bülteni, 3, 2, Ankara, 46-53.
- Uygun, A., 1976. “Diatomit, Jeolojisi ve yararlanma olanakları”, Madencilik, 15, 31-38.
- Uzuner, B., A., 2019. Temel Mühendisliğine Giriş, Derya Kitabevi, Trabzon.

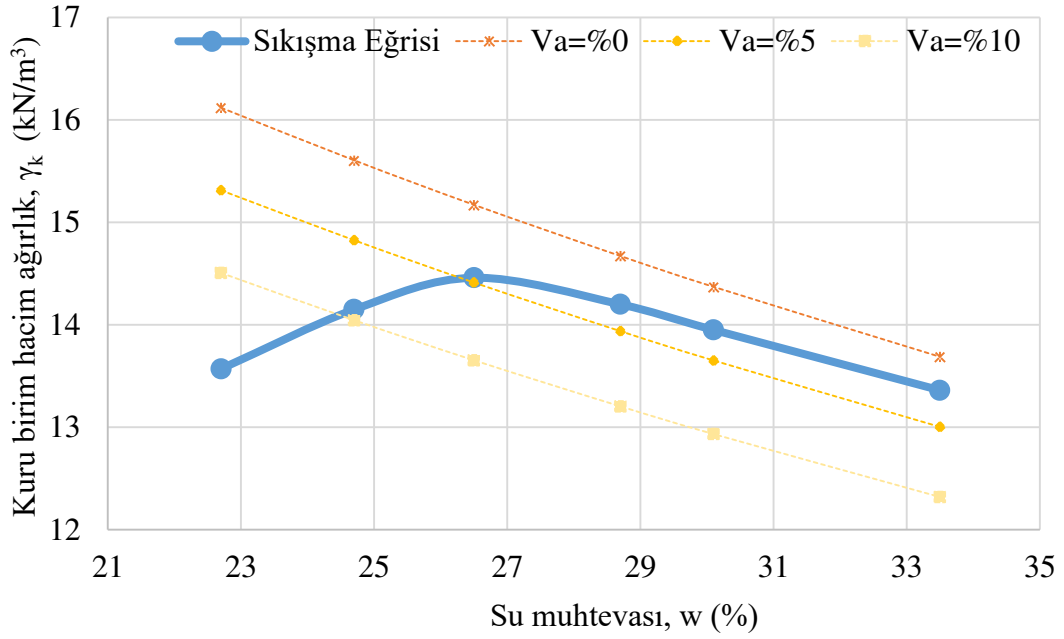
- Winterkorn, H., F. ve Fang, H., Y., 1975. Foundation Engineering Handbook, Van Nostrand Reinhold Publication, London.
- Yazıcı, V., 2004. “Stabilization of Expansive Clays Using Granulated Blast Furnace Slag (GBFS), GBFS-Lime Combinations and GBFS Cement”, Yüksek Lisans Tezi, Middle East Technical University, Natural and Applied Sciences, Ankara.
- Yeğınobalı, A., 2003. “Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı”, TÇMB/AR-GE, Ankara, 975-8136-14-3.
- Yıldırım, S., 2002. “Zeminlerin İncelenmesi ve Temel Tasarımı”, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Yılmaz, F. ve Dumav, V., 2020. “Zemin Stabilizasyonunda Midyat Taşı Atıklarının Kullanılabilirliği” El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 7, 2, 848-857.
- Yılmaz, F., 2017. “Zemin Stabilizasyonunda Puzolanik Katkı İnceliğinin Dayanıma Etkisi” Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering, 17, 1048-1054.
- Yılmaz, F., 2018. “Uçucu Kül ve Mermer Tozu Katkılarının Zeminin Stabilizasyonuna ve Donma-Çözülmesine Etkisinin Araştırılması”, Academic Platform Journal of Engineering and Science, 8,1, 56-61.

6. EKLER

EK 1. Proktor Deney Sonuçları

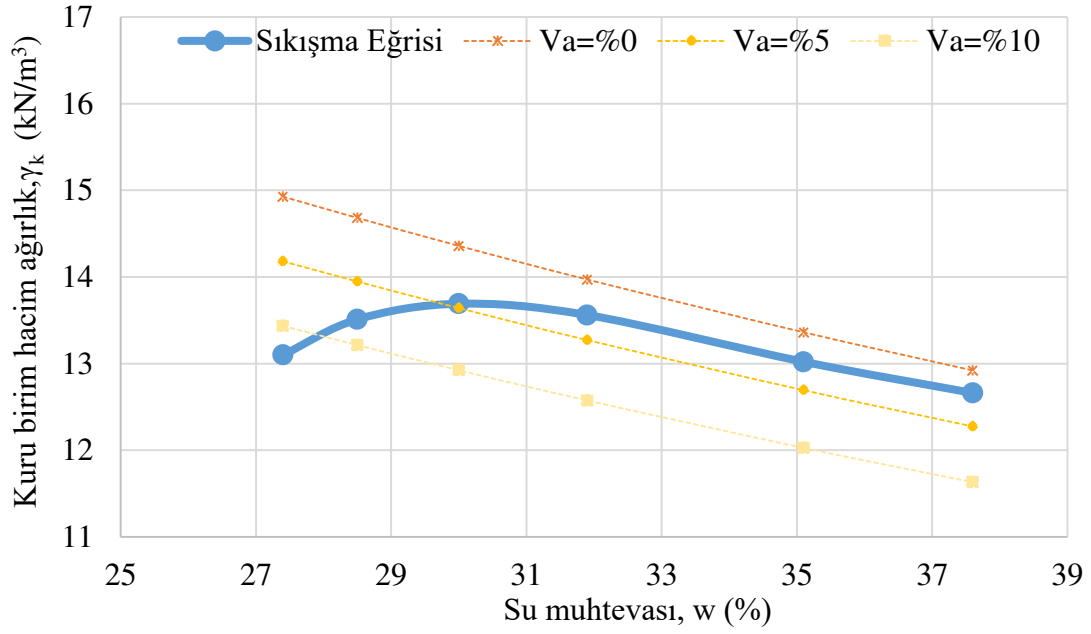


Ek Şekil 1. 1. Doğal zemine ait sıkışma çizgisi ile hava içeriği çizgileri

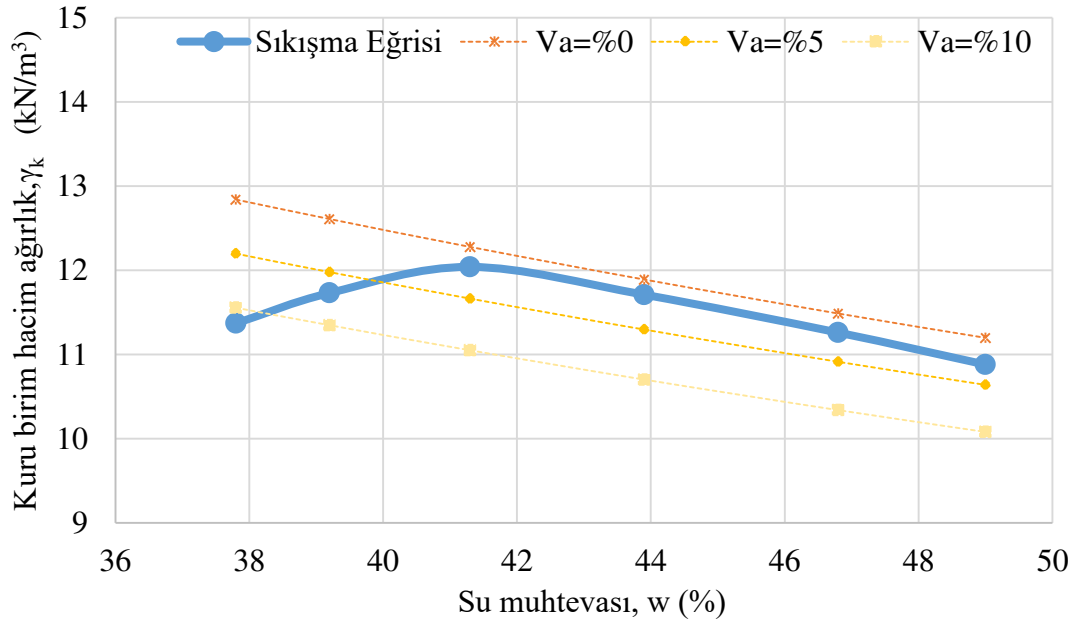


Ek Şekil 1. 2. ZD5 zemin karışımına ait sıkışma çizgisi ile hava içeriği çizgileri

Ek-1'in devamı

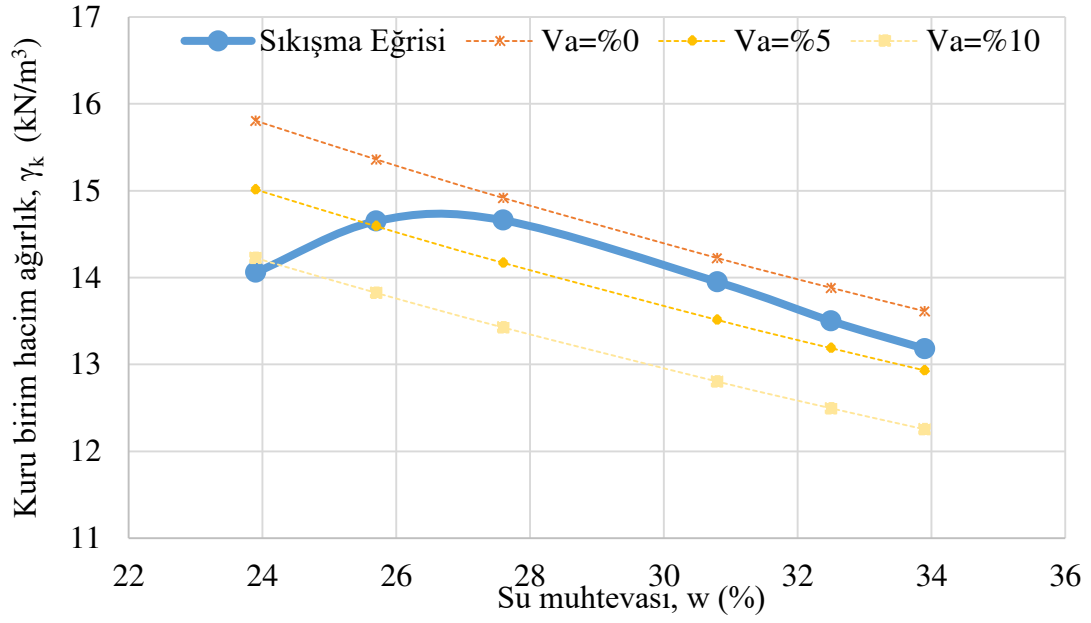


Ek Şekil 1. 3. ZD10 zemin karışımına ait sıkışma çizgisi ile hava içeriği çizgileri

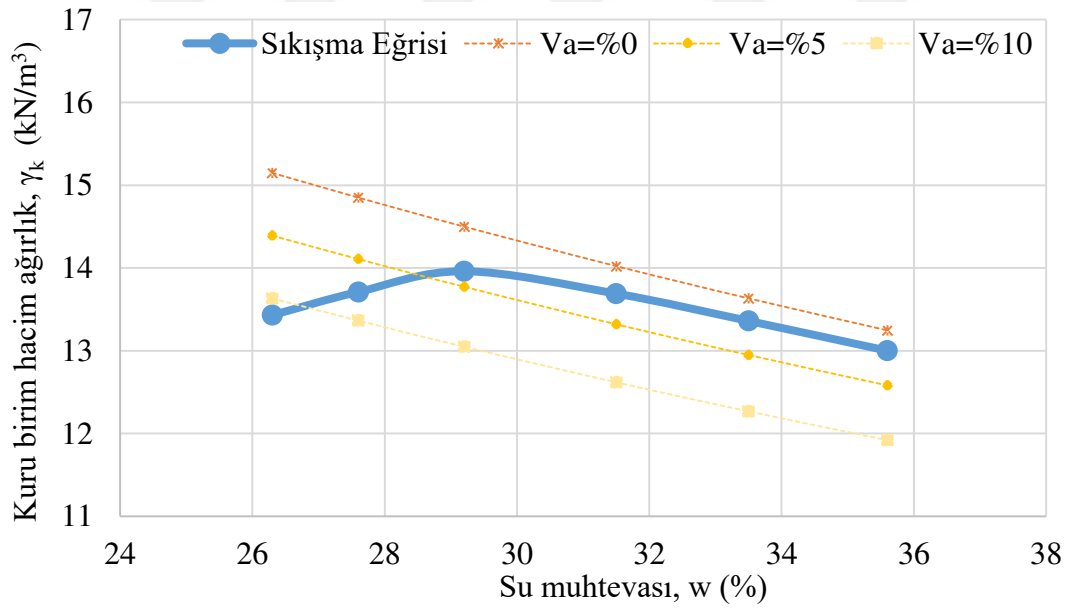


Ek Şekil 1. 4. ZD20 zemin karışımına ait sıkışma çizgisi ile hava içeriği çizgileri

Ek-1'in devamı

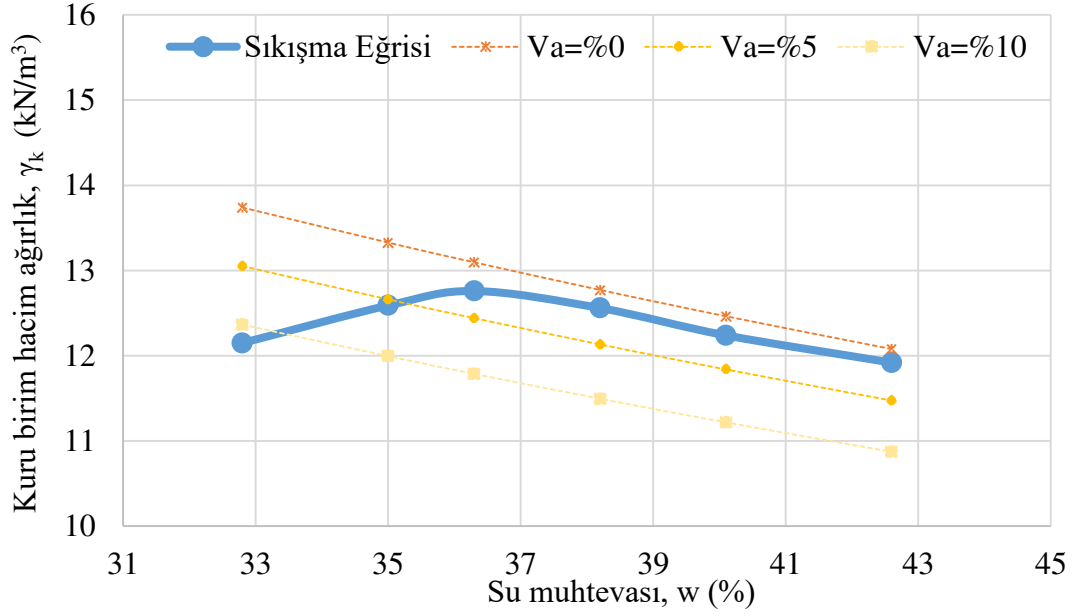


Ek Şekil 1. 5. ZK zemin karışımına ait sıkışma çizgisi ile hava içeriği çizgileri

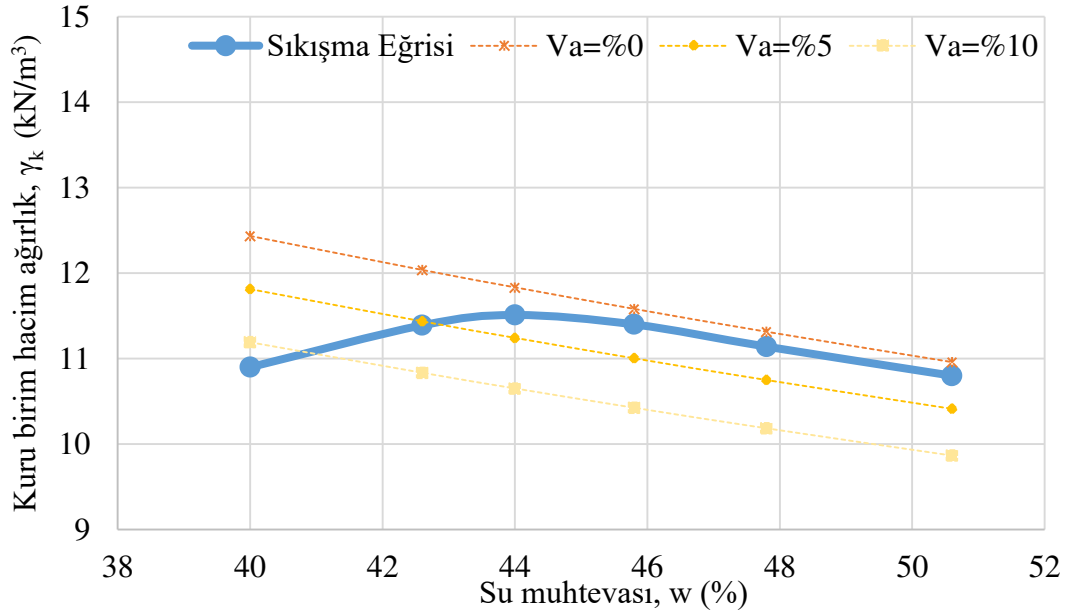


Ek Şekil 1. 6. ZKD5 zemin karışımına ait sıkışma çizgisi ile hava içeriği çizgileri

Ek-1'in devamı

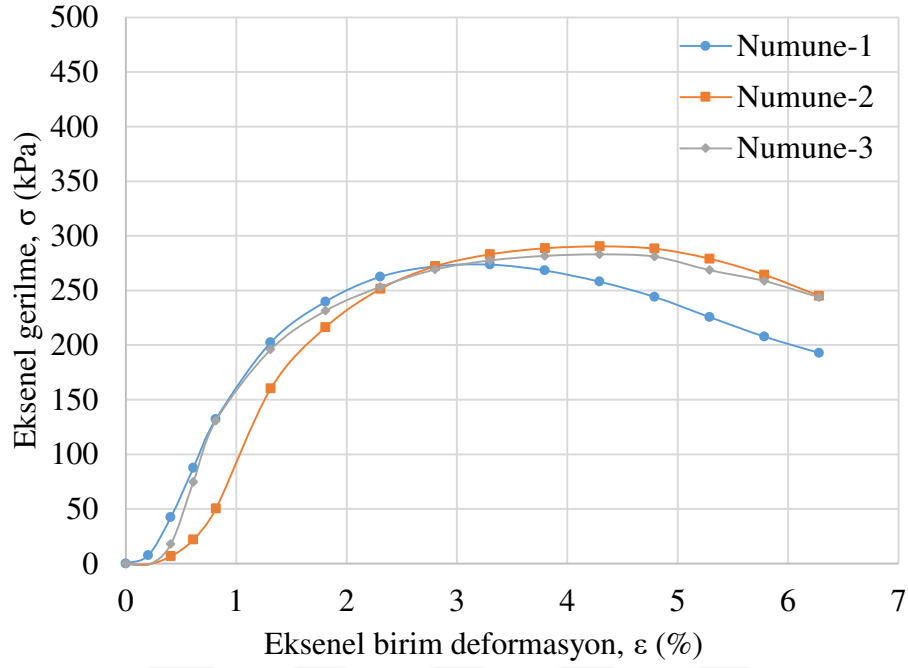


Ek Şekil 1. 7. ZKD10 zemin karışımına ait sıkışma çizgisi ile hava içeriği çizgileri

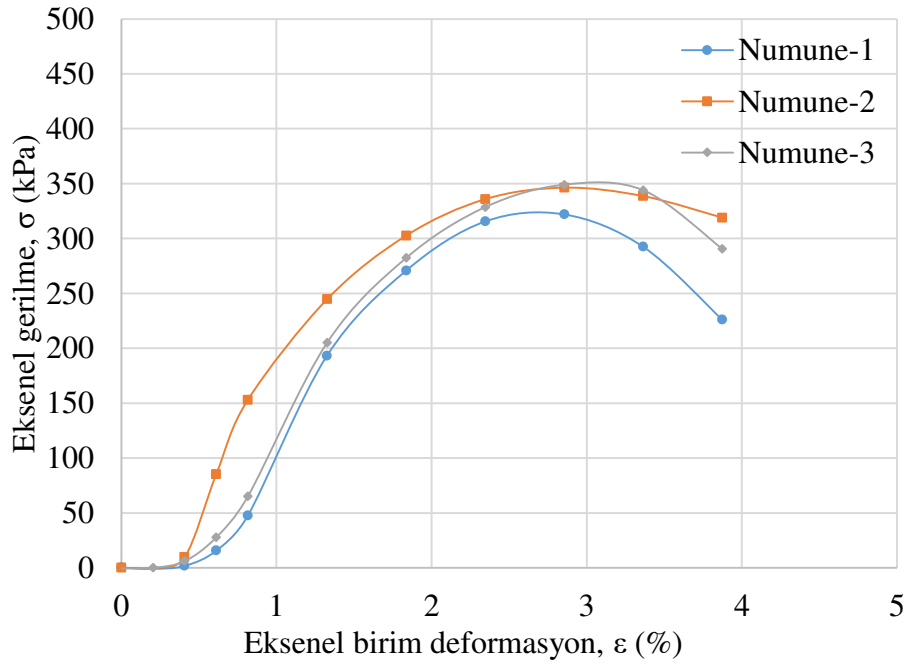


Ek Şekil 1. 8. ZKD20 zemin karışımına ait sıkışma çizgisi ile hava içeriği çizgileri

EK 2. Serbest Basınç Deney Sonuçları

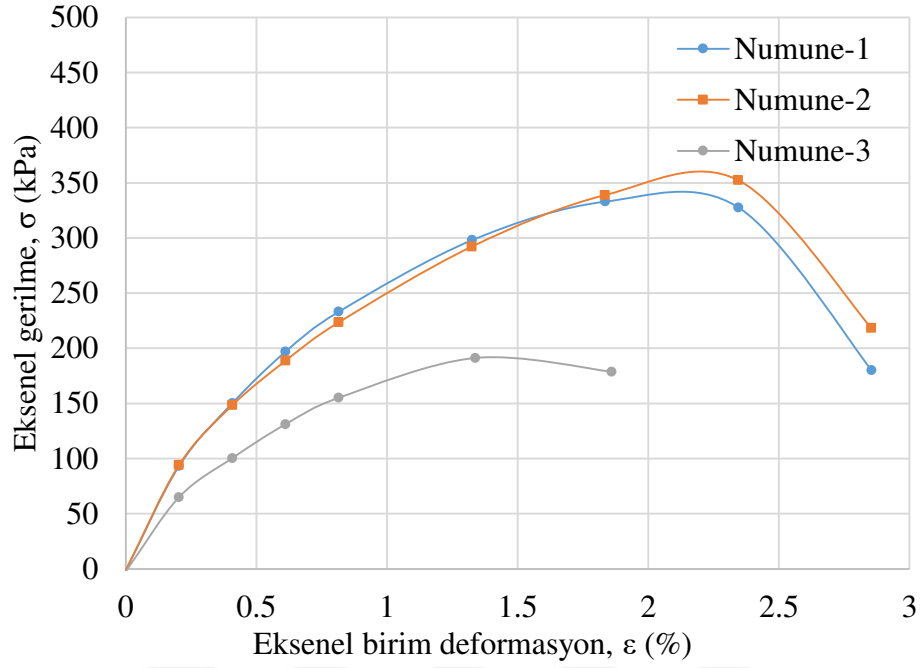


Ek Şekil 2. 1. Doğal zemine ait numunelerin 1 günlük kür sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği

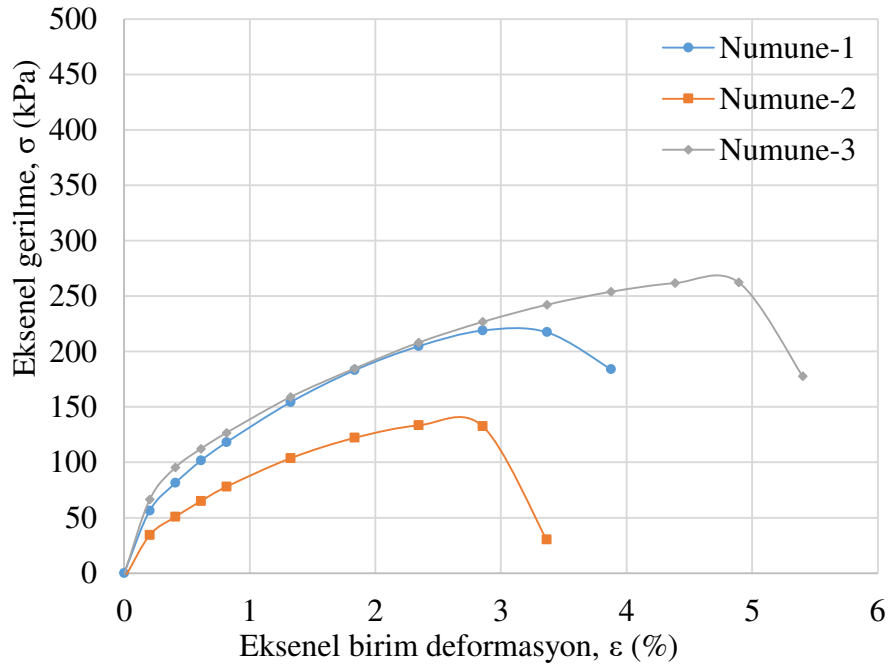


Ek Şekil 2. 2. ZD5 zemin karışımına ait numunelerin 1 günlük kür sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği

Ek-2'in devamı

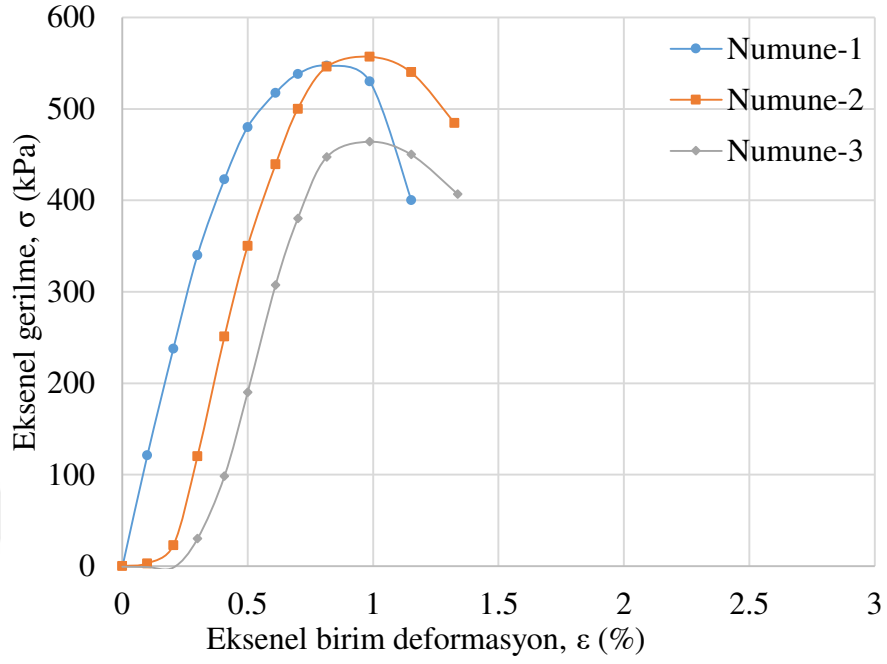


Ek Şekil 2. 3. ZD10 zemin karışımına ait numunelerin 1 günlük kür sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği

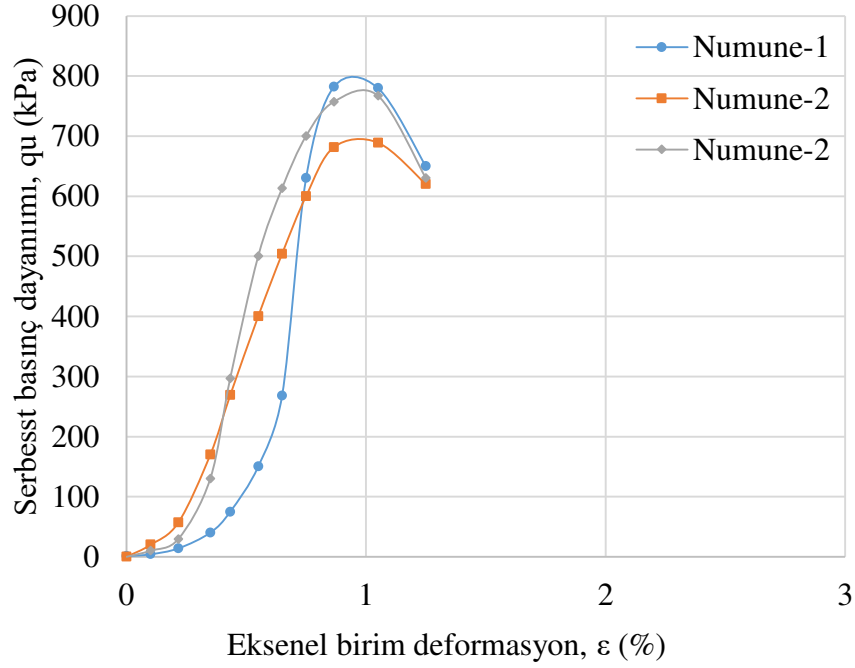


Ek Şekil 2. 4. ZD20 zemin karışımına ait numunelerin 1 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği

Ek-2'in devamı

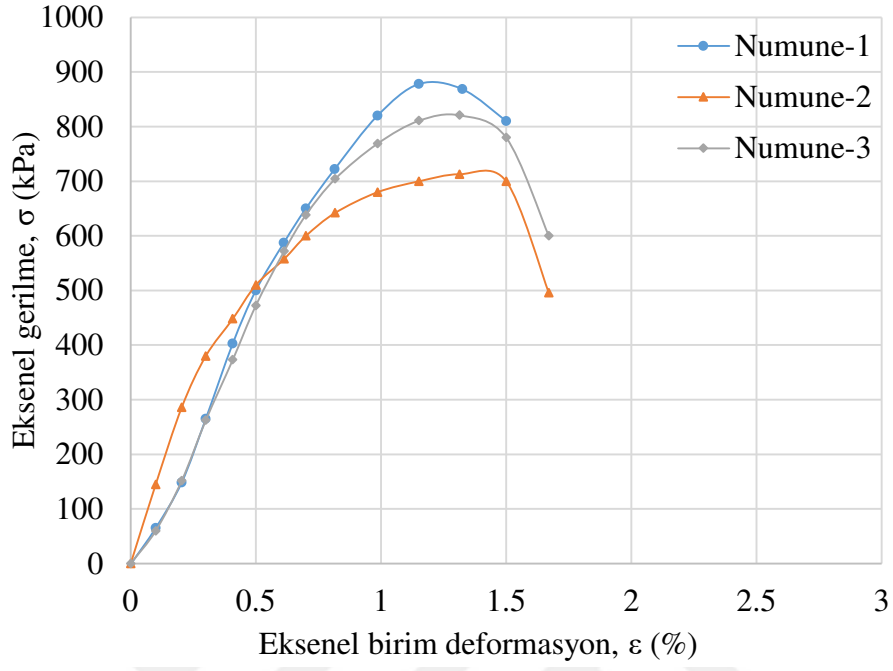


Ek Şekil 2. 5. ZK zemin karışımına ait numunelerin 1 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği

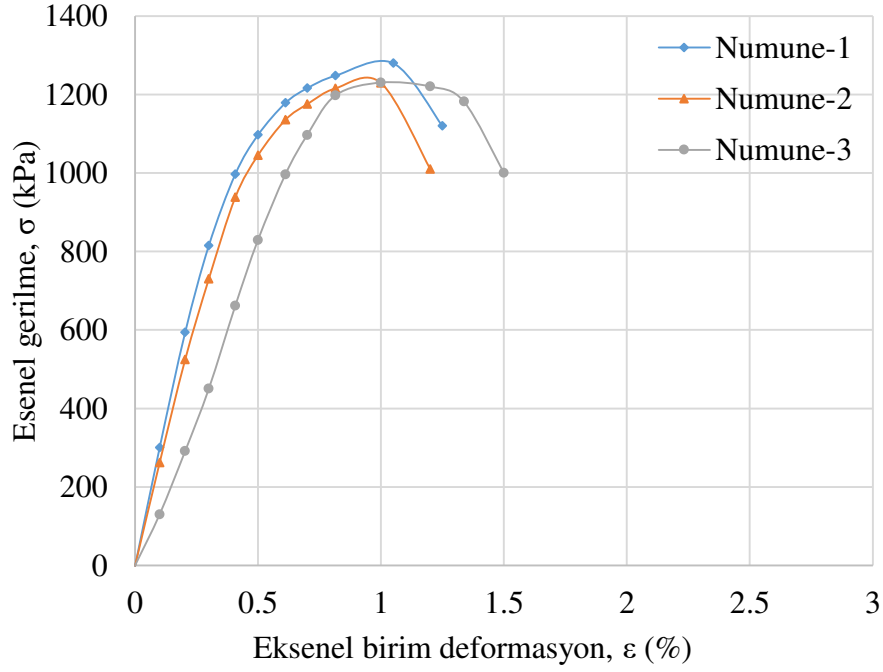


Ek Şekil 2. 6. ZKD5 zemin karışımına ait numunelerin 1 günlük kür sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği

Ek-2'in devamı

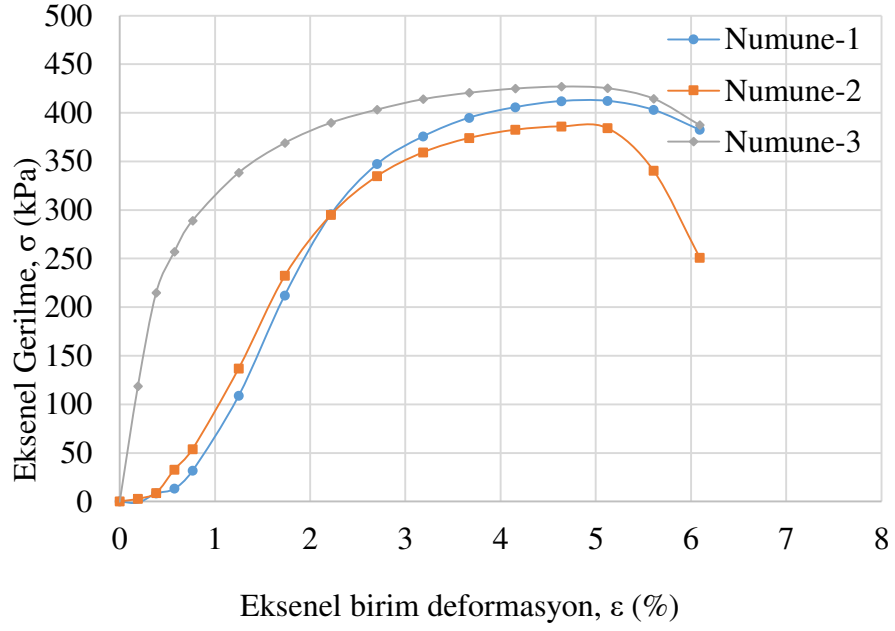


Ek Şekil 2. 7. ZKD10 zemin karışımına ait numunelerin 1 günlük kür sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği

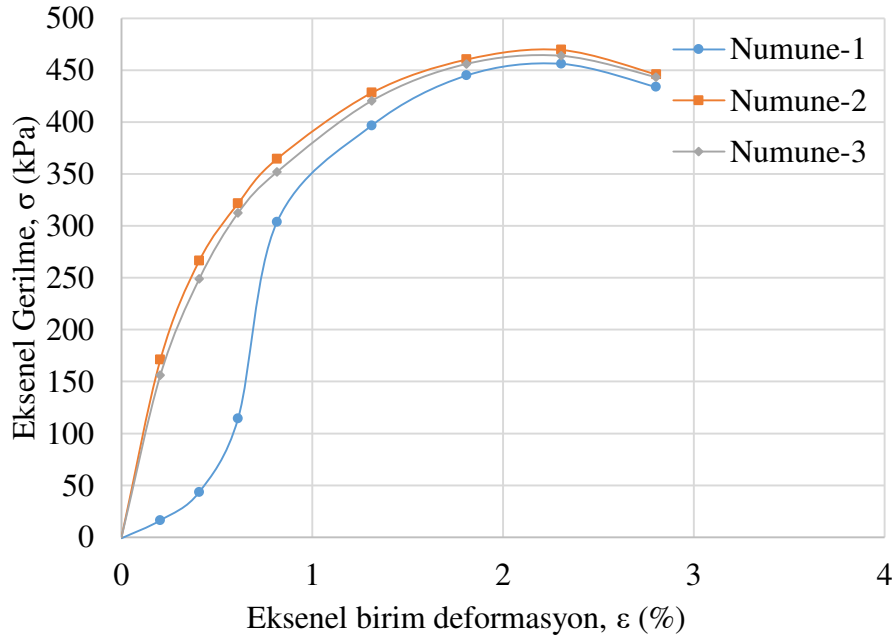


Ek Şekil 2. 8 . ZKD20 zemin karışımına ait numunelerin 1 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği

Ek-2'in devamı

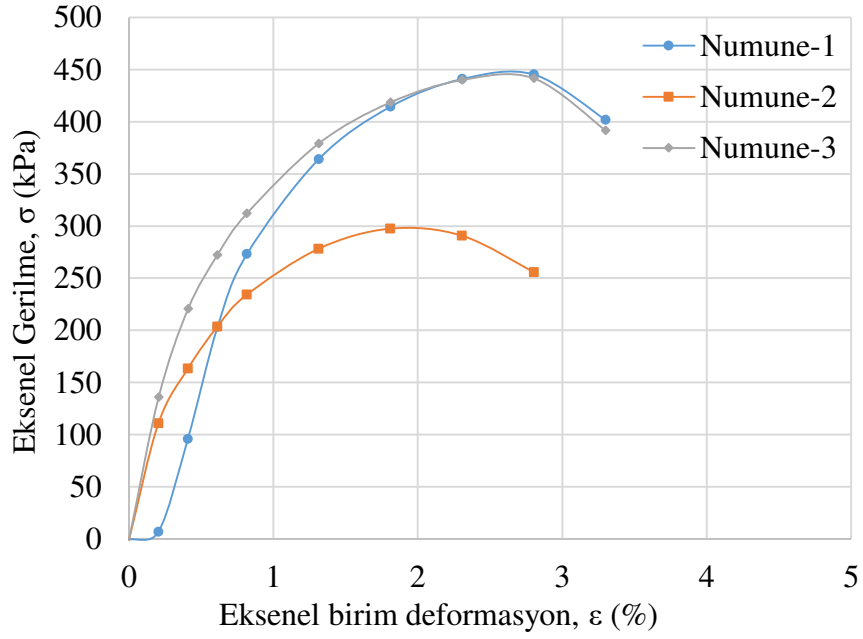


Ek Şekil 2. 9. Doğal zemine ait numunelerin 7 günlük kür sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği

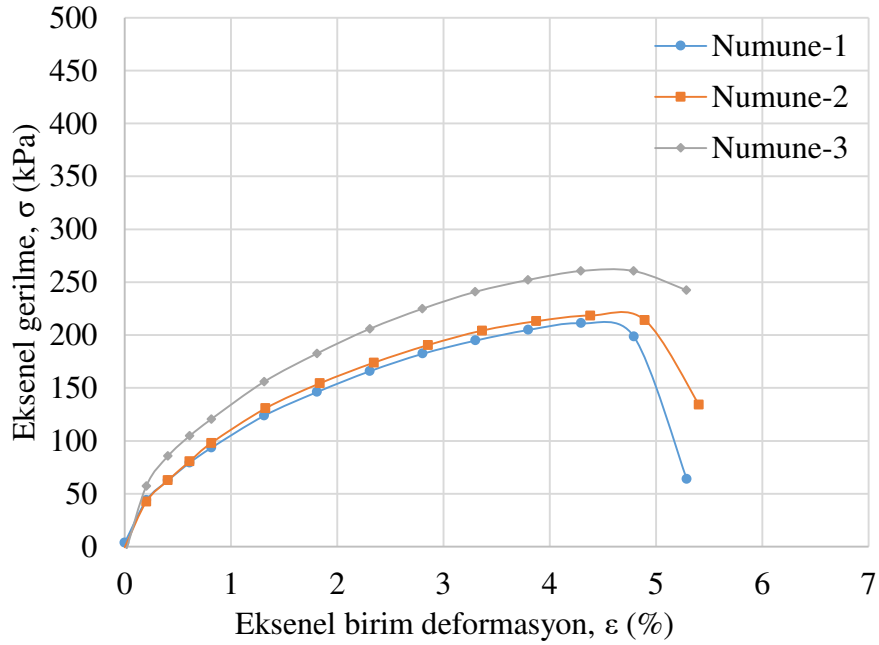


Ek Şekil 2. 10. ZD5 zemin karışımına ait numunelerin 7 günlük kür sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği

Ek-2'in devamı

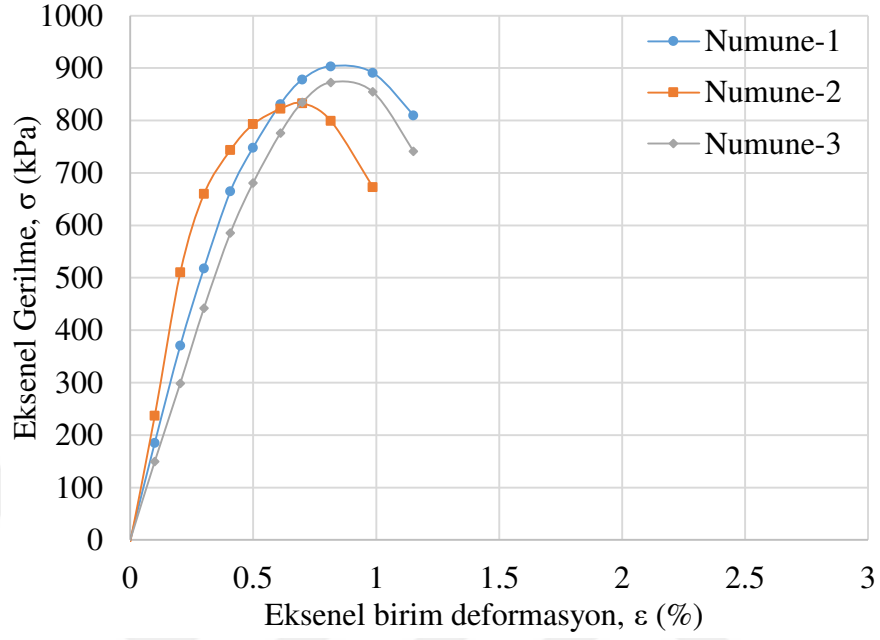


Ek Şekil 2. 11. ZD10 zemin karışımına ait numunelerin 7 günlük kür sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği

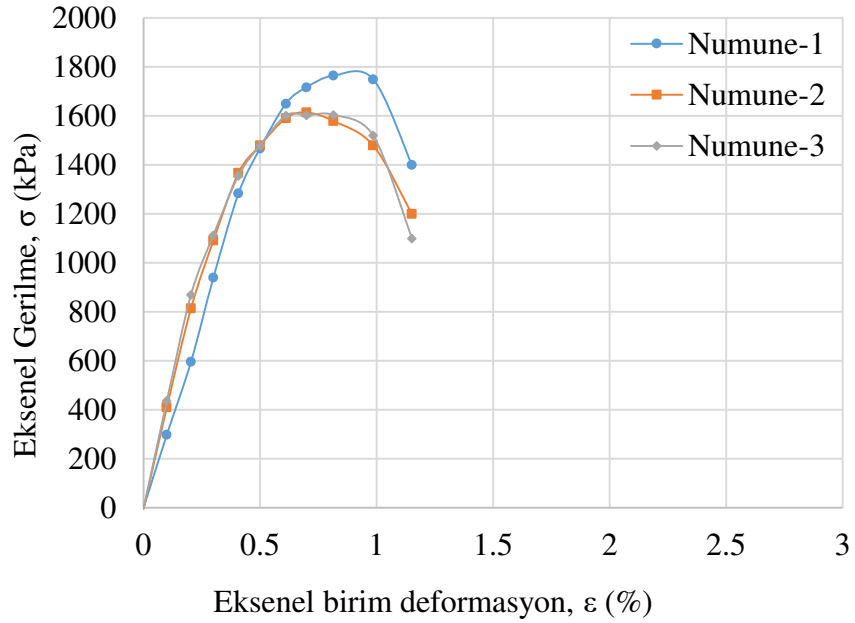


Ek Şekil 2. 12. ZD20 zemin karışımına ait numunelerin 7 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği

Ek-2'in devamı

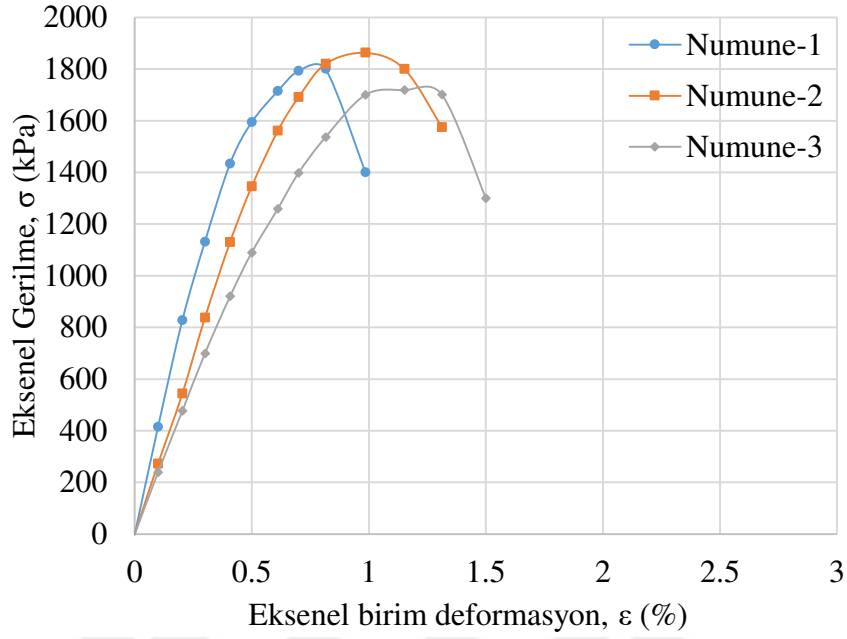


Ek Şekil 2. 13. ZK zemin karışımına ait numunelerin 7 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği

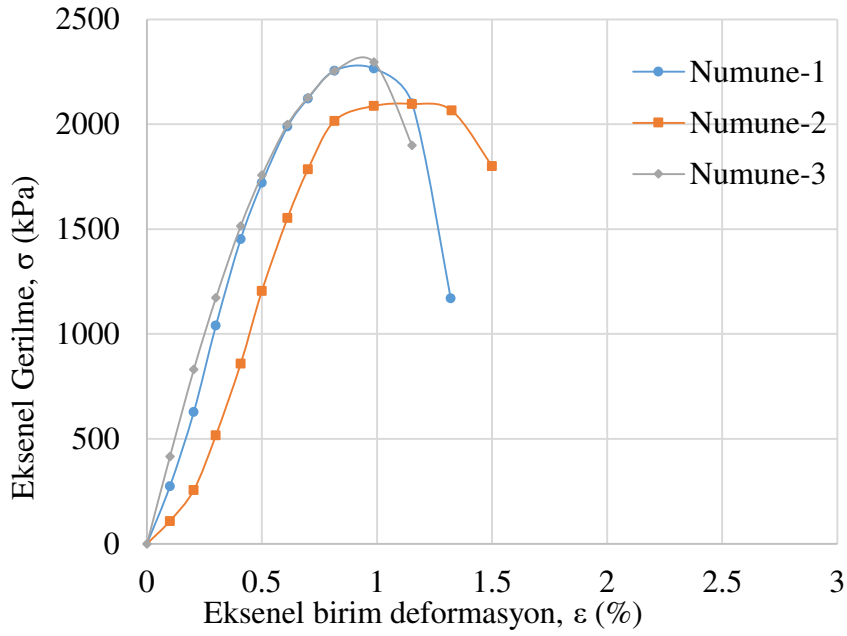


Ek Şekil 2. 14. ZKD5 zemin karışımına ait numunelerin 7 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği

Ek-2'in devamı

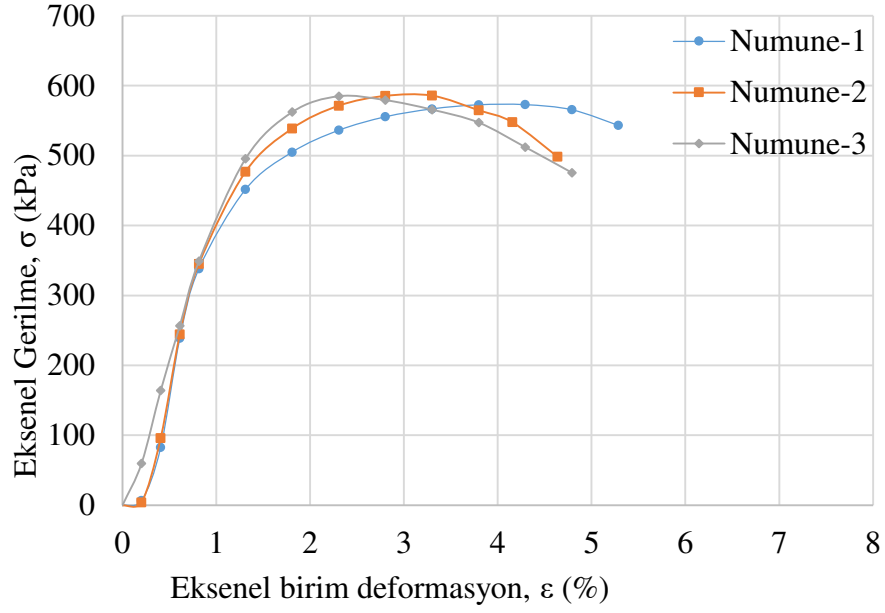


Ek Şekil 2. 15. ZKD10 zemin karışımına ait numunelerin 7 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği

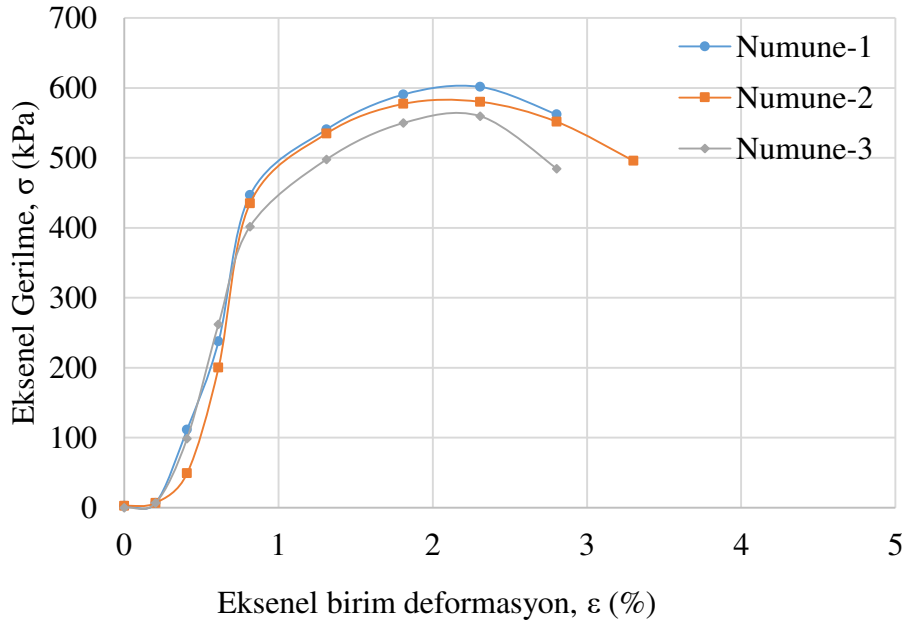


Ek Şekil 2. 16. ZKD20 zemin karışımına ait numunelerin 7 günlük kür sonr eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği

Ek-2'in devamı

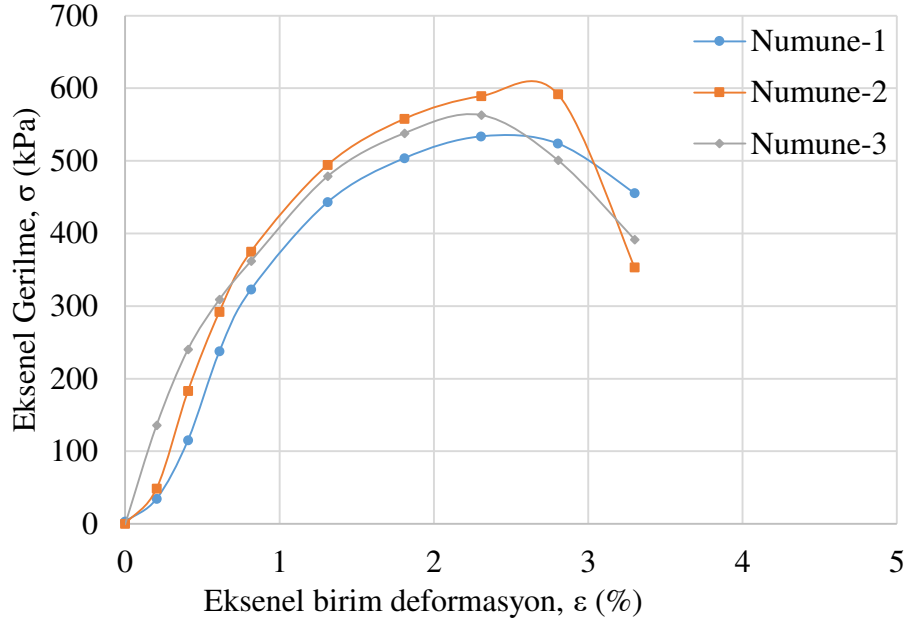


Ek Şekil 2. 17. Doğal zemine ait numunelerin 28 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği

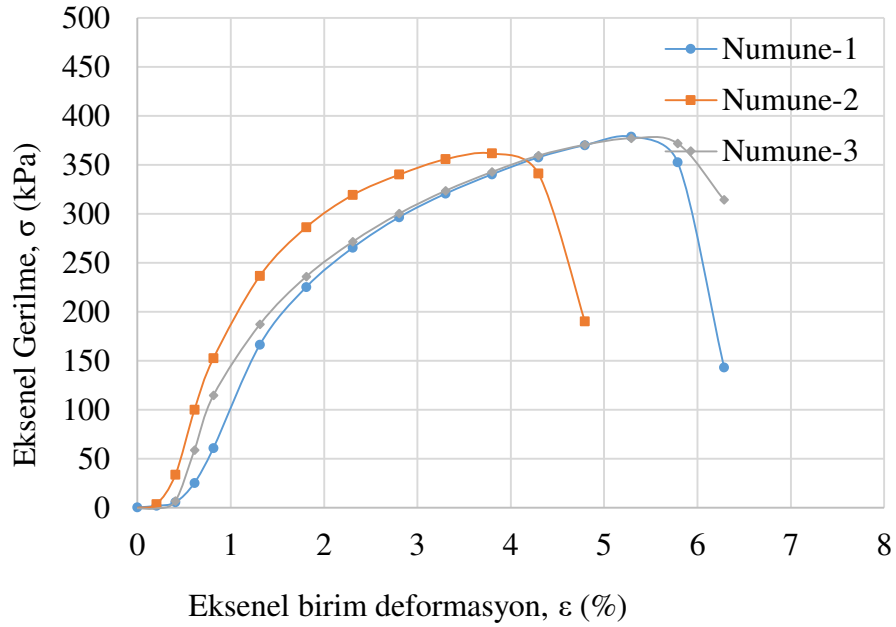


Ek Şekil 2. 18. ZD5 zemin karışımına ait numunelerin 28 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği

Ek-2'in devamı

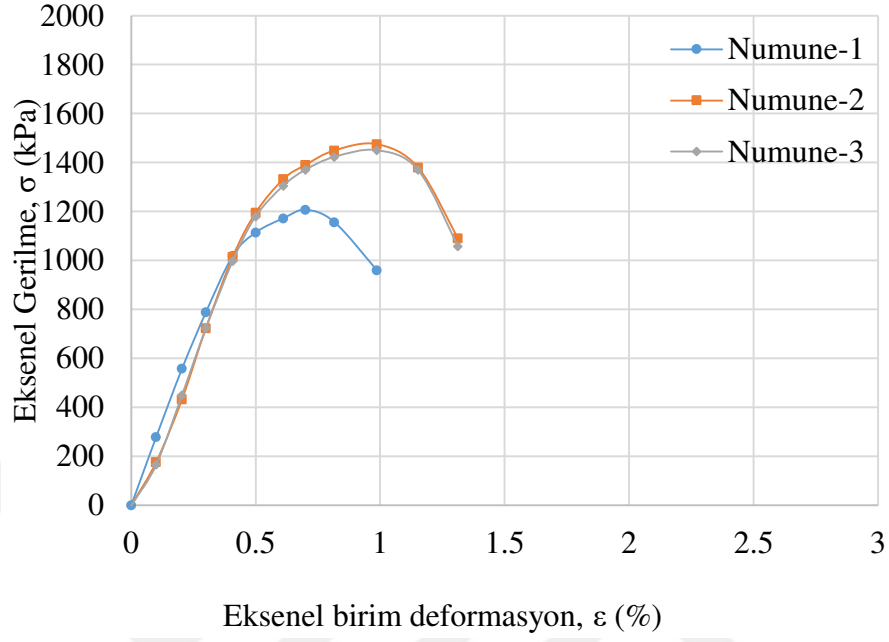


Ek Şekil 2. 19. ZD10 zemin karışımına ait numunelerin 28 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği

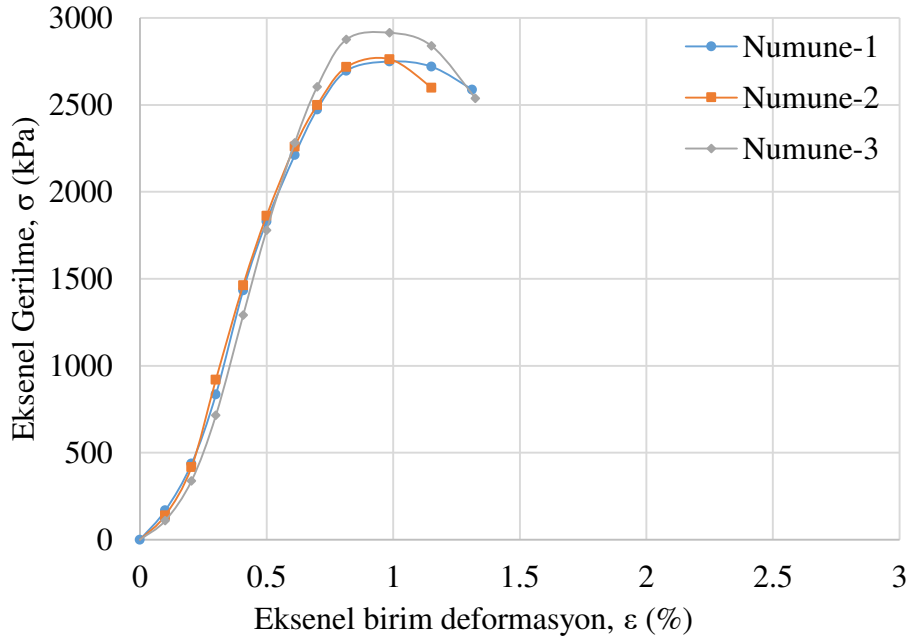


Ek Şekil 2. 20. ZD20 zemin karışımına ait numunelerin 28 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği

Ek-2'in devamı

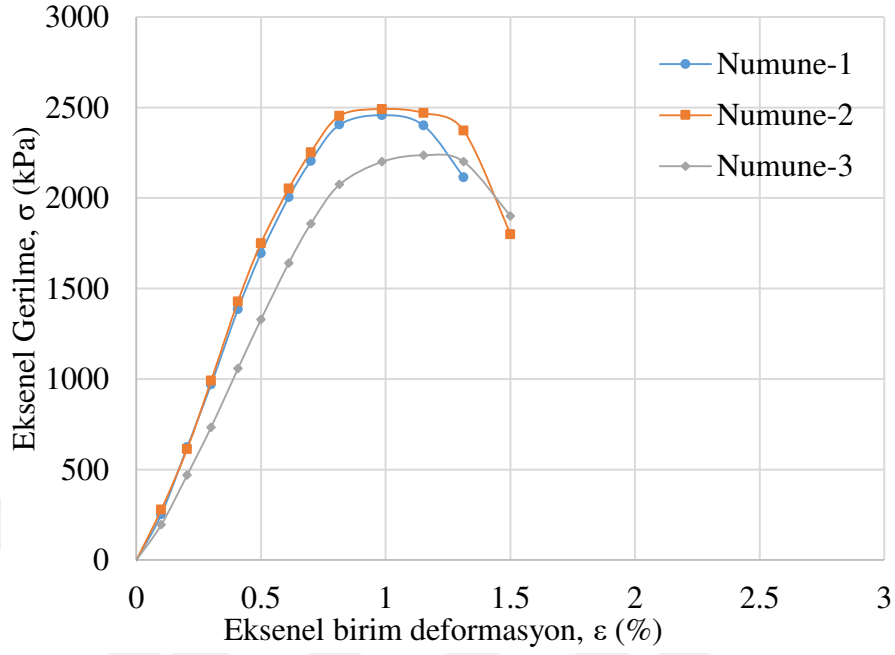


Ek Şekil 2. 21. ZK zemin karışımına ait numunelerin 28 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği

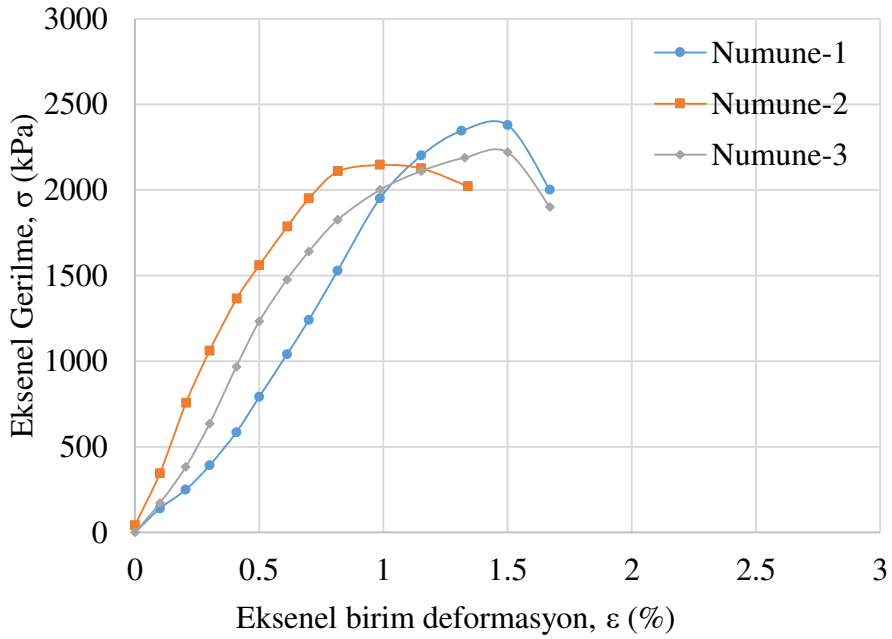


Ek Şekil 2. 22. ZKD5 zemin karışımına ait numunelerin 28 günlük kür sonrası eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği

Ek-2'in devamı

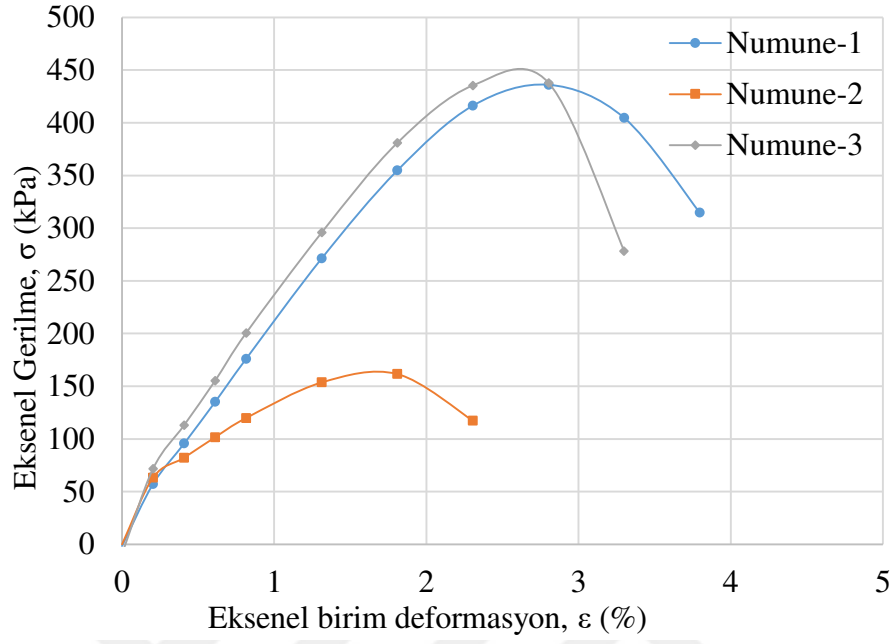


Ek Şekil 2. 23. ZKD10 zemin karışımına ait numunelerin 28 günlük kür sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği

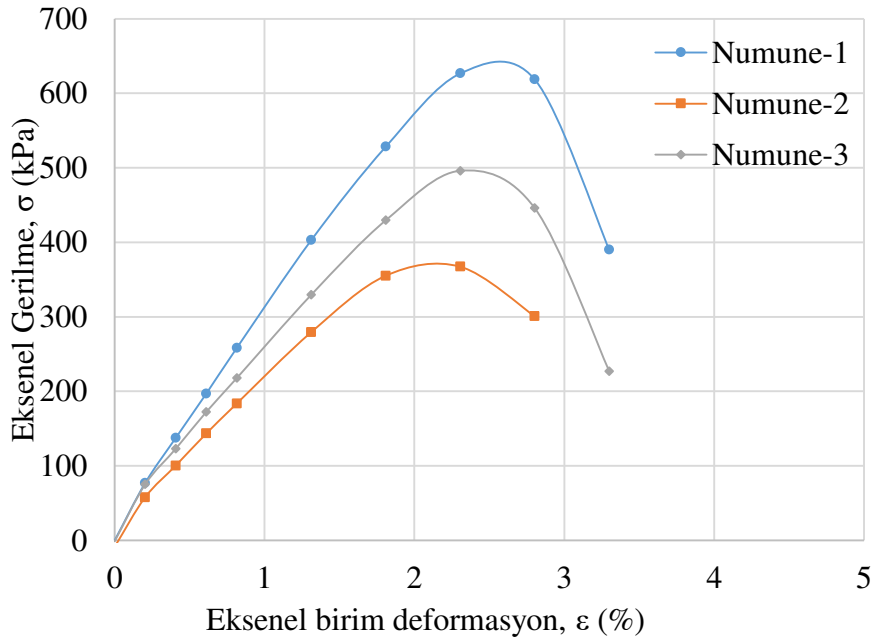


Ek Şekil 2. 24. ZKD20 zemin karışımına ait numunelerin 28 günlük kür sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği

Ek-2'in devamı

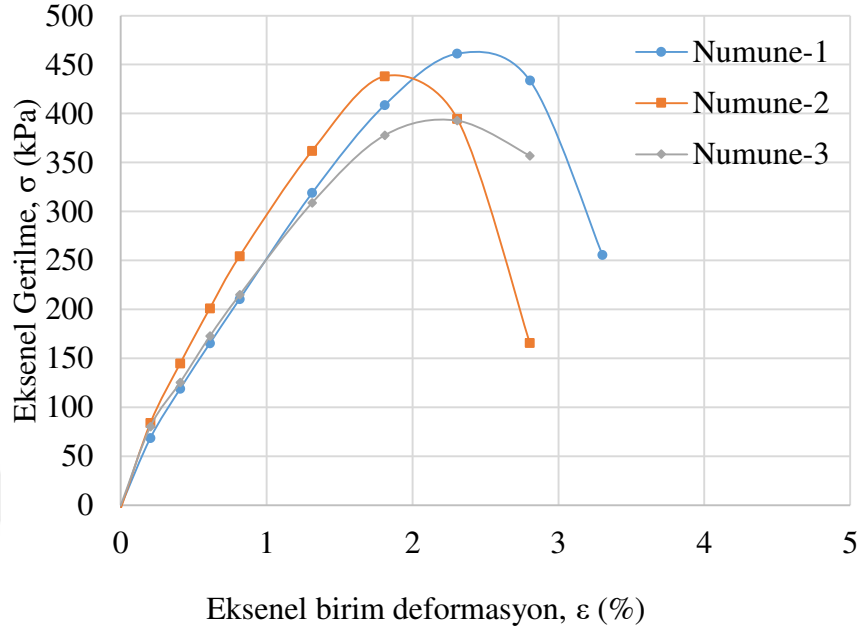


Ek Şekil 2. 25. Doğal zemine ait numunelerin donma-çözülme çevrimi sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği

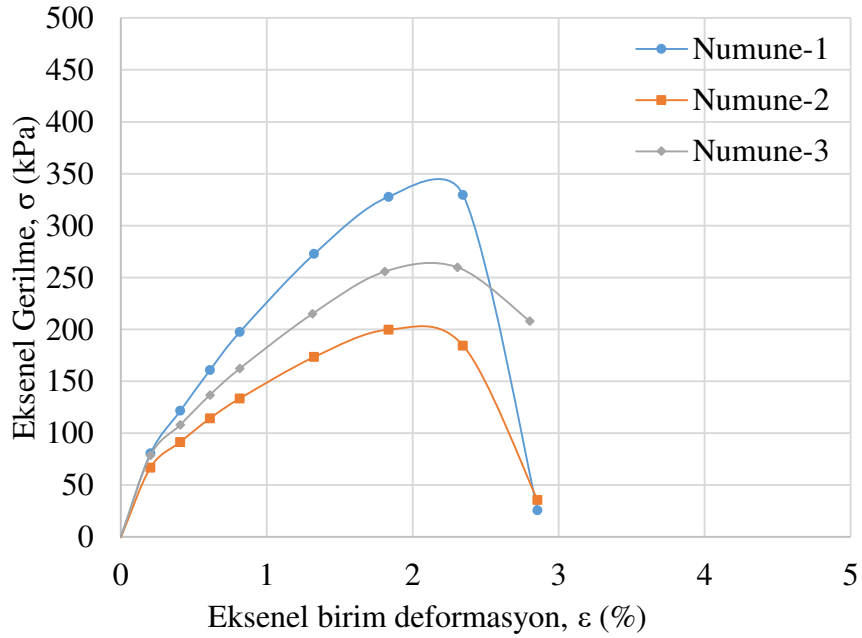


Ek Şekil 2. 26. ZD5 zemin karışımına ait numunelerin donma-çözülme çevrimi sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği

Ek-2'in devamı

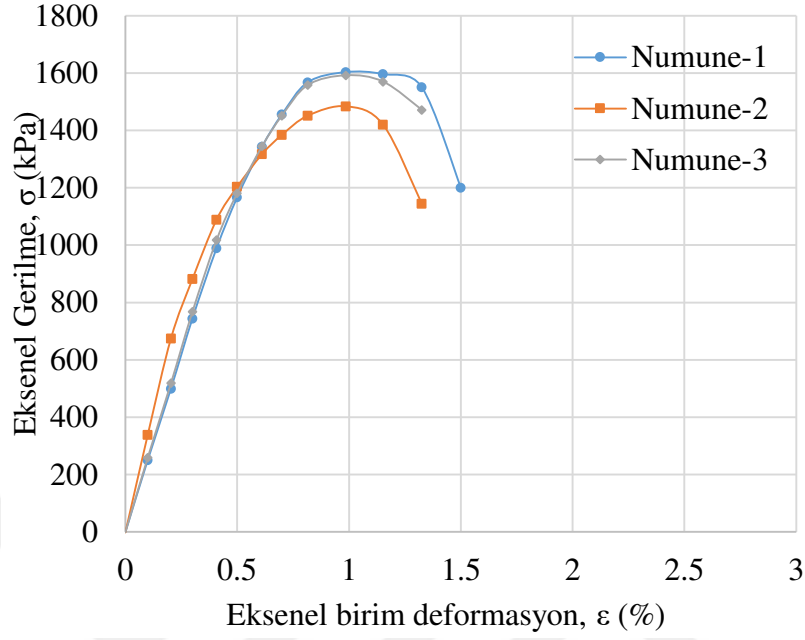


Ek Şekil 2. 27. ZD10 zemin karışımına ait numunelerin donma-çözülme çevrimi sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği

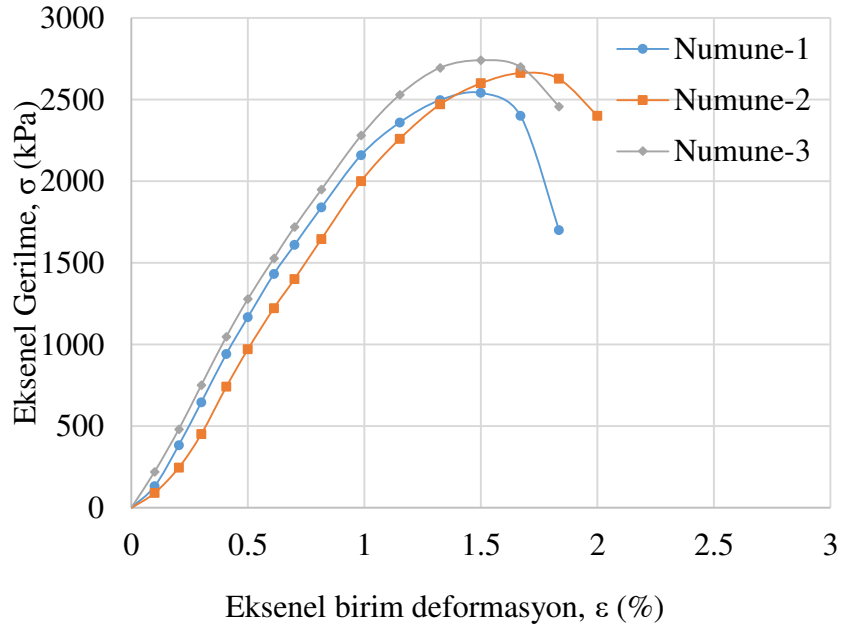


Ek Şekil 2. 28. ZD20 zemin karışımına ait numunelerin donma-çözülme çevrimi sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği

Ek-2'in devamı

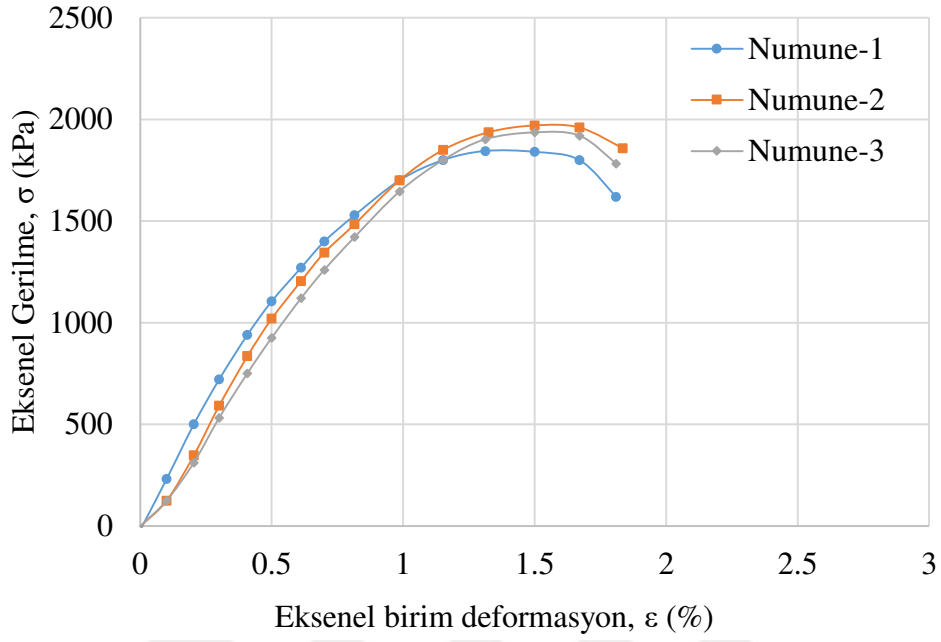


Ek Şekil 2. 29. ZK zemin karışımına ait numunelerin donma-çözülme çevrimi sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği

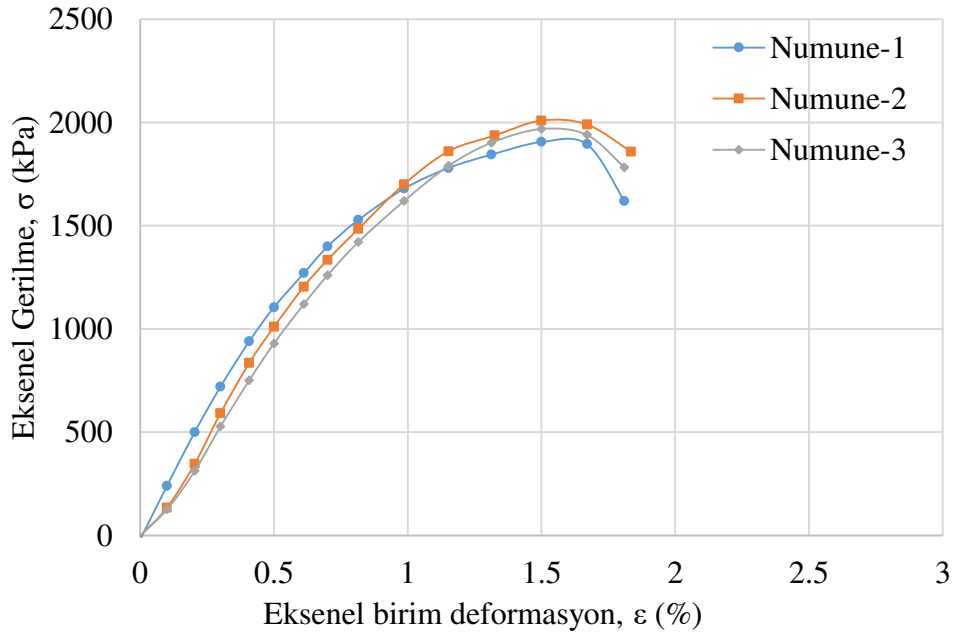


Ek Şekil 2. 30. ZKD5 zemin karışımına ait numunelerin donma-çözülme çevrimi sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği

Ek-2'in devamı

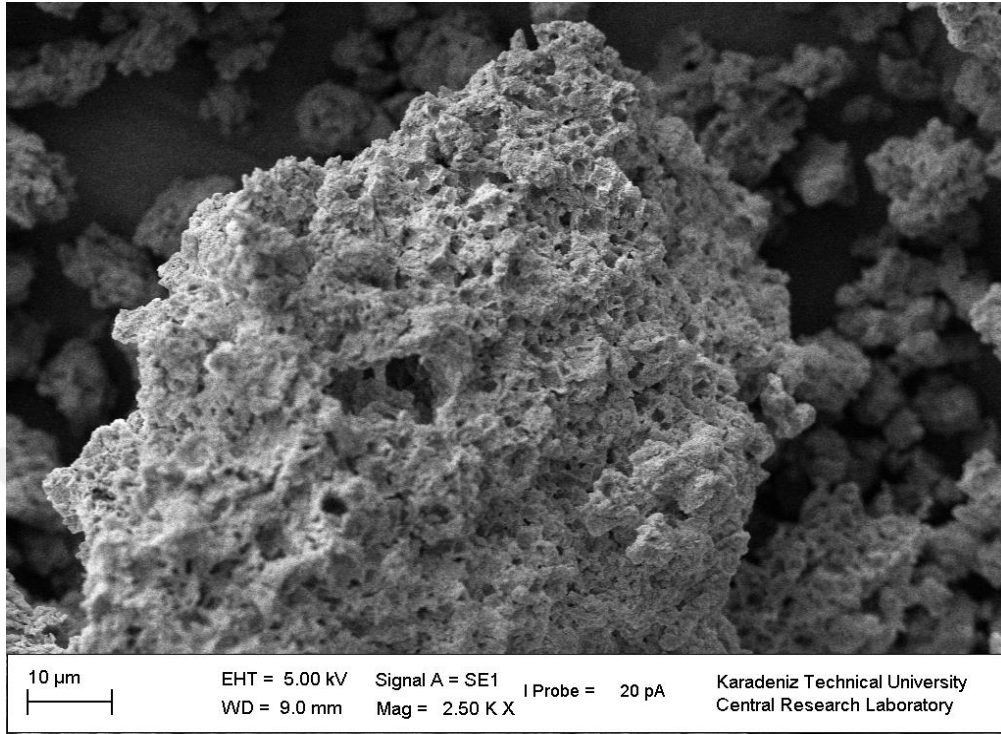


Ek Şekil 2. 31. ZKD10 zemin karışımına ait numunelerin donma-çözülme çevrimi sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği

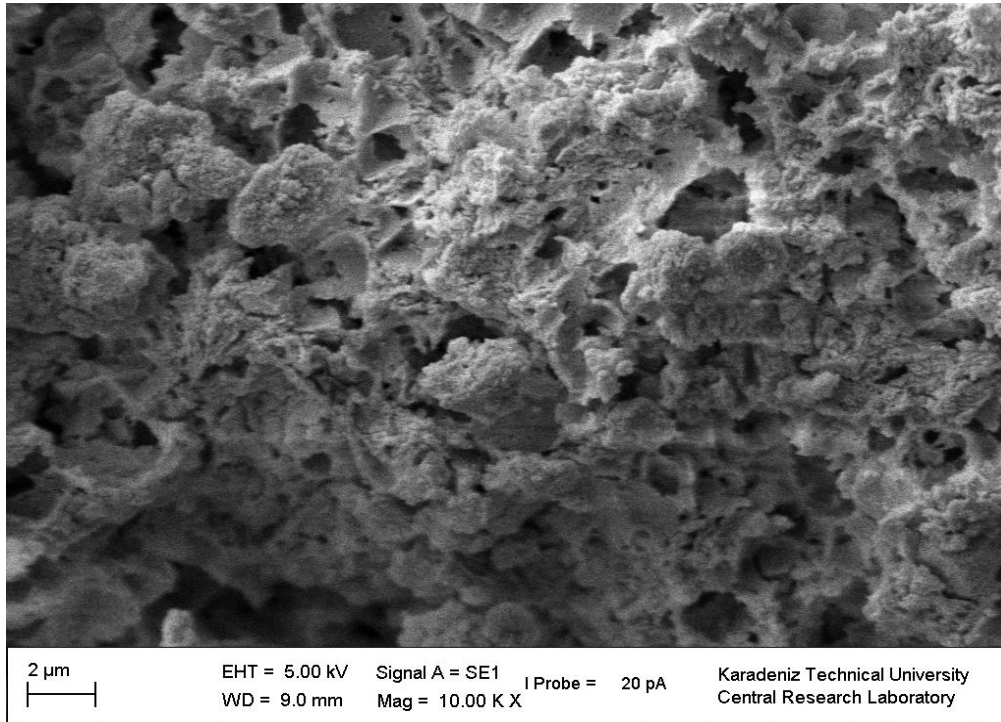


Ek Şekil 2. 32. ZKD20 zemin karışımına ait numunelerin donma-çözülme çevrimi sonrası eksenel gerilme-birim deformasyon grafiği

Ek-3 SEM Görüntüleri

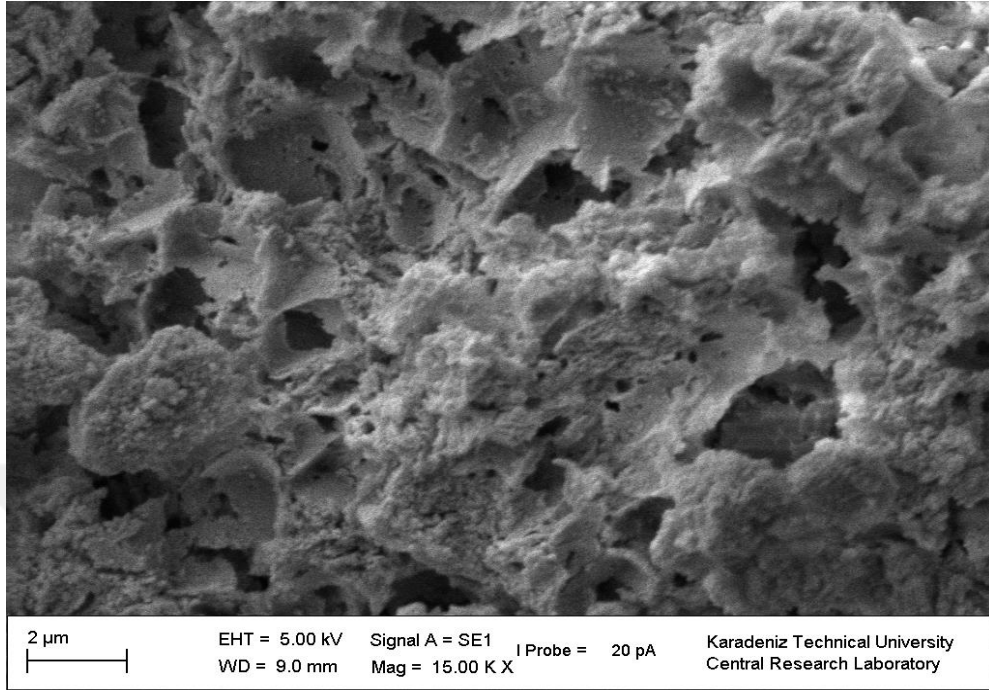


Ek Şekil 3. 1. Isıl işlem görmemiş diatomitin 2500 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

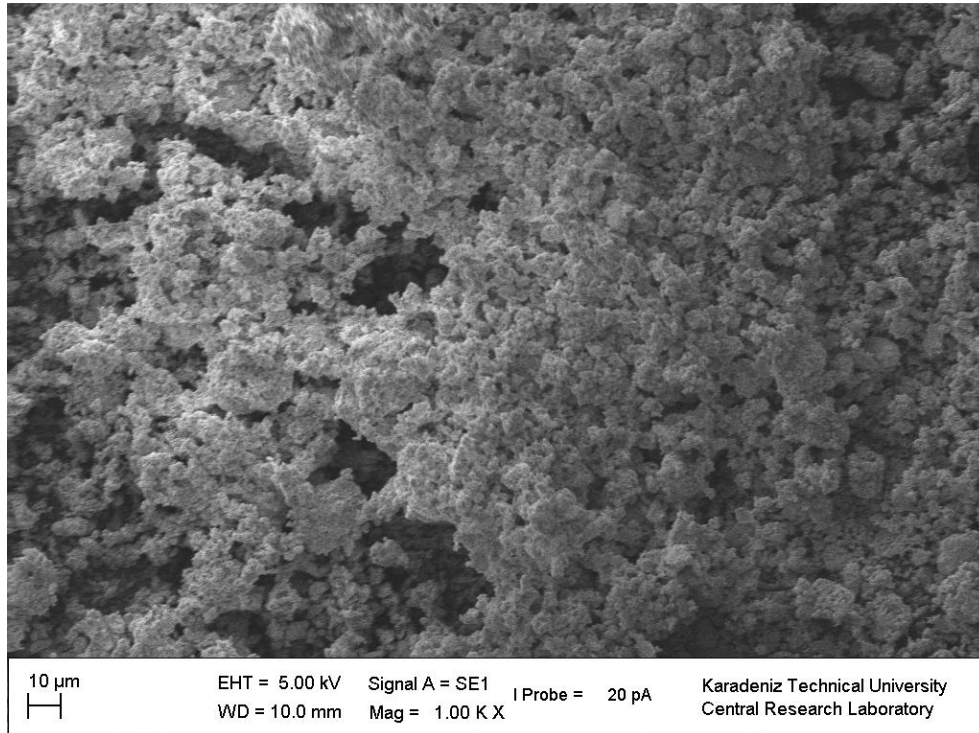


Ek Şekil 3. 2. Isıl işlem görmemiş diatomitin 10000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

Ek-3'ün devamı

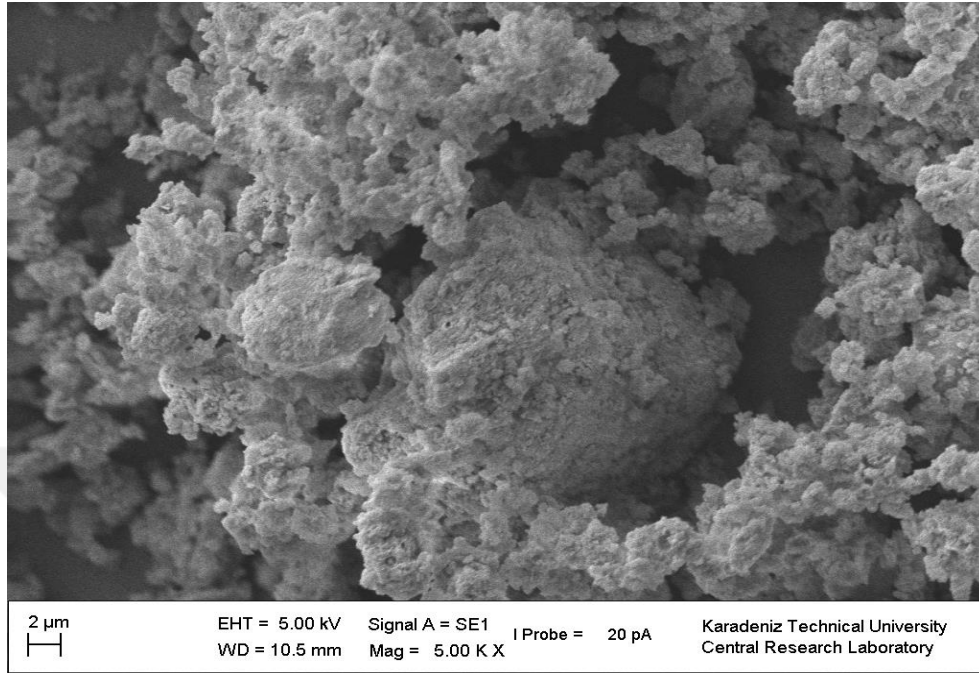


Ek Şekil 3. 3. Isıl işlem görmemiş diatomitin 15000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

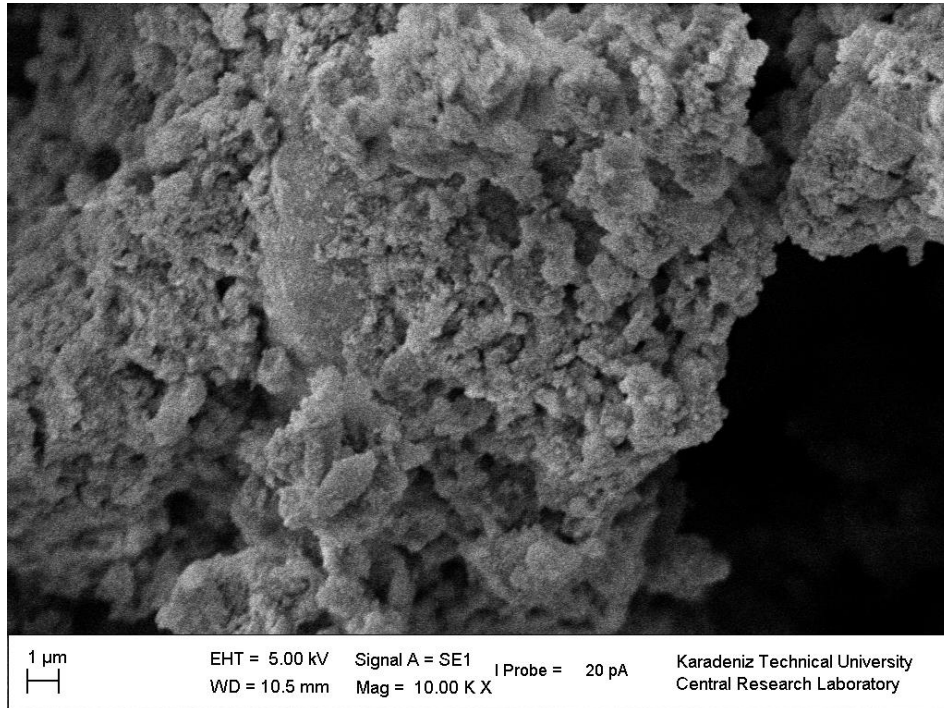


Ek Şekil 3. 4. Düşük ısııl işlem görmüş diatomitin 1000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

Ek-3'ün devamı

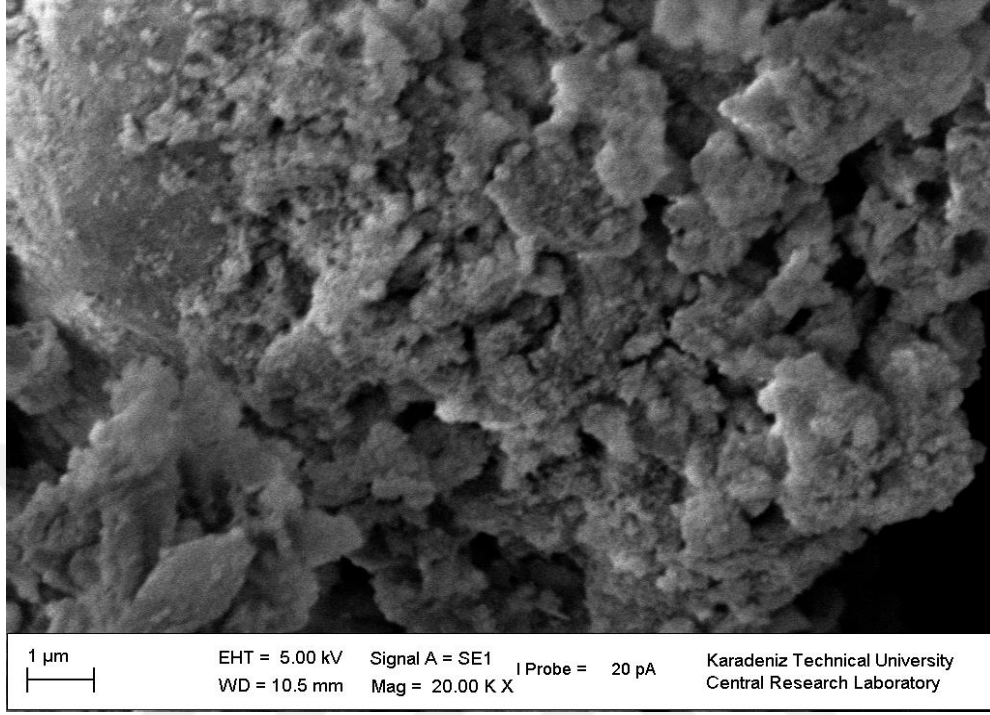


Ek Şekil 3. 5. Düşük ısı işlem görmüş diatomitin 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

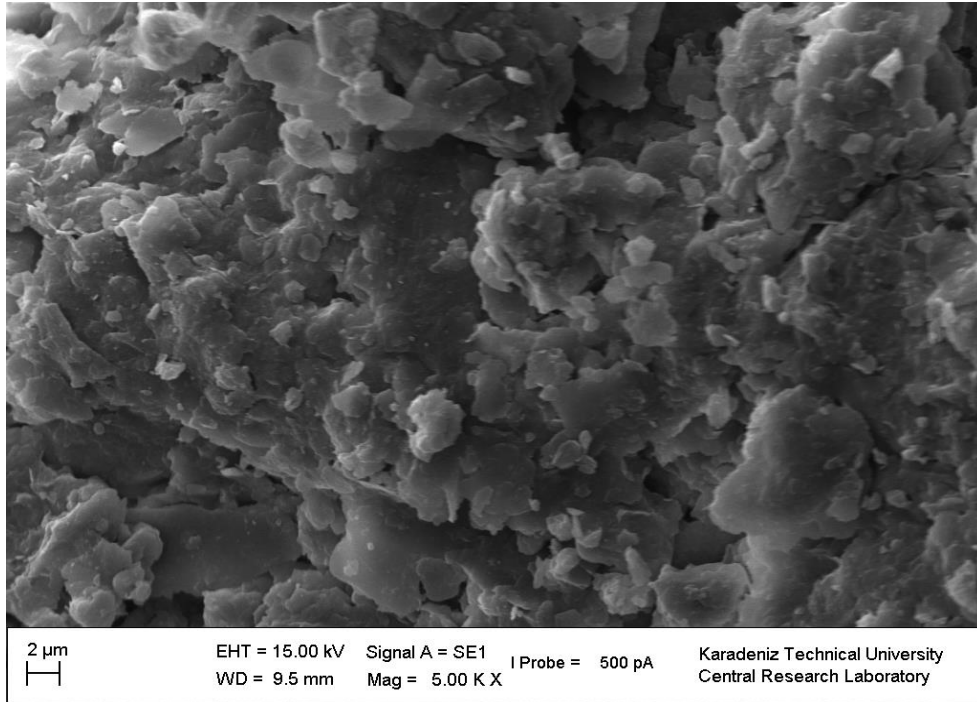


Ek Şekil 3. 6. Düşük ısı işlem görmüş diatomitin 10000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

Ek-3'ün devamı

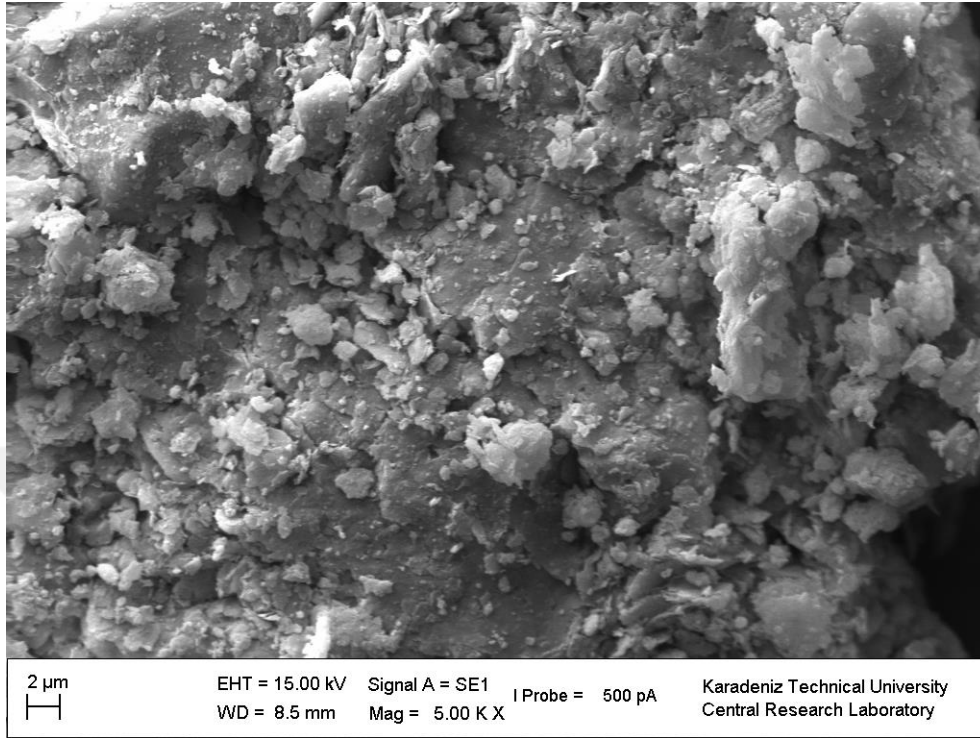


Ek Şekil 3. 7. Düşük ısı işlem görmüş diatomitin 20000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

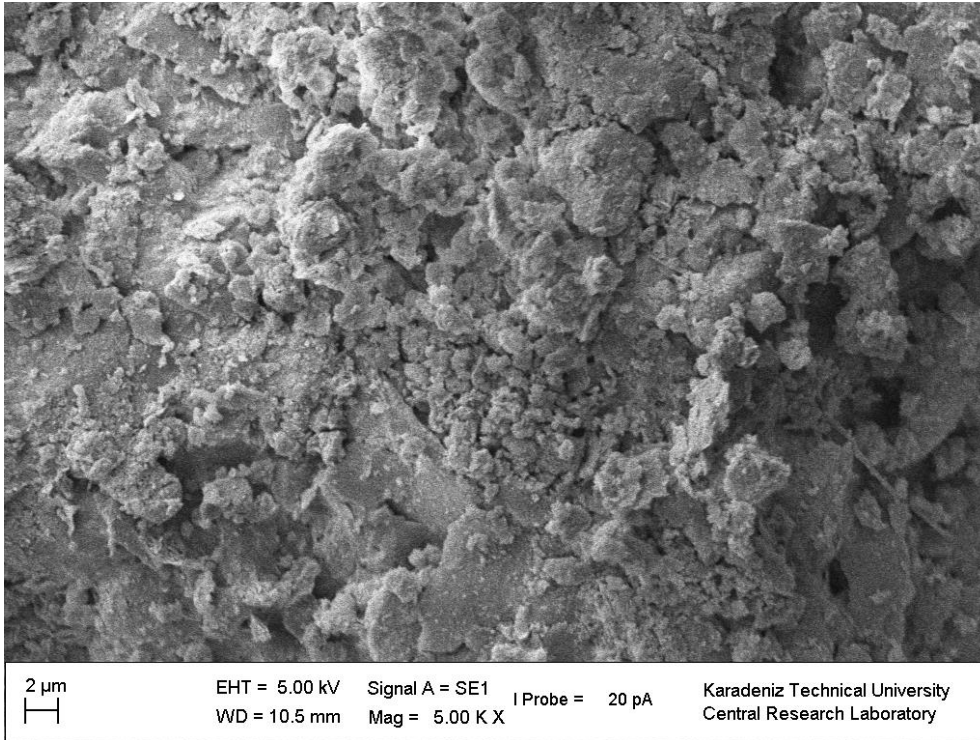


Ek Şekil 3. 8. Doğal zeminin 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

Ek-3'ün devamı

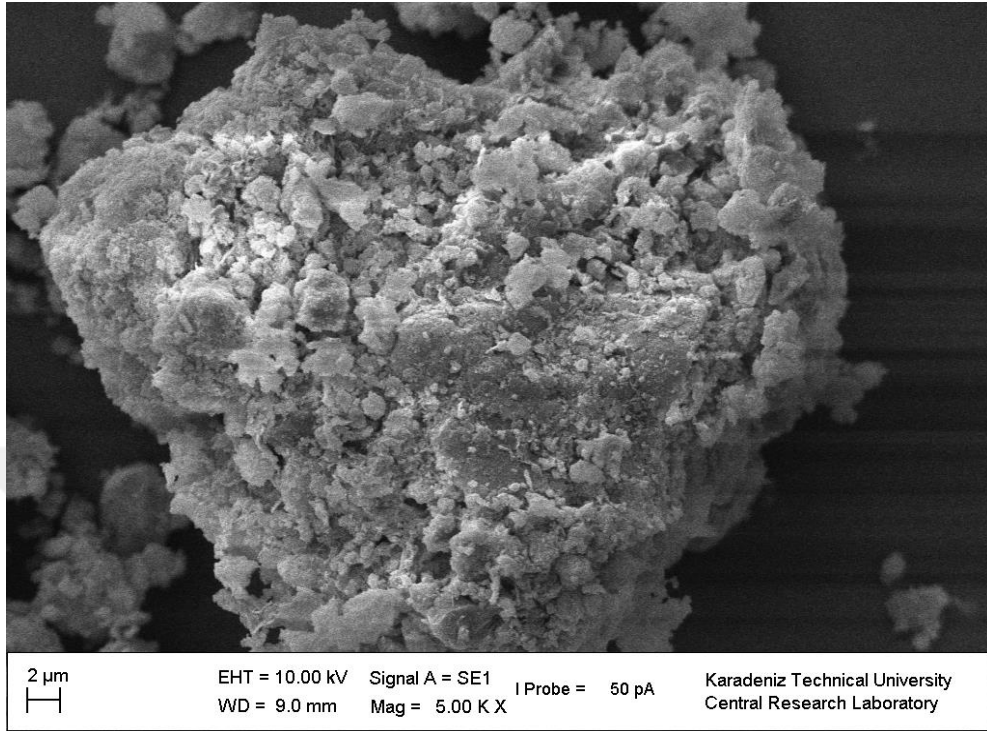


Ek Şekil 3. 9. ZD5 zemin karışımının 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

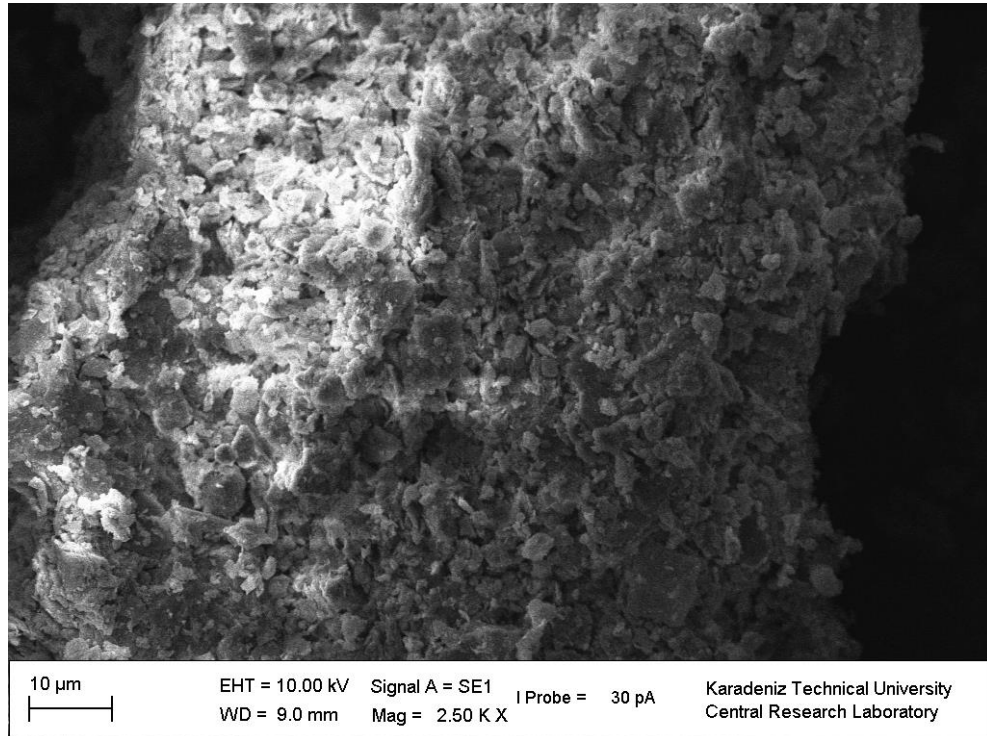


Ek Şekil 3. 10. ZD10 zemin karışımının 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

Ek-3'ün devamı

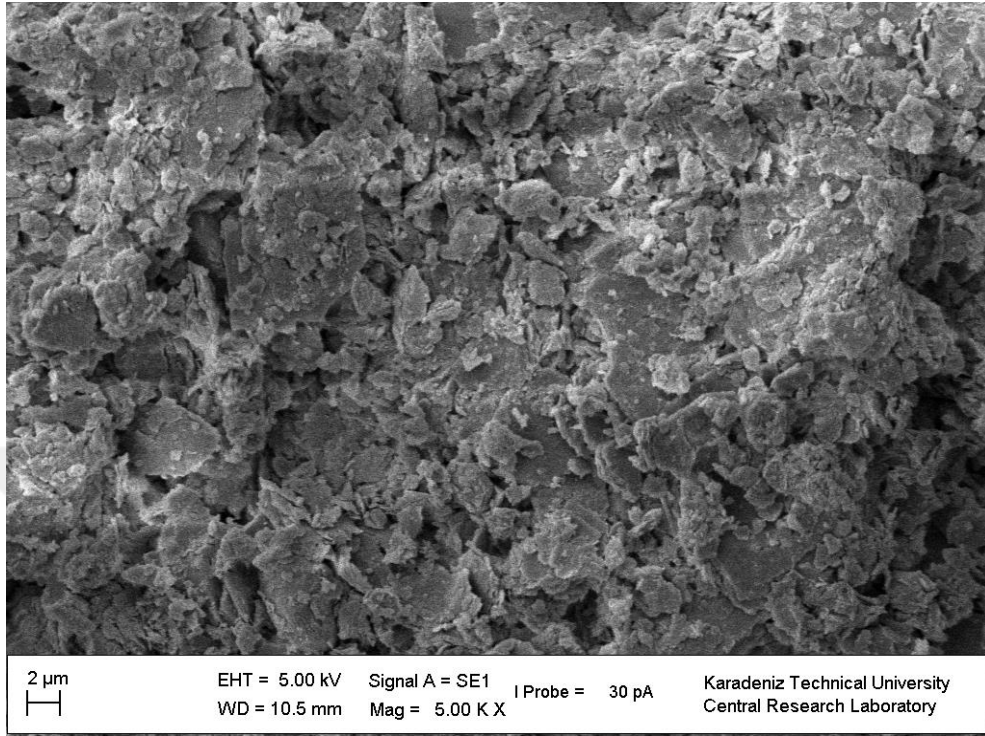


Ek Şekil 3. 11. ZD20 zemin karışımının 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

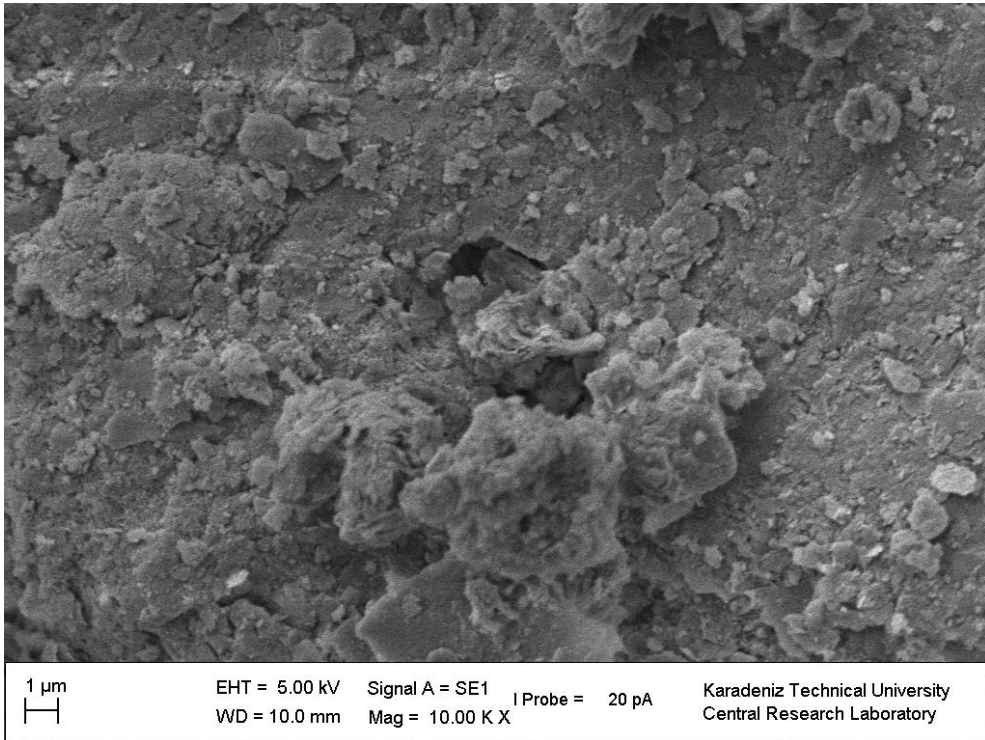


Ek Şekil 3. 12. ZK zemin karışımının 2500 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

Ek-3'ün devamı

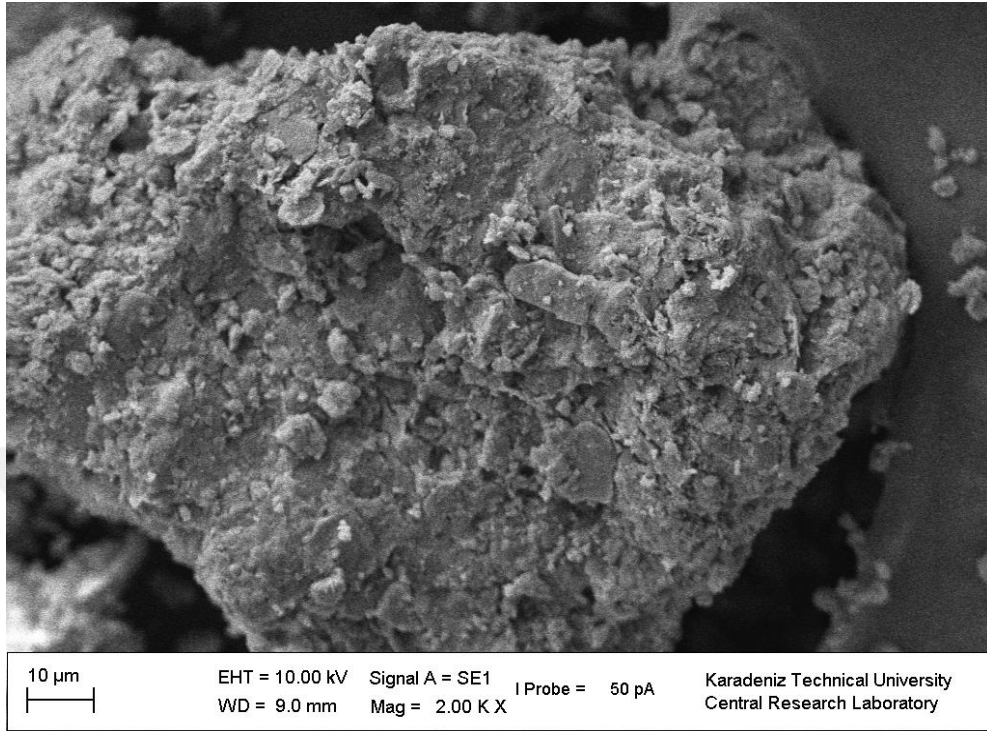


Ek Şekil 3. 13. ZK zemin karışımının 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

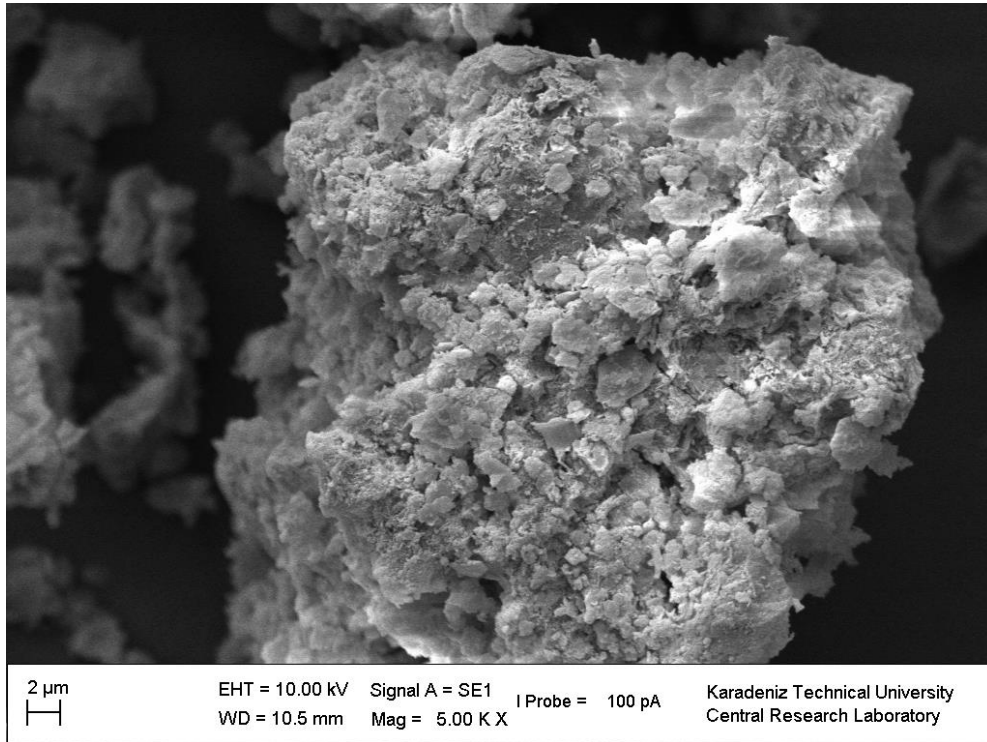


Ek Şekil 3. 14. ZK zemin karışımının 10000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

Ek-3'ün devamı

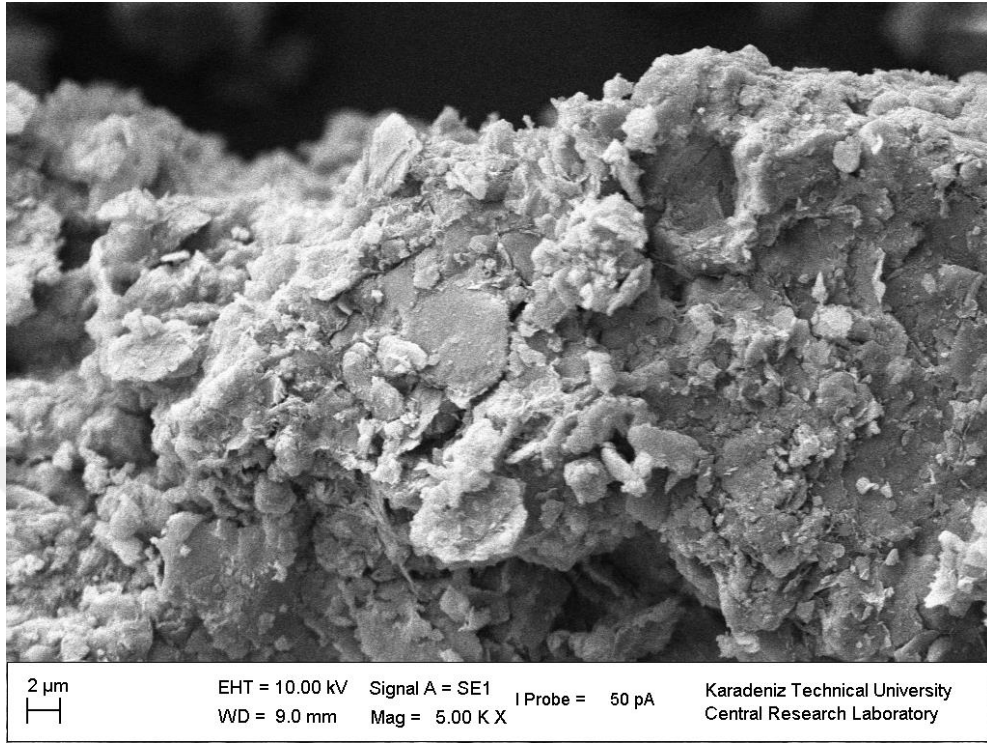


Ek Şekil 3. 15. ZKD5 zemin karışımının 2000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

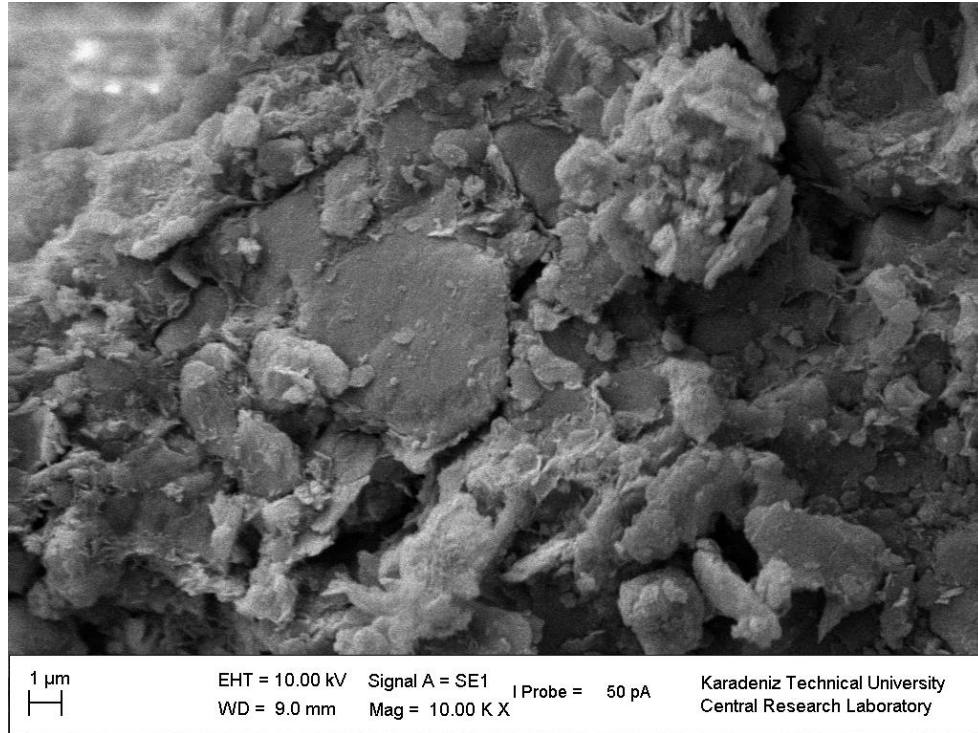


Ek Şekil 3. 16. ZKD5 zemin karışımının 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

Ek-3'ün devamı

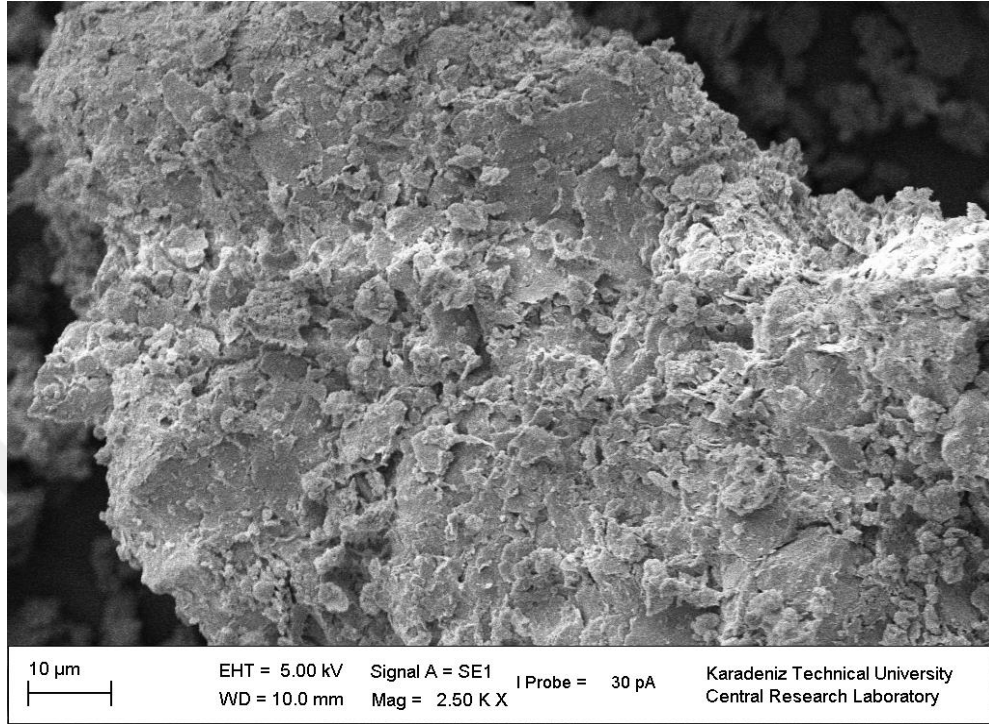


Ek Şekil 3. 17. ZKD5 zemin karışımının 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

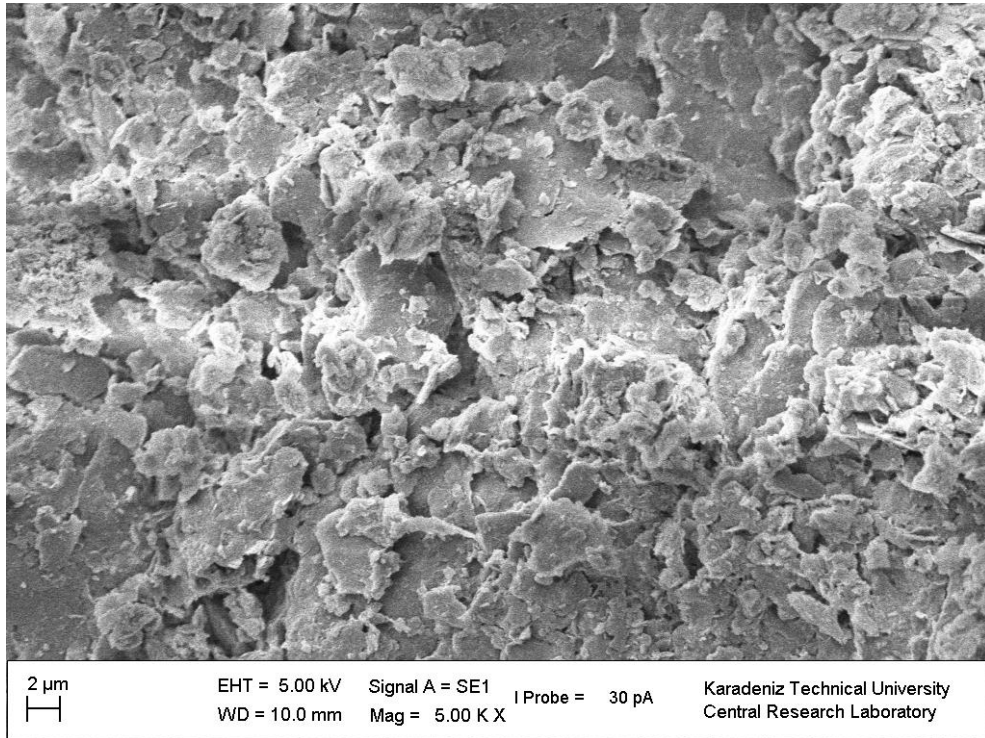


Ek Şekil 3. 18. ZKD5 zemin karışımının 10000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

Ek-3'ün devamı

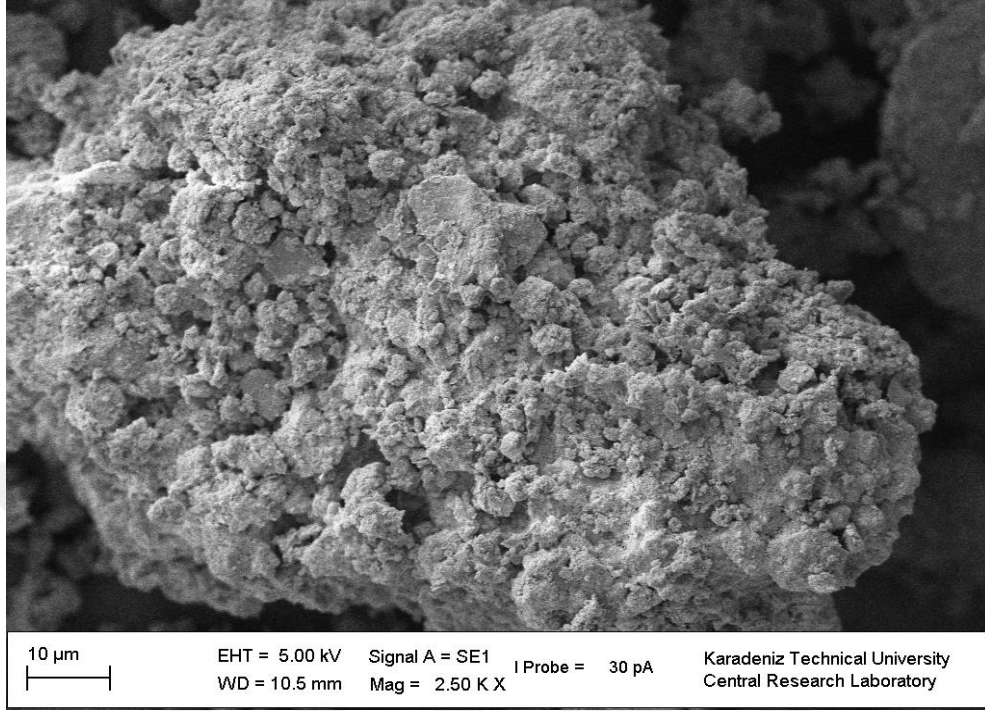


Ek Şekil 3. 19. ZKD10 zemin karışımının 2500 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

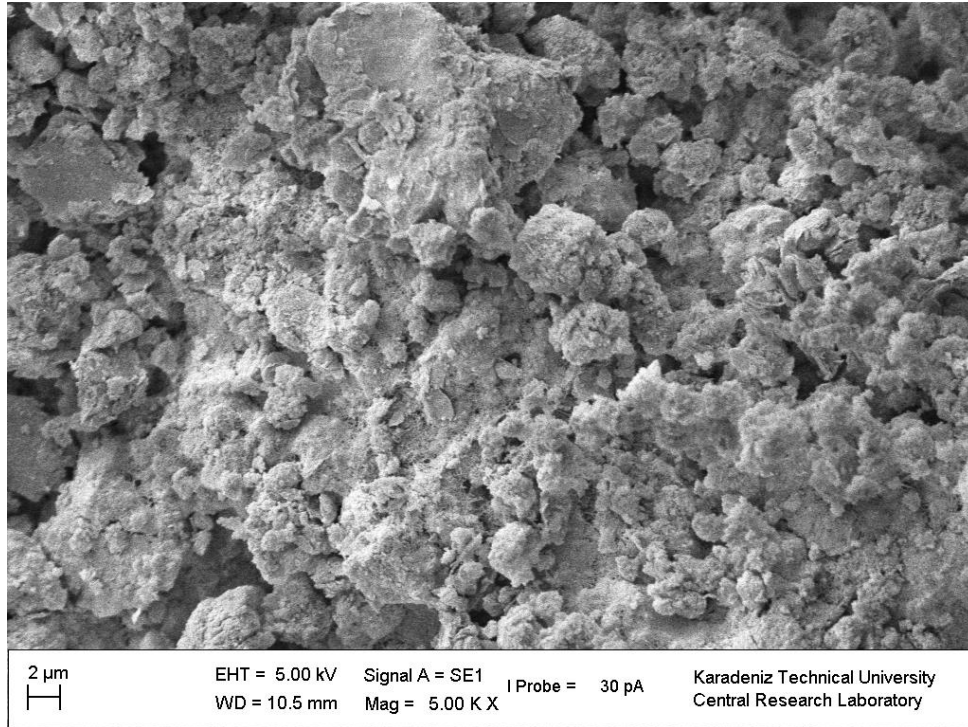


Ek Şekil 3. 20. ZKD10 zemin karışımının 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

Ek-3'ün devamı

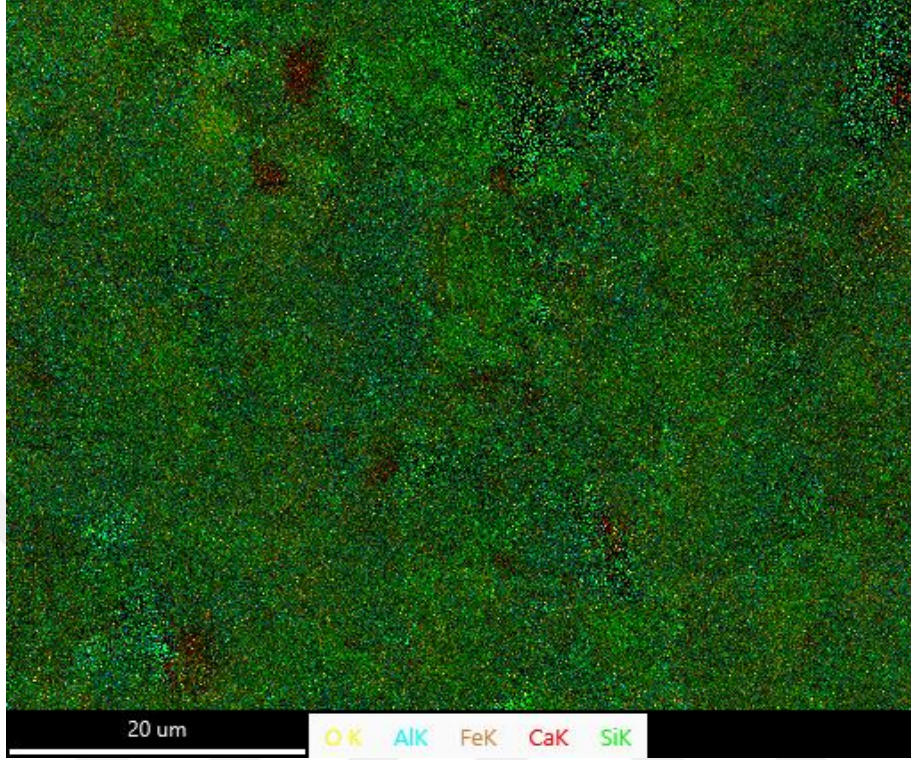


Ek Şekil 3. 21. ZKD20 zemin karışımının 2500 kat büyütülmüş SEM görüntüsü



Ek Şekil 3. 22. ZKD20 zemin karışımının 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

Ek-4 EDS Haritalaması

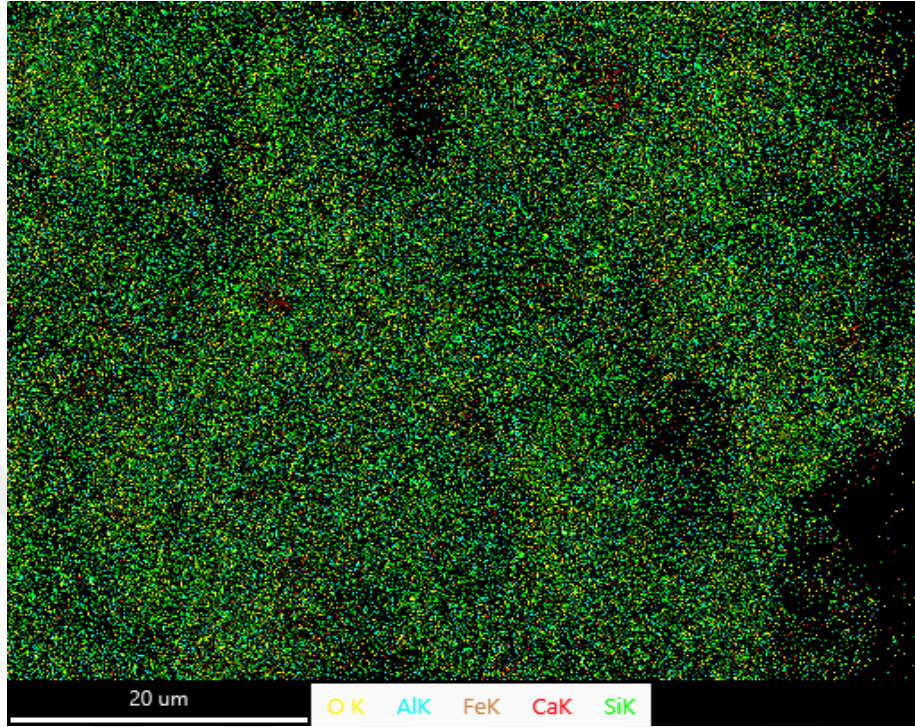


Ek Şekil 4. 1. Doğal zeminin EDS elementsel haritalaması



Ek Şekil 4. 2. Doğal zeminin SEM görüntüsü ile EDS elementsel haritalaması

Ek-4'ün devamı

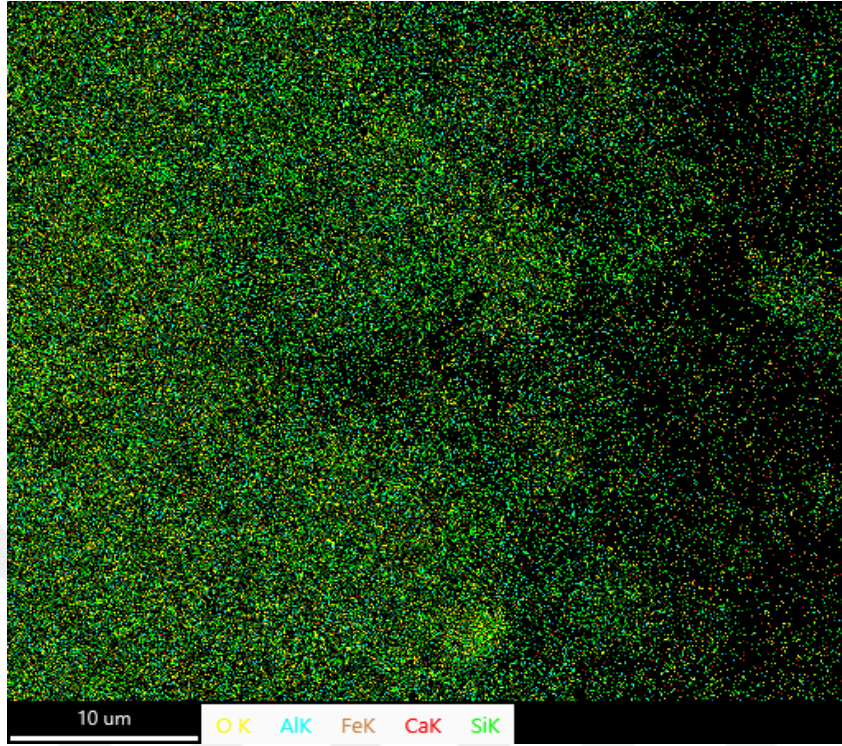


Ek Şekil 4. 3. ZD5 zemin karışımının EDS elementsel haritalaması

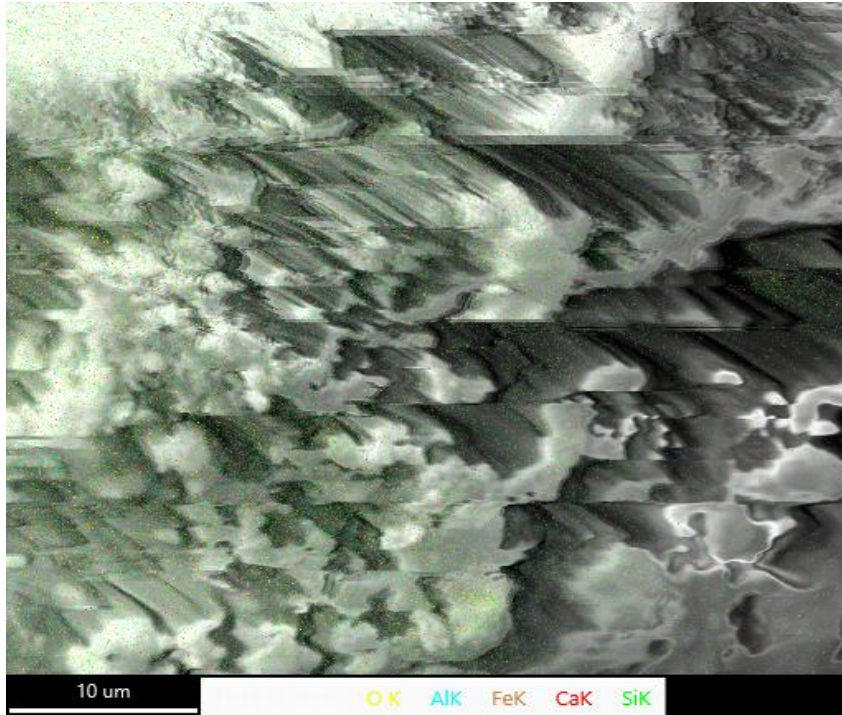


Ek Şekil 4. 4. ZD5 zemin karışımının SEM görüntüsü ile EDS elementsel haritalaması

Ek-4'ün devamı

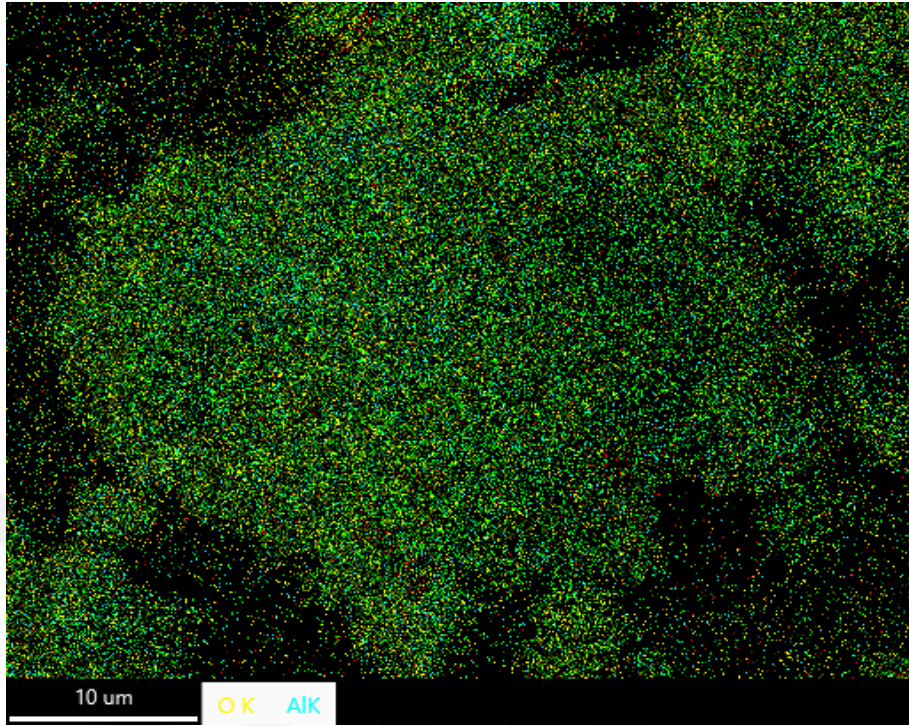


Ek Şekil 4. 5. ZD10 zemin karışımının EDS elementsel haritalaması

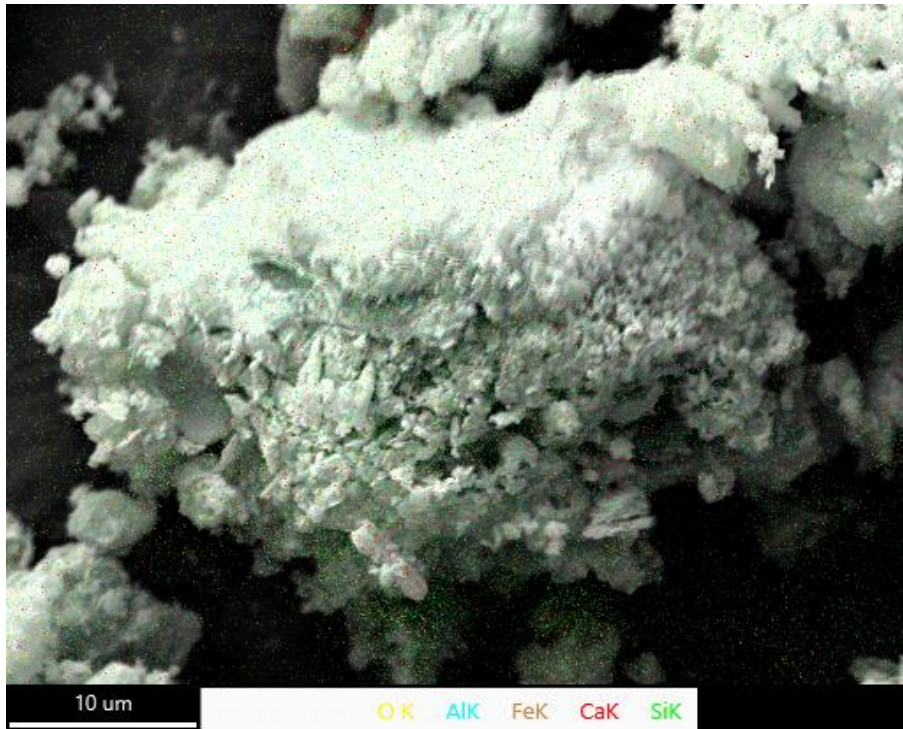


Ek Şekil 4. 6 ZD10 zemin karışımının SEM görüntüsü ile EDS elementsel haritalaması

Ek-4'ün devamı

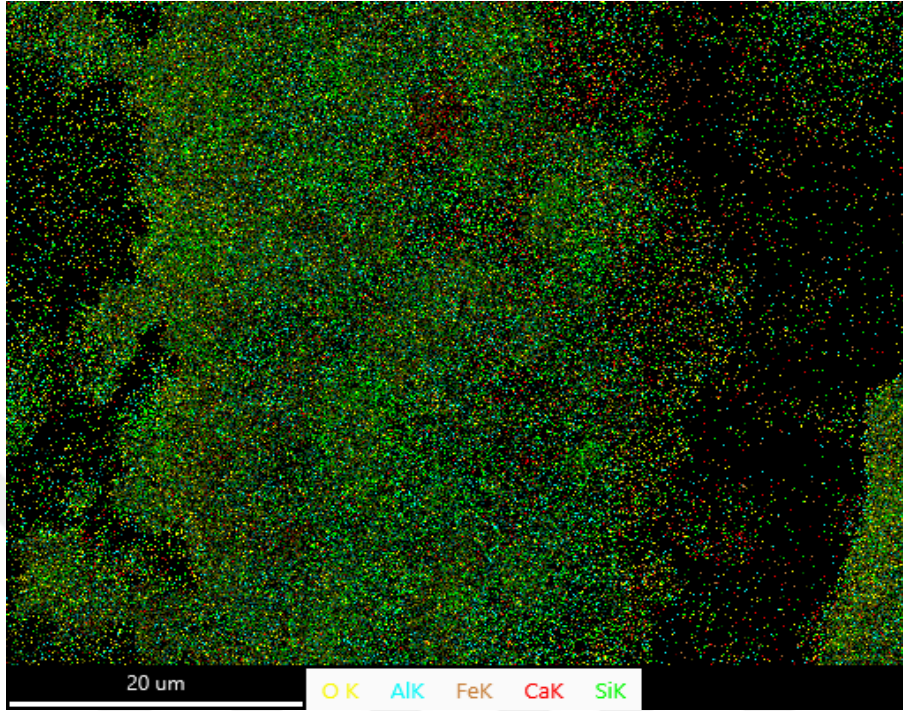


Ek Şekil 4. 7. ZD20 zemin karışımının EDS elementsel haritalaması

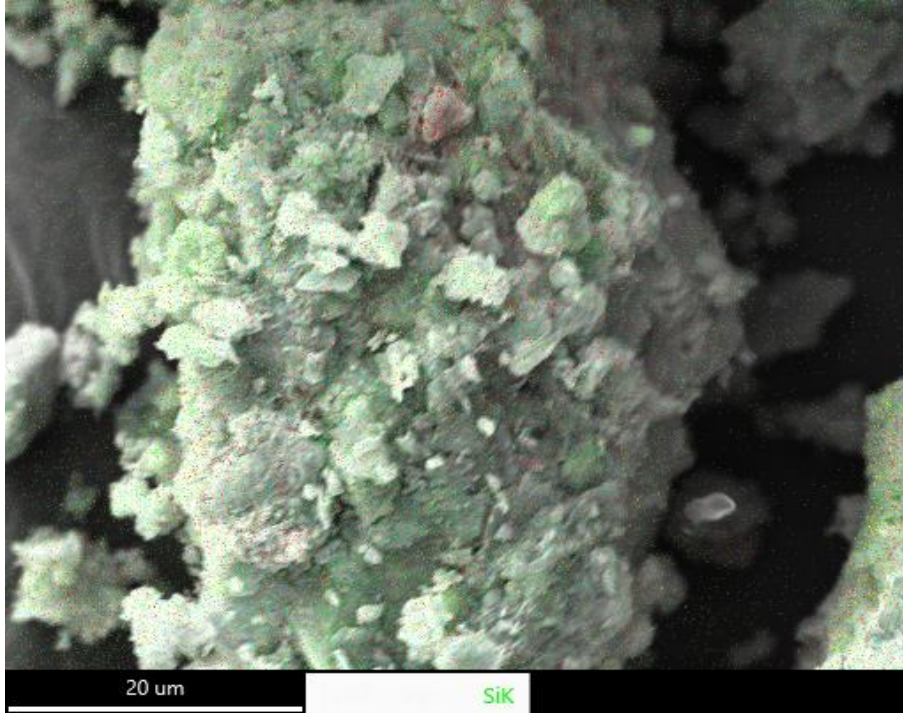


Ek Şekil 4. 8. ZD20 zemin karışımının SEM görüntüsü ile EDS elementsel haritalaması

Ek-4'ün devamı

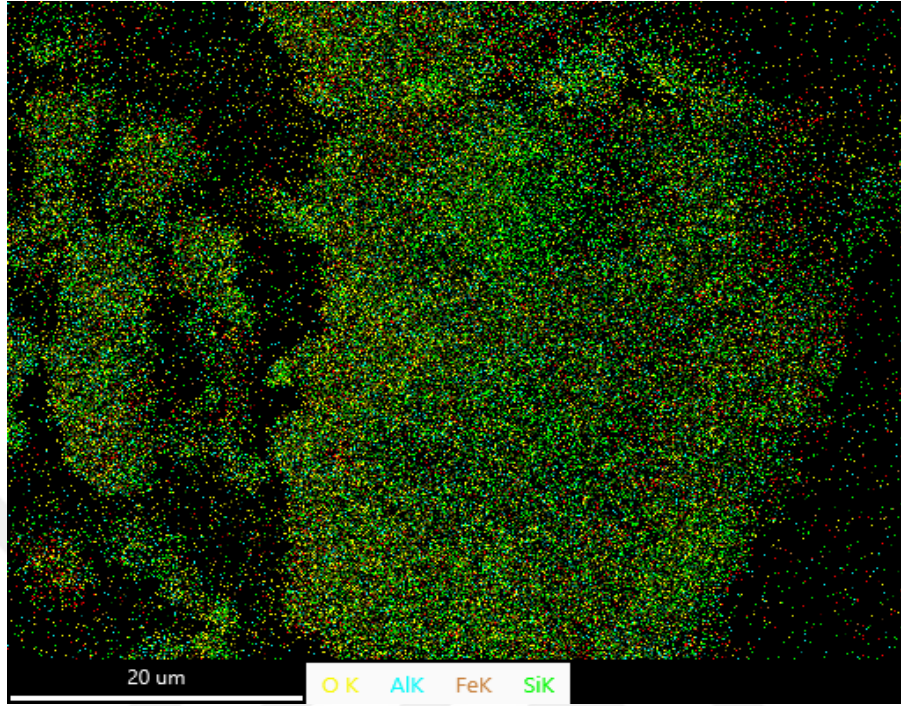


Ek Şekil 4. 9. ZK zemin karışımının EDS elementsel haritaları

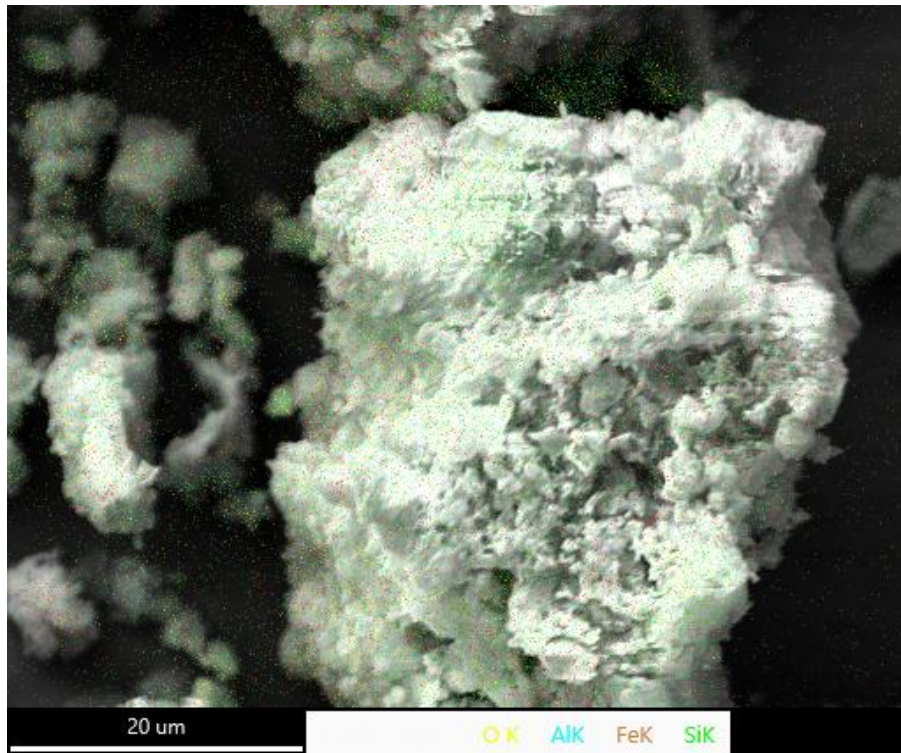


Ek Şekil 4. 10. ZK zemin karışımının SEM görüntüsü ile EDS elementsel haritalaması

Ek-4'ün devamı

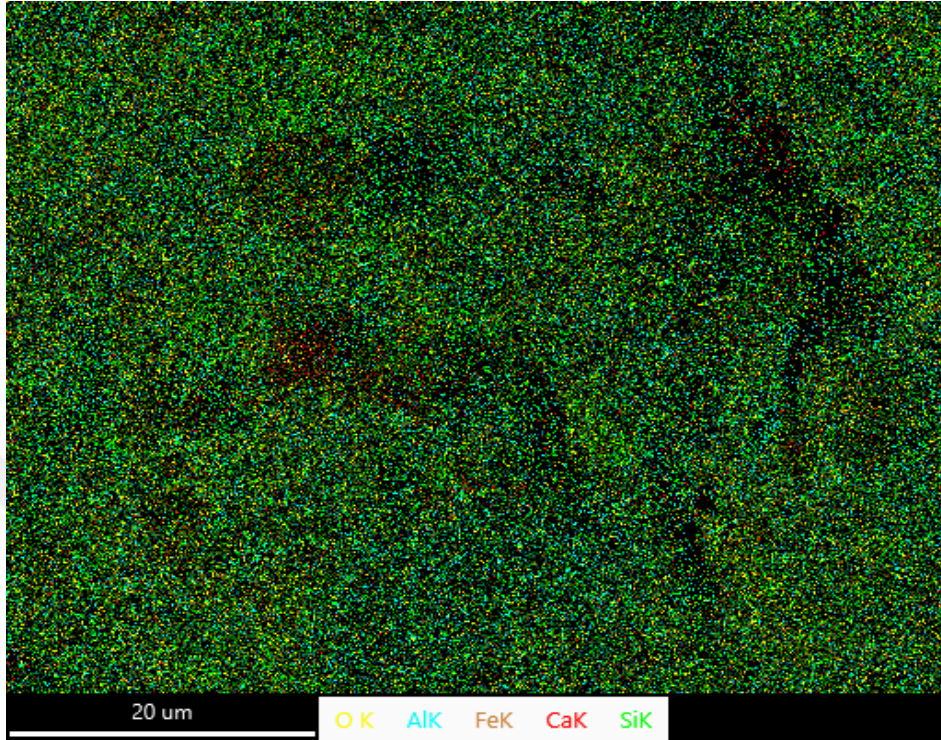


Ek Şekil 4. 11. ZKD5 zemin karışımının EDS elementsel haritalaması

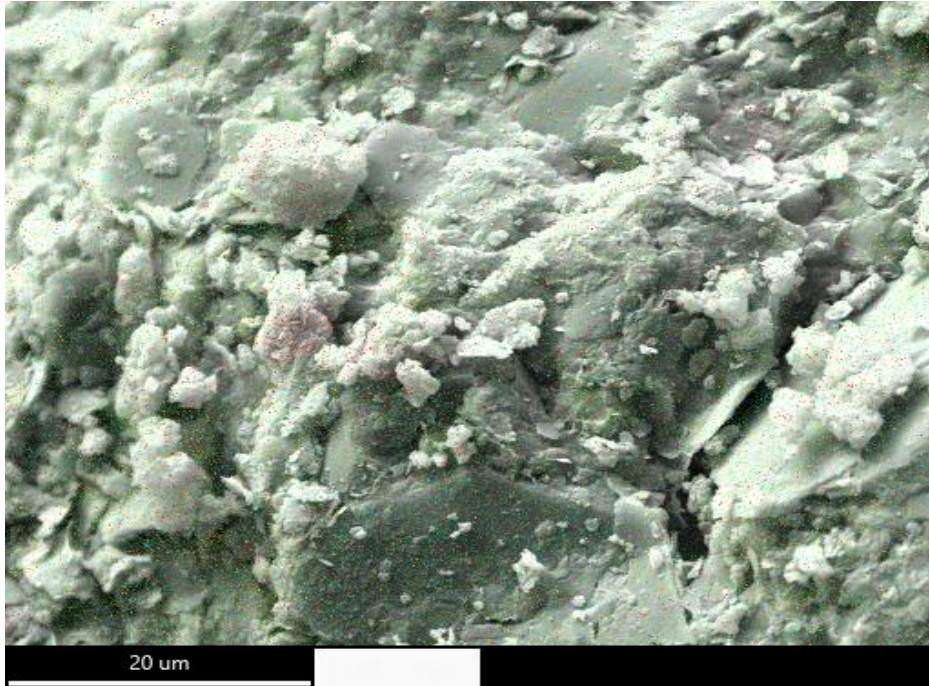


Ek Şekil 4. 12. ZKD5 zemin karışımının SEM görüntüsü ile EDS elementsel haritalaması

Ek-4'ün devamı

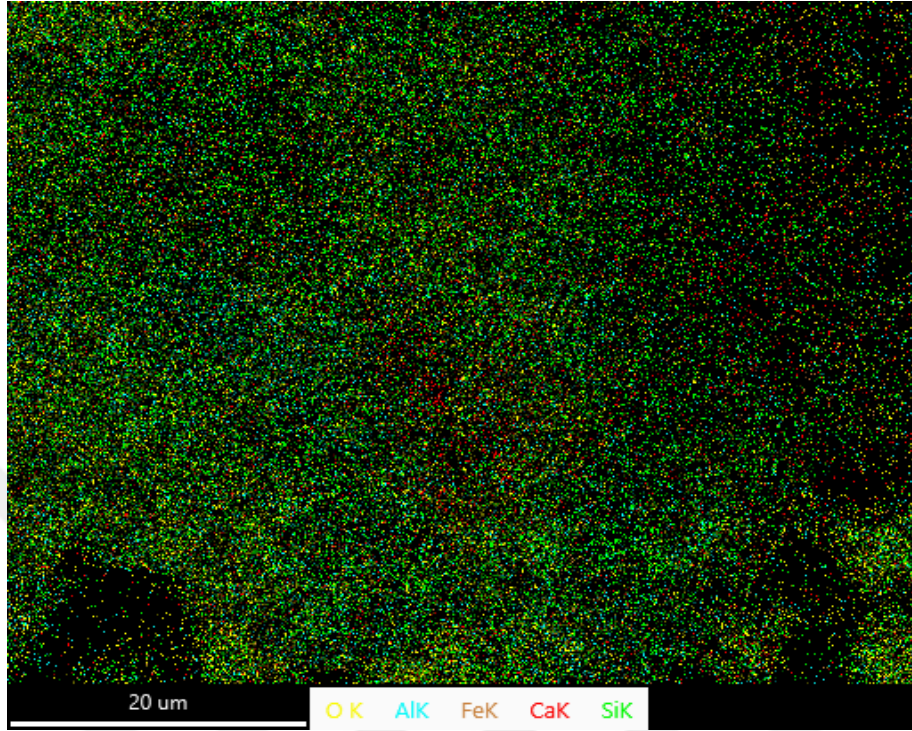


Ek Şekil 4. 13. ZKD10 zemin karışımının EDS elementsel haritalaması

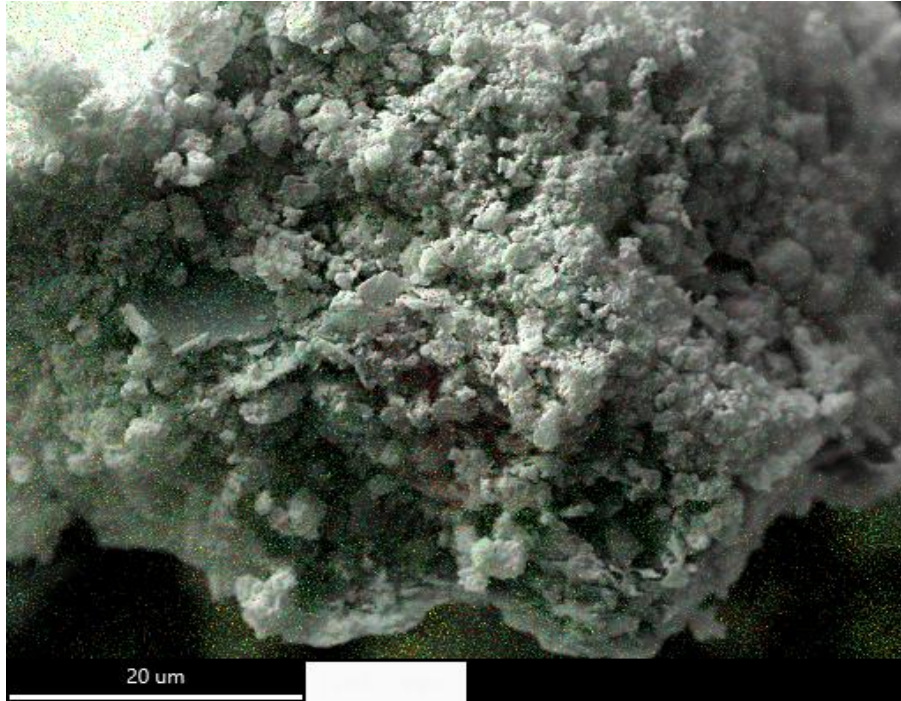


Ek Şekil 4. 14. ZKD10 zemin karışımının SEM görüntüsü ile EDS elementsel haritalaması

Ek-4'ün devamı



Ek Şekil 4. 15. ZKD20 zemin karışımının EDS elementsel haritalaması



Ek Şekil 4. 16. ZK205 zemin karışımının SEM görüntüsü ile EDS elementsel haritalaması

ÖZGEÇMİŞ

Lise öğrenimini Arsin Anadolu Lisesi'nde tamamladı. Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2016 yılında mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Erasmus+ programı ile bir dönem boyunca Bydgoszcz Teknoloji ve Yaşam Bilimleri Üniversitesi'nde eğitim gördü. 2019 yılında YLSY bursiyeri olmaya hak kazanan TANDOĞAN, ileri derecede İngilizce bilmektedir.

