



**DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİ İLE DÜŞÜK
PLASTİSİTELİ KİL ZEMİNİN BİYOPOLİMER VE BAZİK
KİMYASALLAR KULLANILARAK İYİLEŞTİRİLMESİ**

Majid BAGHERINIA

**Doktora Tezi
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Geoteknik Bilim Dalı
Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU
2019
Her Hakkı Saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİ İLE DÜŞÜK
PLASTİSİTELİ KİL ZEMİNİN BİYOPOLİMER VE BAZİK
KİMYASALLAR KULLANILARAK İYİLEŞTİRİLMESİ**

Majid BAGHERINIA

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ERZURUM
2019**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİ İLE DÜŞÜK PLASTİSİTELİ KİL ZEMİNİN
BİYOPOLİMER VE BAZIK KİMYASALLAR KULLANILARAK
İYİLEŞTİRİLMESİ**

Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU danışmanlığında, Majid BAGHERINIA tarafından hazırlanan bu çalışma 12/03/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak ~~oybirliği/oy çokluğu~~ (5./0.) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU

İmza :

Üye : Doç. Dr. Semet ÇELİK

İmza :

Üye : Doç. Dr. Ayşe BAYRAKÇEKEN YURTCAN

İmza :

Üye : Doç. Dr. Sabriye Banu İKİZLER

İmza :

Üye : Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun 14./03./2019 tarih ve 12./37 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: FDK-20186280

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Doktora Tezi

DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİ İLE DÜŞÜK PLASTİSİTELİ KİL ZEMİNİN BİYOPOLİMER VE BAZİK KİMYASALLAR KULLANILARAK İYİLEŞTİRİLMESİ

Majid BAGHERINIA

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU

Bu çalışmada, düşük plastisiteli kil (CL), kendi likit limit miktarında su ile karıştırılarak suya doymuş kil oluşturulmuş ve bu kilin sodyum aljinat (NaAL), sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) katkı maddeleri kullanılarak derin karıştırma yöntemiyle (DMM) iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışma üç aşamadan oluşmaktadır: Birinci aşamada CL kiline toplam kuru ağırlığın farklı oranlarında NaAL, NaOH ve KOH katkı maddeleri ilave edilerek CL kilinin likit limit miktarında ($WL = \%40$) su ile karıştırılmış ve hazırlanan numuneler üzerinde farklı kür sürelerinde serbest basınç mukavemet (UCS) deneyi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlardan her bir numuneye ait q_u -kür süresi-katkı oranı ilişkileri çizilmiştir. Genel olarak katkı maddesi oranlarının artmasıyla q_u değerlerinde de artışların olduğu gözlenmiştir.

İkinci aşamada küçük model deneyleri (KMD) içerisinde DMM ile her bir katkı maddesinin belirli oranlarına göre 30 mm çapında kolon imal edilmiştir. İmal edilen her bir kolonun kenarından itibaren belirlenen kür süreleri sonunda, drenajsız kayma mukavemeti (Cu), pH, elektriksel iletkenlik (EC) ve su muhtevası (%w) değerleri belirlenmiştir. Bu değerler sonucunda her bir kolona ait maksimum etki yarıçapları bulunmuştur.

Üçüncü aşamada büyük ölçekli silindirik tankta tekli, üçlü ve yedili kolon grupları imal edilerek deneyler yapılmıştır. Yükleme sırasında boşluk suyu basıncındaki değişimleri izlemek amacıyla silindir tankın en alt kısmına piyezometre yerleştirilmiştir. Boşluk suyu basıncı değişimi, sadece yedili kolon grubu yüklemesinde izlenmiştir. İmal edilen kolon grupları kırılıncaya kadar yüklenmiş ve elde edilen veriler kullanılarak yük- düşey deformasyon ilişkisi ile yedili kolon grubu için boşluk suyu basıncındaki değişimler belirlenmiştir.

2019, 138 sayfa

Anahtar Kelimeler: Düşük plastisiteli kil, Derin karıştırma yöntemi, Zemin iyileştirmesi, Biyopolimer, Bazik kimyasal

ABSTRACT

PhD Thesis

IMPROVEMENT OF LOW PLASTICITY CLAY SOIL USING BIOPOLYMER AND ALCALI CHEMICALS BY DEEP MIXING METHOD

Majid BAGHERINIA

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU

In this study, low plasticity clay (CL) is mixed with own liquid limit water content and prepared water saturated clay and this clay is improved by deep mixing method using sodium alginate (NaAL), sodium hydroxide (NaOH) and potassium hydroxide (KOH) additives. The experimental study consists of three stages:

In the first stage, different rates of NaAL, NaOH and KOH additives were added to the CL clay according to the dry weight of CL clay and then mixed with water in the liquid limit content of CL clay (WL = 40%). Unconfined compression strength (UCS) test was conducted on the prepared samples in different curing times. q_u -curing time-additive ratio relationship of each sample was drawn from the obtained results. The q_u values generally increased with the increase of additive ratios.

In the second stage, 30 mm diameter column carried out in small-model tests according to the specific proportions of each additive with DMM. At the end of the curing time undrained shear strength (C_u), pH, electric conductivity (EC) and water content (w%) values were determined around the manufactured columns. As a result of these values, the maximum effective radius of each column has been found.

In the third stage, single, triple and seventh column groups were made in the large scale cylindrical tank and experiments were performed. The piezometer was placed at the bottom of the cylinder tank to monitor changes in the pore water pressure during the loading process. The pore water pressure variation, was only observed in seventh column group loading process. The produced column groups (single, triple and seventh column groups) were loaded until the braking of columns. For the seventh column group in addition to the loading process the changes in the pore water pressure were determined by the load-vertical deformation relationship using the data obtained.

2019, 138 pages

Keywords: Low plasticity clay, Deep mixing method, Ground Improvement, Biopolymer, Alkali chemical

TEŞEKKÜR

Çalışmam süresince her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU 'na içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmasındaki deneyler, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda yürütülmüştür. Bu çalışma Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP, proje No: FDK-20186280) tarafından desteklenmiştir.

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

Majid BAGHERINIA

Mart 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç ve Kapsam	3
1.2. Kaynak Özetleri	4
1.2.1. Derin karıştırma yönteminde geleneksel bağlayıcı maddeler kullanılarak yapılan çalışmalar.....	4
1.2.2. Geleneksel bağlayıcı maddeler dışında DMM kullanarak / veya kullanmadan yapılan çalışmalar	8
1.2.3. Laboratuvar da derin karıştırma yöntemi ile uygulanmış büyük ölçekli model deneyler	12
2. KURAMSAL TEMELLER.....	20
2.1. Killer	20
2.1.1. Kil Minerallerinin Tanımı	20
2.1.2. Killerin farklı mineral tipleri.....	21
2.1.2.a. Kaolinit.....	22
2.1.2.b. Montmorillonit	23
2.1.2.c. İllit	24
2.1.2.d. Klorit	25
2.1.3. Killerin fiziko-kimyasal özellikleri.....	26
2.1.3.a. Elektriksel iletkenlik	26
2.1.3.b. pH.....	27
2.2. Derin Karıştırma Yöntemi	27
2.2.1. Derin karıştırma yönteminin tarihsel gelişimi ve sınıflandırılması	29

2.2.2. Ekipman ve uygulama şekli	34
2.2.2.a. Derin kuru karıştırma	34
2.2.2.b. Derin ıslak karıştırma yöntemi.....	36
2.2.3. Derin karıştırma yönteminin avantajları ve uygulaması	38
2.2.4. Derin karıştırma yönteminde kullanılan katkı maddeleri	40
2.3. Polimerler	41
2.3.1. Doğal polimerler	42
2.4. Biyopolimerler	43
2.4.1. Sodyum Aljinat (NaAL)	44
2.5. Sodyum Hidroksit, NaOH.....	46
2.6. Potasyum Hidroksit, KOH (Kostik).....	46
2.7. X – Işını Kırınımı (XRD) Analizi	46
2.8. SEM / EDX Analizleri	47
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	48
3.1. Materyal	48
3.1.1. Kıl	48
3.1.2. Musluk suyu.....	48
3.1.3. Biyopolimer	49
3.1.4. Kimyasallar	50
3.2. Yöntem.....	51
3.2.1. Birinci aşama, serbest basınç numunelerinin hazırlanışı	51
3.2.1.a. X – ışını kırınımı (XRD) analizi.....	52
3.2.1.b. Taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ve enerji dağılımlı x-ışını spektroskopisi (EDX) analizleri	52
3.2.2. İkinci aşama, derin karıştırma uygulanmış küçük model deneyleri (KMD)	54
3.2.2.a. Drenajsız kayma mukavemet (Cu) deneyi	57
3.2.2.b. pH ölçümü (Power of Hydrogen).....	57
3.2.2.c. Elektriksel iletkenlik (EC) deneyi	58
3.2.2.d. Su muhtevası deneyi	58
3.2.3. Üçüncü aşama, derin karıştırma uygulanmış büyük ölçekli model deneyler (BMD)	58

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	63
4.1. Ön deneylerin serbest basınç mukavemet (q_u) sonuçları	63
4.2. Serbest basınç mukavemet (q_u) Deney Sonuçları	64
4.2.1. X – ışını kırınımı (XRD) analiz sonuçları.....	67
4.2.2. SEM/EDX analiz sonuçları.....	73
4.3. Derin Karıştırma Uygulanmış küçük model deney (KMD) Sonuçları	77
4.3.1. Drenajsız kayma mukavemet (Cu) deney sonuçları	78
4.3.2. pH Deney Sonuçları	92
4.3.3. EC Deney Sonuçları.....	104
4.3.4. Su Muhtevası (%w) Deney Sonuçları.....	116
4.4. Derin Karıştırma Uygulanmış Büyük Model Deney (BMD) Sonuçları	128
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	131
KAYNAKLAR.....	133
ÖZGEÇMİŞ.....	139

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A°	Angstrom (1 angstrom = 1.0×10^{-10} metre)
BMD	Büyük Model Deneyleri
c	Kohezyon
CDM	Derin Islak Karıştırma
CH	Yüksek Plastisiteli Kil (CH Kili)
CL	Düşük Plastisiteli Kil (CL Kili)
CMC	Kontrol Modüllü Kolonlar (Controlled Modulus Columns)
Cu	Drenajsız Kayma Mukavemeti
C _{w, opt}	Kil Su Oranının Optimum Hali
DCM	Derin Çimento Karışımı
DJE	Kuru Jet Karıştırma (burgunun boyunda)
DJM	Kuru Jet Karıştırma
DJS	Kuru Jet Karıştırma (burgunun ucunda)
DMM	Derin Karıştırma Yöntemi
DRS	Kuru Rotary Karıştırma (burgunun ucunda)
EC	Elektrik İletkenlik
FHWA	Federal Karayolları İdaresi
qu	Serbest Basınç Mukavemeti
KDM	Küçük Model Deneyleri
KKU	Kolon Kenarından Uzaklık
pH	Hidrojen Gücü (Power of Hydrogen)
w	Su Muhtevası
W/C	Su / Çimento Oranı
WJS	Islak Jet Karıştırma (burgunun ucunda)
WL	Likit Limit
W _{opt}	Optimum Su Muhtevası
W _p	Plastik Limit
SMW	Zemin-Karıştırma Duvarları

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Turba ve kil örneklerde su-çimento oranının kayma mukavemetine etkisi (Pakbaz and Alipour 2012)	7
Şekil 1.2. Laboratuvarda model kolonlarının yapımında kullanılan ekipman (Shen et al. 2003)	13
Şekil 1.3. Kireç – çimento kolonlarının uygulama şekli (Larsson 1999)	14
Şekil 1.4. Arazide kullanılan derin karıştırma makinesi, a) makinenin bileşimi, b) karıştırma başlığının yapısı	16
Şekil 1.5. Kolonların dizilişi ve kolon kenarlarında yapılan bazı deneyler	16
Şekil 1.6. Karışımların kür süresine bağlı olarak serbest basınç mukavemetleri (Şengör 2011)	17
Şekil 1.7. Derin karıştırma yöntemi ile uygulanan MgO kolonları	18
Şekil 2.1. Kil minerallerinin temel birimi (Craig 2004)	20
Şekil 2.2. Silika tabakaları (Mitchell 1993)	20
Şekil 2.3. Alümina tabakaları (Mitchell 1993)	21
Şekil 2.4. Kaolinit yapısının şematik çizimi (Murray 2006)	22
Şekil 2.5. Kaolinit kilinin SEM görüntüsü (Murray 2006)	23
Şekil 2.6. Montmorillonit yapısının şematik çizimi (Ji et al. 2001)	24
Şekil 2.7. İllit yapısının şematik çizimi (Murray 2006)	25
Şekil 2.8. İllit kilinin SEM görüntüsü (Murray 2006)	25
Şekil 2.9. Klorit yapısının şematik çizimi (Murray 2006)	26
Şekil 2.10. Klorit kilinin SEM görüntüsü (Murray 2006)	26
Şekil 2.11. CDM'nin denizde derin karıştırma uygulamasının ıslak yöntemi, (CDM kurumu Japon, http://www.cdm-gr.com)	30
Şekil 2.12. CDM makinesi arazide derin karıştırma uygulamalarının ıslak yöntemi, (CDM kurumu Japon, http://www.cdm-gr.com)	30
Şekil 2.13. a) TRD yöntemi ile uygulanan kesme duvarı b) kesme / karıştırma aparatı (Kirsch and Bell 2012)	31
Şekil 2.14. a) Arazide derin karıştırma için kullanılan kuru yöntemi (DJM ekipmanı), b) çapı 1,0 m olan iki karıştırıcı (Kirsch and Bell 2012)	31

Şekil 2.15. Arazide zemin karışımının genel sınıflandırılması (Kirsch and Bell 2012), a) Bağlayıcı formu, b) Karıştırma prensibi, c) Karıştırma mekanizmasının bulunduğu yer.....	33
Şekil 2.16. Derin kuru karıştırma yöntemi, a) Keller/LCM ekipmanı, b) Kışın kuru karıştırma (Kirsch and Bell 2012).....	34
Şekil 2.17. a) Karıştırma cihazının şematik görüntüsü (DJM yöntemi), b) 1,0 m çapında tekli karıştırma aleti (Kirsch & Bell, 2012)	35
Şekil 2.18. Derin kuru karıştırmada kullanılan farklı karıştırıcılar (Kirsch and Bell 2012)	35
Şekil 2.19. Tekli-şaft karıştırma aleti, a) Çap 0,8 m, b) Çap 2,4 m (Kirsch and Bell, 2012)	37
Şekil 2.20. Çoklu-şaft karıştırma aleti, a) Standart CDM 2,0 m, b) CDM Land4, 4 x 1,0 m (Kirsch and Bell 2012).....	37
Şekil 2.21. Çoklu-şaft karıştırma aleti, a) SMW karıştırma kürekleri 3 x 1,5 m, d) Zemin kesme başlığı (Kirsch and Bell 2012)	38
Şekil 2.22. Tek-kolon karıştırma aletinin çiftli dönme makinesi, kolon çapı 1,8 – 2,0 m ve maksimum derinlik 23,5 m (Kirsch & Bell, 2012).....	38
Şekil 2.23. Kireç içeriğinin çeşitli zeminlerdeki etkisi (Tunç 2001)	41
Şekil 2.24. Aynı kireç içeriğindeki farklı zemin cinslerinin zamana bağlı mukavemet artışı (Tunç 2001).....	41
Şekil 2.25. Aljinat zincirlerinin şematik görüntüsü, a) (1,4) - β -D-mannuronik asit bloku, b) (1, 3) - α -L-guluronik asit bloku.....	44
Şekil 3.1. Biyopolimer (NaAL)	49
Şekil 3.2. Kimyasallar (a- NaOH, b- KOH)	50
Şekil 3.3. Kürdeki numuneler (a-ilk üç gün kalıplı b- kalıpsız)	51
Şekil 3.4. a) Numune plakasına yerleştirilen toz numune b) XRD cihazı	52
Şekil 3.5. SEM analizi a) Karbon bant üzerine konulan toz numune, b) altın ile kaplanılan toz numune yüzeyi.....	53
Şekil 3.6. SEM analiz cihazı	53
Şekil 3.7. %40 su muhtevasında CL nin kalıplara doldurulması.....	55
Şekil 3.8. Kolon imalat aşamaları	55

Şekil 3.9. a) 30 mm çapında kolonun DMM ile uygulanması, b) numunelerin plastik örtü ile kapatılması ve kür odasında bekletilmesi	56
Şekil 3.10. a) Deneylerde kullanılan model tank, b) yükleme ünitesi	59
Şekil 3.11. a) Su ve CL kilinin kalıba doldurulması, b) kil-su karışımını mekanik karıştırıcı ile karıştırılması	60
Şekil 3.12. a) Damıtık suda bekletilen poroz başlıklar, b) poroz başlıkların piyezometreye takılması, ve c) kum yastığının yerleştirilmesi	60
Şekil 3.13. a) Kum yastığı ile hazırlanan piyezometre ve kolon uygulamasında kullanılan şablon, b) piyezometrelerin yumuşak kile yerleştirilmesi ve kil yüzeyinin düzlenmesi	61
Şekil 3.14. a) Kuru halde kimyasalın zemine enjekte edilmesi, b) 3 cm borunun zemine sokulması, c) karıştırıcı ile kimyasal ve kil zemininin karıştırılması, ve d) deneyde kullanılan karıştırıcı	61
Şekil 3.15. Yumuşak kil zeminde uygulanan a) tekli, b) üçlü, ve c) yedili derin karıştırma kolonları	61
Şekil 3.16. a) Plastik örtü ile numunenin kapatılması, ve b) ortamın rutubetini ölçen higrometre	62
Şekil 3.17. Model tank deneyinde kullanılan piyezometre	62
Şekil 4.1. q_u -Kür süresi ilişkisi (katkısız CL kili)	65
Şekil 4.2. q_u -Katkı oranı-Kür süresi ilişkisi (NaAL katkılı CL)	65
Şekil 4.3. q_u -Katkı oranı-Kür süresi ilişkisi (NaOH katkılı CL)	66
Şekil 4.4. q_u -Katkı oranı-Kür süresi ilişkisi (KOH katkılı CL)	66
Şekil 4.5. Kırılma şekilleri (NaAL+CL)	68
Şekil 4.6. Kırılma şekilleri (NaOH + CL)	69
Şekil 4.7. Kırılma şekilleri (KOH + CL)	70
Şekil 4.8. XRD analizi (CL)	71
Şekil 4.9. XRD analizi (CL + %1 NaAL, 28 gün)	71
Şekil 4.10. XRD analizi (CL + %10 NaOH, 56 gün)	72
Şekil 4.11. XRD analizi (CL + %15 KOH, 28 gün)	73
Şekil 4.12. SEM analizi (a- CL b- NaAL c- CL+%1 NaAL, 28 gün- büyüklük 200 nm)	74
Şekil 4.13. EDX analizi (CL)	74

Şekil 4.14. EDX analizi (CL+%1 NaAL, 28 gün)	75
Şekil 4.15. SEM analizi (a- CL b- NaOH c- CL+%10 NaOH, 56 gün- büyüklük 2µm)	75
Şekil 4.16. EDX analizi (CL+%10 NaOH, 56 gün)	76
Şekil 4.17. SEM analizi (a- CL b- KOH c- CL+%15 KOH, 28 gün- büyüklük 2µm) ...	76
Şekil 4.18. EDX analizi (CL+%15 KOH, 28 gün)	77
Şekil 4.19. Cu-KKU ilişkisi (%0.25 NaAL)	78
Şekil 4.20. Cu-KKU ilişkisi (%0.5 NaAL)	78
Şekil 4.21. Cu-KKU ilişkisi (%0.75 NaAL)	78
Şekil 4.22. Cu-KKU ilişkisi (%1 NaAL)	79
Şekil 4.23. NaAL katkılı CL numunesine ait Cu deneyi, a) 30 mm çapında NaAL + CL kolonunun uygulanması, b) Düşen koni penetrasyon aletinde uygulanmış Cu deneyi	79
Şekil 4.24. Farklı oranlarda NaAL katkılı CL kolonlarının uygulanması, a) %0.5 oranında NaAL + CL kolonunu, b) %0.75 oranında NaAL + CL kolonunu, c) %1 oranında NaAL + CL kolonunu	79
Şekil 4.25. Cu-KKU ilişkisi (%1 NaOH)	82
Şekil 4.26. Cu-KKU ilişkisi (%3 NaOH)	82
Şekil 4.27. Cu-KKU ilişkisi (%5 NaOH)	82
Şekil 4.28. Cu-KKU ilişkisi (%7 NaOH)	83
Şekil 4.29. Cu-KKU ilişkisi (%10 NaOH)	83
Şekil 4.30. Cu-KKU ilişkisi (%15 NaOH)	83
Şekil 4.31. Cu-KKU ilişkisi (%20 NaOH)	83
Şekil 4.32. NaOH katkılı CL numunesine ait Cu deneyinin uygulanması, a) 30 mm çapında NaOH + CL kolonunun, b) Düşen koni penetrasyon aleti ile yapılmış Cu deneyi	84
Şekil 4.33. Farklı oranlarda NaOH katkılı CL kolonlarının uygulanması, a) %5 oranında NaOH + CL kolonunu, b) %15 oranında NaOH + CL kolonunu, c) %20 oranında NaOH + CL kolonunu	84
Şekil 4.34. Cu-KKU ilişkisi (%1 KOH)	87
Şekil 4.35. Cu-KKU ilişkisi (%3 KOH)	87
Şekil 4.36. Cu-KKU ilişkisi (%5 KOH)	87
Şekil 4.37. Cu-KKU ilişkisi (%7 KOH)	88

Şekil 4.38. Cu-KKU ilişkisi (%10 KOH)	88
Şekil 4.39. Cu-KKU ilişkisi (%15 KOH)	88
Şekil 4.40. Cu-KKU ilişkisi (%20 KOH)	88
Şekil 4.41. KOH katkılı CL numunesine ait Cu deneyi, a) 30 mm çapında KOH + CL kolonu, b) Düşen koni penetrasyon aleti ile yapılmış Cu deneyi.....	89
Şekil 4.42. Farklı oranlarda NaOH katkılı CL kolonlarının uygulanması, a) %5 oranında KOH + CL kolonunu, b) %15 oranında KOH + CL kolonunu, c) %20 oranında KOH + CL kolonunu	89
Şekil 4.43. pH-KKU ilişkisi (%0.25 NaAL).....	92
Şekil 4.44. pH-KKU ilişkisi (%0.5 NaAL).....	92
Şekil 4.45. pH-KKU ilişkisi (%0.75 NaAL).....	93
Şekil 4.46. pH-KKU ilişkisi (%1 NaAL).....	93
Şekil 4.47. pH-KKU ilişkisi (%1 NaOH)	96
Şekil 4.48. pH-KKU ilişkisi (%3 NaOH)	96
Şekil 4.49. pH-KKU ilişkisi (%5 NaOH)	96
Şekil 4.50. pH-KKU ilişkisi (%7 NaOH)	97
Şekil 4.51. pH-KKU ilişkisi (%10 NaOH)	97
Şekil 4.52. pH-KKU ilişkisi (%15 NaOH)	97
Şekil 4.53. pH-KKU ilişkisi (%20 NaOH)	98
Şekil 4.54. pH-KKU ilişkisi (%1 KOH)	100
Şekil 4.55. pH-KKU ilişkisi (%3 KOH)	100
Şekil 4.56. pH-KKU ilişkisi (%5 KOH)	100
Şekil 4.57. pH-KKU ilişkisi (%7 KOH)	101
Şekil 4.58. pH-KKU ilişkisi (%10 KOH)	101
Şekil 4.59. pH-KKU ilişkisi (%15 KOH)	101
Şekil 4.60. pH-KKU ilişkisi (%20 KOH)	102
Şekil 4.61. EC-KKU ilişkisi (%0.25 NaAL).....	104
Şekil 4.62. EC-KKU ilişkisi (%0.5 NaAL).....	104
Şekil 4.63. EC-KKU ilişkisi (%0.75 NaAL).....	105
Şekil 4.64. EC-KKU ilişkisi (%1 NaAL).....	105
Şekil 4.65. EC-KKU ilişkisi (%1 NaOH)	108
Şekil 4.66. EC-KKU ilişkisi (%3 NaOH)	108

Şekil 4.67. EC-KKU ilişkisi (%5 NaOH)	108
Şekil 4.68. EC-KKU ilişkisi (%7 NaOH)	109
Şekil 4.69. EC-KKU ilişkisi (%10 NaOH)	109
Şekil 4.70. EC-KKU ilişkisi (%15 NaOH)	109
Şekil 4.71. EC-KKU ilişkisi (%20 NaOH)	110
Şekil 4.72. EC-KKU ilişkisi (%1 KOH)	112
Şekil 4.73. EC-KKU ilişkisi (%3 KOH)	112
Şekil 4.74. EC-KKU ilişkisi (%5 KOH)	112
Şekil 4.75. EC-KKU ilişkisi (%7 KOH)	113
Şekil 4.76. EC-KKU ilişkisi (%10 KOH)	113
Şekil 4.77. EC-KKU ilişkisi (%15 KOH)	113
Şekil 4.78. EC-KKU ilişkisi (%20 KOH)	114
Şekil 4.79. w-KKU ilişkisi (%0.25 NaAL)	116
Şekil 4.80. w-KKU ilişkisi (%0.5 NaAL)	117
Şekil 4.81. w-KKU ilişkisi (%0.75 NaAL)	117
Şekil 4.82. w-KKU ilişkisi (%1 NaAL)	117
Şekil 4.83. w-KKU ilişkisi (%1 NaOH)	120
Şekil 4.84. w-KKU ilişkisi (%3 NaOH)	120
Şekil 4.85. w-KKU ilişkisi (%5 NaOH)	120
Şekil 4.86. w-KKU ilişkisi (%7 NaOH)	121
Şekil 4.87. w-KKU ilişkisi (%10 NaOH)	121
Şekil 4.88. w-KKU ilişkisi (%15 NaOH)	121
Şekil 4.89. w-KKU ilişkisi (%20 NaOH)	122
Şekil 4.90. w-KKU ilişkisi (%1 KOH)	124
Şekil 4.91. w-KKU ilişkisi (%3 KOH)	124
Şekil 4.92. w-KKU ilişkisi (%5 KOH)	124
Şekil 4.93. w-KKU ilişkisi (%7 KOH)	125
Şekil 4.94. w-KKU ilişkisi (%10 KOH)	125
Şekil 4.95. w-KKU ilişkisi (%15 KOH)	125
Şekil 4.96. w-KKU ilişkisi (%20 KOH)	126
Şekil 4.97. Yük-düşey deformasyon ilişkisi	128
Şekil 4.98. Boşluk suyu basıncı değişimi-zaman ilişkisi (200 mm derinlik)	129

Şekil 4.99. Yükleme görüntüleri (a- Model tank, b- Tekli kolon yüklemesi, c- Üçlü kolon yüklemesi, d- Yedili kolon kolon yüklemesi).....130



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmiş zeminin mühendislik özellikleri	5
Çizelge 2.1. Killerin bazı mineral özellikleri (Önalp 1983)	21
Çizelge 2.2. Bazı kil minerallerinin sınıflandırılması (Konta 1995)	21
Çizelge 2.3. Derin kuru karıştırma yöntemlerinin, karıştırma koşulları (Kirsch and Bell 2012)	36
Çizelge 2.4. Arazide ıslak derin karıştırma yönteminin karıştırma koşulları (Kirsch & Bell, 2012)	39
Çizelge 2.5. Biyopolimerler ve fonksiyonları (Etemadi <i>et al.</i> 2003)	44
Çizelge 3.1. Kile (CL) ait bazı özellikler	48
Çizelge 3.2. Musluk suyu analiz sonuçları	49
Çizelge 3.3. Sodyum aljinata ait kimyasal özellikler	49
Çizelge 3.4. Sodyum hidroksite ait kimyasal özellikler	50
Çizelge 3.5. Potasyum hidroksite ait kimyasal özellikler	50
Çizelge 3.6. KMD numunelere ait deney programı	56
Çizelge 3.7. Piyezometreye ait özellikler	62
Çizelge 4.1. Ön deneylerin q_u sonucu	63
Çizelge 4.2. Biyopolimer ve kimyasal katkılı CL'nin UCS deney sonuçları	64
Çizelge 4.3. EDX elementel analiz sonuçları (CL+%1 NaAL, 28 gün)	75
Çizelge 4.4. EDX elementel analiz sonuçları (CL+%10 NaOH, 56 gün)	76
Çizelge 4.5. EDX elementel analiz sonuçları (CL+%15 KOH, 28 gün)	77
Çizelge 4.6. NaAL ile oluşturulan kolonların farklı KCU larda Cu değeri	81
Çizelge 4.7. NaOH ile oluşturulan kolonların farklı KCU larda Cu değeri	86
Çizelge 4.8. KOH ile oluşturulan kolonların farklı KCU larda Cu değeri	91
Çizelge 4.9. NaAL ile oluşturulan kolonların farklı KCU larda pH değeri	95
Çizelge 4.10. NaOH ile oluşturulan kolonların farklı KCU larda pH değeri	99
Çizelge 4.11. KOH ile oluşturulan kolonların farklı KCU larda pH değeri	103
Çizelge 4.12. NaAL ile oluşturulan kolonların farklı KCU larda EC değeri	107
Çizelge 4.13. NaOH ile oluşturulan kolonların farklı KCU larda EC değeri	111
Çizelge 4.14. KOH ile oluşturulan kolonların farklı KCU larda EC değeri	115

Çizelge 4.15. NaAL ile oluşturulan kolonların farklı K KU larda w değeri.....	119
Çizelge 4.16. NaOH ile oluşturulan kolonların farklı K KU larda w değeri	123
Çizelge 4.17. KOH ile oluşturulan kolonların farklı K KU larda w değeri	127



1. GİRİŞ

Derin karıştırma yöntemi (DMM) 1950 yılında Intrusion-Prepakt Inc. tarafından yerinde karıştırma kazık (MIP) yönteminin geliştirmesiyle ortaya çıkmıştır (FHWA 2000). Japonya ve İskandinav ülkelerinde, son elli yıldan beri derin karıştırma ile ilgili geniş ölçekli araştırmalar ve uygulamalar yapmışlardır. Örnek olarak İsviçre’de yumuşak kil zeminlerin iyileştirilmesinde kireç kolonları uygulanmıştır. Son yıllarda ABD’de altyapı, sismik problemlerin çözümü ve çevresel iyileştirilmede derin karıştırma yöntemi kullanılmaktadır (Bruce *et al.* 1998, Bruce and Bruce 2003).

Derin karıştırma yöntemi arazide özel ekipmanlar vasıtasıyla, katkı maddesinin içi boş burgu ile zemine enjekte edilerek karıştırıcılar yardımıyla karıştırılmasını kapsamaktadır (Taki and Yang 1991). Derin karıştırma yöntemi çoğunlukla şevlerin stabilitesinde, dolgu desteklerinde, hidrolik kesme duvarlarında, kazı destek duvarlarında, çevresel iyileştirmede, yerinde güçlendirme ve büyük hacimli zemin iyileştirmesinde kullanılmaktadır (Terashi and Kitazume 2009, 2011).

Derin karıştırma yönteminde bağlayıcı katkı maddesi olarak kireç ve çimento sıkça kullanılmaktadır. Bu bağlayıcı katkı maddeleri Hartlen and Holm 1995; Ahnberg 1996; Porbaha *et al.* 1998, 2000; Jacobson 2002; Andromalos and Bahner 2004; Lorenzo and Bergado 2004, 2006; Şengör 2011, Dias *et al.* 2012 gibi birçok araştırmacının çalışmalarına konu olmuştur. Yapılan çalışmalarda bağlayıcı madde oranının ve kür süresinin artmasıyla q_u değerinin arttığı belirtilmiştir. Bergado ve Lorenzo (2005)’te yaptıkları çalışmada Bangkok kiline %10-%15 arasında kilin kuru ağırlığına göre çimento ilave edildiğinde q_u değerinin 0,3-1,0 MPa arasında olduğunu belirtmişlerdir.

Arazi ve laboratuvar ortamlarında yapılan çalışmalarda yumuşak kil zeminlerde uygulanan derin kireç-çimento kolonlarının çevresinde geçiş bölgesinin olduğu ve bu bölgede zamana bağlı olarak su muhtevasının ve likitlik indisinin azaldığı, katyon konsantrasyonu, plastik limit (PL), pH, EC ve Cu’nun arttığı belirtilmiştir (Zhang and Xu 1996; Shen *et al.* 2003a; Shen *et al.* 2003b, Shen *et al.* 2008). Benzer şekilde larsson *et al.* (2009) yaptıkları laboratuvar çalışmasında yumuşak kil zeminde derin karıştırma

yöntemi ile uygulanan kireç-çimento kolonlarından Ca^{2+} , Na^+ ve K^+ iyonlarının çevredeki zemine hareket ettikleri ifade edilmiştir. Ayrıca Ca^{2+} , Na^+ ve K^+ iyonlarının yumuşak zemine hareket etmesi sonucunda zeminin drenajsız kayma mukavemetinin (Cu) yüksek derecede etkilendiği de vurgulanmıştır. Zhu (2016) ve Shen *et al.* (2005), laboratuvarda derin karıştırma kolonlarının çevresinde bulunan yumuşak kil zemin tiksotropi, kırılma, çimento penetrasyonu ve difüzyonu, konsolidasyon ve sıcaklık gibi bazı özelliklerinde değişimlerin meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmada, likit limit su muhtevasında düşük plastisiteli kilin (CL), biyopolimer (sodyum aljinat, NaAL) ve iki farklı kimyasal (sodyum hidroksit, NaOH ve potasyum hidroksit, KOH) kullanılarak derin karıştırma yöntemiyle iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaca ulaşabilmek için tez çalışması üç aşamada planlanmıştır.

Birinci aşamasında CL kiline toplam kuru ağırlığın farklı oranlarında NaAL (%0,25, %0,5, %0,75 ve %1), NaOH (%1, %3, %5, %7, %10, %15 ve %20) ve KOH (%1, %3, %5, %7, %10, %15 ve %20) katkı maddeler ilave edilerek CL kilinin likit limit miktarında (WL= %40) su ile karıştırılmıştır. Hazırlanan karışımlar 38 mm çapında ve 76 mm yüksekliğindeki silindirik kalıplara dökülmüş ve 7, 14, 28, 56 ve 112 gün uygun kür şartlarında (%90 nem, 20 ± 3 °C) bekletildikten sonra numunelerin serbest basınç mukavemetleri (q_u) belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan her bir numuneye ait q_u -kür süresi-katkı oranı ilişkileri çizilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında 100 mm çapında ve 110 mm yüksekliğinde silindirik kalıpların içerisine likit limit kıvamında hazırlanan CL kili yerleştirilmiştir. İçerisinde kil bulunan silindir kalıbın merkezinde derin karıştırma yöntemiyle (DMM) her bir katkı maddesinin belirtilen oranları için ayrı ayrı 30 mm çapında kolon imal edilmiştir. İmal edilen her bir kolonun kenarından itibaren belirtilen kür süreleri sonunda, drenajsız kayma mukavemeti (Cu), pH, elektriksel iletkenlik (EC) ve su muhtevası (%w) değerleri belirlenmiştir. Bu değerler sonucunda her bir kolona ait maksimum etki yarıçapları bulunmuştur.

Çalışmanın üçüncü aşamasında 1000 mm çapında ve 400 mm yüksekliğinde büyük ölçekli silindirik tankta deneyler yapılmıştır. Büyük ölçekli tank içerisinde ikinci aşamadan tercih edilen %20 NaOH için tekli, üçlü ve yedili kolon sistemi yapılmıştır. Bu deneylerde tüm kolon grupları için yük-düşey deformasyon ilişkisi ve yedili kolon grubu için boşluk suyu basıncındaki değişimler belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, boşluk suyu basıncının yedili kolonlarda yükleme sırasında arttığı görülmüştür.

1.1. Amaç ve Kapsam

Doktora tez çalışmada, suya doymuş kil zeminlerin iyileştirilmesinde NaAL biyopolimeri ile NaOH ve KOH kimyasal katkılarının kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla;

- Tez çalışmasında kullanılan CL kiline toplam kuru ağırlığının %0,25, %0,5, %0,75 ve %1 oranlarında NaAL, %1, %3, %5, %7, %10, %15 ve %20 oranlarında NaOH ve %1, %3, %5, %7, %10, %15 ve %20 oranlarında KOH ilave edilerek CL kilinin likit limit miktarında (WL= %40) su ile karıştırılmıştır. Elde edilen karışımdan hazırlanan numunelerin q_u değerleri üzerinde kür süresinin ve katkı oranlarının etkileri araştırılmıştır. Maksimum q_u değerleri veren numunelerde taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü ve X-ışını kırınım analizleri yapılmıştır.
- Küçük model deneylerinde (100 mm çapında ve 110 mm yüksekliğindeki silindirik kalıplarda yapılan deneyler) NaAL, NaOH ve KOH'ın belirlenen her bir oranı ile likit limit kıvamında hazırlanan CL kilinde 30 mm çapında tek kolon imal edilmiştir. Kolonların etki yarıçaplarını belirlemek için kolon kenarından itibaren Cu (drenajsız kayma mukavemeti), pH (Power of Hydrogen), EC (Elektrik iletkenliği) ve w (su muhtevası) değerleri uygun deneylerle elde edilmiştir.
- Büyük tank model deneyinde (1000 mm çapında ve 200 mm yüksekliğinde silindirik tankta yapılan deneyler) küçük model deneylerinde en iyi sonuçları veren %20 NaOH seçilmiş ve bu katkı maddesi ile tekli, üçlü ve yedili kolon grupları imal edilmiştir. İmal edilen kolon gruplarının yük-düşey deformasyon grafikleri ve deney süresince boşluk suyu basıncının değişimi incelenmiştir.

1.2. Kaynak Özetleri

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde zeminlerin bazı mühendislik özelliklerini iyileştirmek amacıyla derin karıştırma yöntemlerinde hem kireç, çimento, uçucu kül vb. geleneksel katkı maddeler hem de geleneksel olmayan bazı katkı maddeleri ile ilgili araştırmacılar tarafından birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmalar laboratuvar ve arazide kil, silt, kum ve organik zeminler üzerinde uygulanmıştır. Ancak literatürde yumuşak kil-kimyasal / biyopolimer karışımlarının derin karıştırma metodunda kullanımının sınırlı sayıda olduğu belirlenmiştir. Bu bölümde araştırma konusu ile ilgili çalışmalar üç başlık halinde incelenmiş ve çalışmalar özetlenerek sonuçları verilmiştir.

1.2.1. Derin karıştırma yönteminde geleneksel bağlayıcı maddeler kullanılarak yapılan çalışmalar

Bruce *et al.* (1998) ve Bruce and Bruce (2003) çalışmalarında, derin karıştırma yönteminde kullanılan ekipmanları, uygulama metotları ve bu yöntemin tarihi gelişimini özetlemişlerdir. Derin karıştırma yönteminde kullanılan bağlayıcı maddelerin özelliklerini, zemin türü (özellikle kil zeminler) ve kür süresini zeminlerin dayanımını artıran önemli faktörler olarak belirtmişlerdir. Derin karıştırma yöntemiyle iyileştirilmiş zeminin mühendislik özelliklerini Çizelge 1,1’de vermişlerdir.

Siva (2005) laboratuvar çalışmasında orta ve yüksek plastisiteli killeri üzerinde şişme ve büzülme deneyleri yaparak bu tür zeminlerin, derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmelerini önermişlerdir. Çalışmada çimento ve kireç kullanılmıştır (100-0 ile 0-100 kg/m³ ve 100 ile 200 kg/m³). Kürde bekletilen 7 ve 14 günlük numuneler üzerinde serbest basınç mukavemeti, şişme, büzülme ve emme deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre en etkili su/çimento oranları (w/c) 0,8 ve 1,3 olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 1.1. Derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmiş zeminin mühendislik özellikleri

UCS	0,2-5 MPa (granüler zeminde 0,5-5 MPa) (kohezyonlu zeminde(c) 0,2-2MPa)
K	10^{-6} - 10^{-9} m/s (bentonit kullanıldığında bu değer düşük olur)
E	Laboratuvar numuneleri için serbest basınç deneyi 350 ile 1000 kat Arazi numuneleri için serbest basınç deneyi 150 ile 500 kat.
Kayma mukavemeti	Serbest basınç mukavemetinin %40-%50'si kadar eğer UCS < 1MPa,
Çekme mukavemeti	Genellikle serbest basınç mukavemetinin %8-%14'si kadar
28 günlük serbest basınç mukavemeti	Siltler ve killer için 7 günlük dayanımın 1,4 ile 1.5 kat ve kumlar için 7 günlük dayanımın 2 kat.
60 günlük serbest basınç mukavemeti	28 günlük serbest basınç mukavemetinin 1,5 kat,

Bergado and Lorenzo (2005) yaptıkları çalışmada, derin karıştırma yöntemini kullanarak çimento ve kil zemininin etkili karışımını (ekonomik) ve kil-su karışımının optimum (C_w , opt) miktarını, serbest basınç mukavemet deneyi ve ödometre deneyi yaparak belirlemişlerdir. Çalışmada kil-su oranının optimum karışımı, kilin likit limitine yakın olduğu kanaatine varmışlardır. Çimento oranı ağırlık olarak kil-su oranının optimum karışımında %10 geleneksel yöntemde ise bu değer %17 olduğu ifade edilmiştir. Sonuç olarak çimentonun maliyetinin optimum karışım yöntemiyle %40 azaldığını vurgulamışlardır.

Ahnberg (2006) yaptığı doktora tez çalışmasında, laboratuvar ortamında yumuşak zeminlerin (kil ve organik zeminler) derin karıştırma yöntemiyle iyileştirilmesini araştırmıştır. Deneysel çalışmada kireç, çimento, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkı maddeleri olarak farklı oranlarda tek başına veya birbiriyle karıştırılarak kullanılmıştır. Bağlayıcı maddeler zemin ağırlığına göre 50-200 kg/m³, 70-150 kg/m³ ve 100-300 kg/m³ kullanılmıştır. Numuneler hazırlandıktan sonra 1-730 gün arasında kür odasına bekletilmiştir. Çalışmada genel olarak numunelerin çoğu 28 günlük kür süresi sonrası deneylere tabi tutulmuştur.

Çalışmada mukavemet özelliklerin belirlenmesinde serbest basınç mukavemeti ve üç eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Bunun yanında su muhtevası, birim hacim ağırlık, doygunluk derecesi, kompaksiyon ve permeabilite deneyleri de yapılmıştır. Ayrıca farklı bağlayıcıların kür süresinin değişimine etkisi incelenmiştir.

Deney sonuçlarına göre, katkı maddesi kuru halde kullanılırken su muhtevası azalmış, doygunluk derecesi ve geçirimsizliğin kür süresinin artmasıyla azaldığı görülmüştür. Yoğunluk, serbest basınç mukavemeti ve üç eksenli basınçlarından ise artış olmuştur. Bazı numunelerin dayanımının azaldığı ifade edilmiştir.

Lorenzo and Bergado (2006) yaptıkları çalışmada su muhtevası yüksek olan kil zeminlerin derin karıştırma yöntemini kullanarak, katkı maddeleri kireç ve çimentonun kil zemininin mukavemetini ve sıkışabilirliğini nasıl etkilendiğini araştırmışlardır. Deney sonuçlarından, çimento miktarı ve kil-su-çimento karışımındaki kil içeriğinin mukavemet ve sıkışabilirlik üzerinde önemli derecede etkili oldukları belirlenmiştir. Yine sonuçlara göre, drenajsız konsolide ve serbest basınç deneylerinden, kil-su içeriği, boşluk oranı, kür süresi ve çimento içeriği numunelerin mukavemetinde etkili oldukları ifade edilmiştir.

Lewsley (2008) yaptığı çalışmada kesici derin karıştırma yöntemi (cutter soil mixing) ile iyileştirilmiş zemin numunelerine; kum-silt oranı, çimento içeriği, su muhtevası ve kür süresinin etkisi serbest basınç mukavemeti deneyleri ile araştırmıştır. Toplam su-çimento oranının azalmasıyla, dayanımın doğrusal olmayan bir şekilde arttığı ve kum-silt oranından bağımsız olduğu sonucuna varılmıştır.

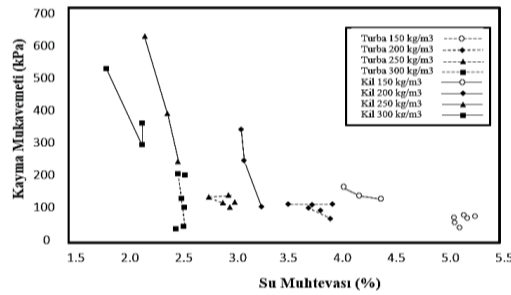
Madhyannapu *et al.* (2010) çalışmalarında, derin karıştırmadan hemen sonra ve yapım süresinde kalite yönetimi programı kullanarak sonuçlar ve süreç üzerinde araştırma yapmışlardır. Kalite yönetimi programı laboratuvar, arazide ve mineralojik testlerden iyileştirme etkisini gidermek için yapım süresinde ve sonrasında olmaktadır. Arazi çalışmalarında sismik kuyuları ve yüzey dalga spektral analiz metodu iyileştirme derecesini elde etmek için uygulanmıştır. Arazi numuneleri üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri sonucunda, mukavemet ve rijitlik açısından laboratuvarda hazırlanan

numunelerden %20 ile %40 daha düşük sonuçlar elde edilmiştir. Yüzey dalga spektral analiz metodu deneyleri ve sismik kuyuları sonucunda yapılan derin karıştırma kolonlarının rijitliğinde önemli derecede iyileşme olduğu belirlenmiştir.

Tang *et al.* (2011), derin çimento karıştırma yöntemini turba ve organik zeminlerin bazı geoteknik özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanmışlardır. Çimento katkı maddesi olarak kuru halde zemine ilave edilmiştir. Su-çimento (w/c) oranları organik zemin için 5 kg/m^3 , 10 kg/m^3 ve 30 kg/m^3 ve turba zemin için $3,5 \text{ kg/m}^3$, 7 kg/m^3 , 14 kg/m^3 ve 140 kg/m^3 olarak kullanılmıştır. Numuneler PVC kalıplara dökülerek 7, 14 ve 28 günlük kür odasında 25°C sıcaklıkta bekletilmiş ve serbest basınç mukavemetleri bulunmuştur. Deney sonuçlarına göre, turba zemininin q_u değeri 28 günlük numune için ortalama 90 kPa ve organik zemin için 93 kPa olarak elde edildiği ifade edilmiştir.

Pye *et al.* (2012), derin kuru karıştırma yöntemini laboratuvar ve arazide turba ve kil zemini üzerinde uygulayarak sonuçlar her iki duruma göre karşılaştırılmıştır. Su-çimento oranı ve karıştırma enerjisi önemli faktörler olduğu belirlenmiştir. Ayrıca su-çimento oranının azalmasıyla drenajsız kayma mukavemetinin azaldığı ifade edilmiştir.

Pakbaz and Alipour (2012) çalışmalarında kil-çimento karışımının geoteknik özelliklerini derin karıştırma yöntemi kullanarak araştırmışlardır. Numunelerin hazırlanmasında çimento kilin kuru ağırlığına göre %4, %6, %8 ve %10 oranlarda ve su muhtevası %30, %48 ve %70 olarak 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri için uygulanmıştır. Deney sonuçlarından çimento oranının artması ve su muhtevasının azalmasıyla kil zemininin mukavemetinin arttığı belirtilmiştir. Aynı zamanda ön konsolidasyon basıncı ve sıkışma indisi çimento miktarının artmasıyla arttığı ifade edilmiştir.



Şekil 1.1. Turba ve kil örneklerde su-çimento oranının kayma mukavemetine etkisi (Pakbaz and Alipour 2012)

1.2.2. Geleneksel bağlayıcı maddeler dışında DMM kullanarak / veya kullanmadan yapılan çalışmalar

Lin *et al.* (2007), yaptıkları çalışmada yumuşak kohezyonlu zeminlerin iyileştirilmesinde atık çamur külü (sewage sludge ash) ve uçucu kül kullanılmıştır. Numuneler üzerinde pH, kompaksiyon, California Bearing Ratio, serbest basınç mukavemeti ve üç eksenli basınç deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre atık çamur külü ile hazırlanan numunelerinin pH'sı kür süresinin artmasıyla artmıştır. Atık çamur külü / zemin numunesinin q_u değeri, iyileştirilmemiş zemine göre 1,4-2 kat daha fazla dayanım aldığı gözlenmiştir. Ancak atık çamur külü /zemin basınç dayanımı uçucu kül/zemin dayanımından 20-30 kPa daha az olmuştur. Taşıma gücü ise her iki karışımda da iyileştirilmemiş duruma göre 5-6 kat fazla olmuştur. Sonuç olarak yumuşak kohezyonlu zeminlerin iyileştirilmesinde atık çamur külünün uçucu kül yerine kullanılması önerilmiştir.

Kazemian *et al.* (2010) yaptıkları çalışmada kimyasal enjeksiyon yöntemini yumuşak zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla incelemişlerdir. Buna göre farklı kimyasallar olarak; N-metilolakrilamid, sodyum silikat, poliüretan epoksi reçineleri, akrilamid, fenoplastlar, aminoplastlar ve lignosülfonatlar hakkında bilgi vermişlerdir. Aynı zamanda kimyasal enjeksiyon maddelerinin arasındaki farkı ve arazide kullanımları hakkında bilgi vermişlerdir.

Olaniyan *et al* (2011), yaptıkları çalışmada kaolinit zemininin stabilizasyonunda sodyum hidroksiti katkı maddesi olarak kullanmışlardır. Deneysel çalışmada kaolin kilinin kohezyonunun ve maliyetin azaltılması için kum zemini dolgu maddesi olarak %50, %150 ve %200 oranlarında kullanılmıştır. Sodyum hidroksit ise dört farklı oranda %7, %10, %13, %16 kullanmışlardır. Numuneler kuru, ıslak ve döngüsel olarak üç tipte hazırlanmış ve üzerlerinde basınç dayanımı, ıslak şartlar altında dayanıklılık, su emme ve açık porozite deneyleri uygulanmıştır. Sonuçlardan anlaşıldığı gibi 100:50 kil zemini-kum oranı basınç dayanımı açısından en iyi sonucu vermiştir. %13 oranında sodyum hidroksit, basınç dayanımının optimum değerini vermiştir. Ayrıca %13 sodyum hidroksit oranına kadar yoğunluğun arttığı ancak bu değerden sonra yoğunluğun azaldığı

belirlenmiştir. Döngüsel numunelerin dayanımı ıslak numunelere göre daha fazla olduğu ifade edilmiştir.

Sukontasukkul and Jamsawang (2012) çalışmalarında polipropilen ve çelik lif kullanarak derin çimento karıştırma yöntemi ile hazırlanan numunelerin eğilme performansını araştırmışlardır. Deneylerde çimento (%10-%20), çelik ve polipropilen lifleri (%0.5, %0.75 ve %1.0) kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre polipropilen ve çelik lif kullanılarak elde edilen numunelerin eğilme performansının olumlu yönde değiştiği gözlenmiştir.

Bagherinia (2013) yaptığı yüksek lisans tezinde farklı oranlarda polimer kullanarak düşük plastisiteli (CL) ve yüksek plastisiteli (CH) kil zemini üzerinde iyileştirme yapmıştır. Deneylerde derin karıştırma yöntemi uygulanmış numunelerin üzerinde serbest basınç mukavemet deneyi ve donma-çözünme deneyi yapılmıştır. Deney sonuçlarından doymamış polyester ve biyopolimerler düşük plastisiteli kilinin dayanımını artırdığı ancak yüksek plastisiteli kilin dayanımında etkisi olmadığı gözlenmiştir. Serbest basınç mukavemet deneyinden elde edilen en yüksek dayanım, 28 günlük %0.02 guar gum, %3 kireç ve %20 doymamış polyester içeren CL kili numunesinde 8 MPa olarak elde edilmiştir.

Cristelo et al. (2013), yaptıkları çalışmada sodyum bazlı alkalin aktivatörlerin (AA) ve F tipi uçucu külün etkisini, yumuşak zeminlerin stabilizasyonunda araştırmışlardır. Hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç mukavemet (q_u) deneyi yapılmış, sonuçlar çimento bazlı numuneler ile karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda aktivatör / kül oranı, sodyum oksit / kül oranı ve sodyum hidroksit konsantrasyonu incelenmiştir. Sodyum hidroksit konsantrasyonu 10, 12,5 ve 15 molal ve aktivatör / kül oranı ise %1 ve %2,5 ve kül oranı %20, %30 ve %40 (zemin + kül, toplam ağırlık) olarak kullanılmıştır. q_u deneyleri 7, 28, 90 ve 365 günlük kür süresine tabi tutulan numuneler üzerinde uygulanmış ve en etkili karışım üzerinde XRD analizi gerçekleştirilmiştir. Aktivatör / kül oranının düşürülmesiyle numunelerin dayanımında belirgin bir artış meydana gelmiştir. 28 günlük AA ve çimento numunelerin q_u değeri hemen hemen aynı olmuştur. Bununla birlikte, AA sonuçlarının, 365 günlük numunede elde edilen maksimum q_u 'nun sadece %

20 ile % 40'ı arasında olduğunu, çimento ile hazırlanan numunelerin sonuçlarına göre 28 gün sonra maksimum q_u değeri % 80 ile % 90'ı arasında olduğu kanıtlanmıştır.

Nazir et al. (2013) yaptıkları çalışmada soda külünün (Na_2CO_3) kullanarak, kırmızı killerin pH'sı ve kompaksiyon özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Numunelerin hazırlanmasında soda külü+kırmızı kil yüzdeleri sırasıyla; %0-%100, 5-95, 10-90, 15-85 ve 20-80 kullanılmıştır. Sonuçlara göre %0, 5, 10, 15 ve 20 katkı oranlarında maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevası sırasıyla; 1,23-18,20, 1,30-19,67, 1,33-20,01, 1,27-22 ve 1,18 Mg/m³ – %22,87 olmuştur.

Sargent et al. (2013), yaptıkları çalışmada derin karıştırma yöntemini ele alarak yumuşak zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesini araştırmışlardır. Deneysel çalışmada siltli kum zeminine bağlayıcı madde olarak yüksek fırın cürufu ve sodyum hidroksit ilave ederek hazırlanan numunelerin dayanımını ve durabilitesini, iyileştirilmemiş numuneler ile karşılaştırmışlardır. Deney sonuçlarına göre, zemin stabilizasyonunda kullanılan yüksek fırın cürufu ve sodyum hidroksitin zeminin dayanımını ve durabilitesini önemli derecede arttığı görülmüştür. Sodyum hidroksitin bağlayıcı madde olarak kullanılmasının puzolanik reaksiyonlara neden olduğunu ve mekanik özelliklerinin iyileşmesinin (öncelikle dayanım) kür süresinin artması ile arttığını söylemişlerdir. Numunelerin durabilitesi yüksek fırın cürufu kullanarak iyileştiği izlenirken, sodyum hidroksit ile hazırlanan numunelerde önemli derecede etkisi olmadığı kanıtlanmıştır.

Wu et al. (2013), yumuşak kil zemininin iyileştirilmesinde kimyasal-fiziksel yöntemini laboratuvar ortamında kullanmışlardır. Kimyasal stabilizasyon su muhtevası az olan ($W < 2LL$; WL =likit limit) ve su muhtevası yüksek olan ($W \geq 2 \sim 6WL$) kil zemini üzerinde yapılmıştır. Farklı oranlarda (%4, %6 ve %8) kimyasal (SS-311E & H) ve çimento kilin kuru ağırlığına göre ilave edilmiştir. Numuneler 7, 14, 21 ve 28 günlük kür sürelerinde bekledikten sonra, kür süresinin ve su muhtevasının drenajsız kayma mukavemetine (C_u) etkisi araştırılmıştır. Drenajsız kayma mukavemetinin belirlenmesinde düşen koni penetrasyon aleti kullanılmıştır. Deney sonuçlarından belli olduğu gibi her iki grup kilde katkı maddesinin artması ile drenajsız kayma mukavemeti (C_u) de artmıştır. C_u değeri su muhtevasının artmasıyla azaldığı belirlenmiştir.

Yadu and Tripathi (2013) çalışmalarında, öğütülmüş yüksek fırın cürufunu (GBS) katkı maddesi olarak yumuşak zeminlerin iyileştirilmesinde kullanmışlardır. Yumuşak zemin (CI-MI) GBS ile farklı oranlarda (%3, %6, %9 ve %12) karıştırılmış ve hazırlanan numuneler üzerinde plastisite indeksi, özgül ağırlık, serbest şişme endeksi, kompaksiyon, şişme basıncı, California Bearing Ratio (CBR) ve serbest basınç mukavemet (UCS) deneyi yapılmıştır. GBS'in optimum miktarı CBR ve UCS deneylerine göre %9 olmuştur. Deney sonuçlarına göre, yumuşak zeminin dayanımı GBS kullanılmasıyla artmıştır. Numunelerin CBR ve q_u değerleri iyileştirilmemiş numunelere göre sırasıyla %400 ve %28 olarak arttığı belirlenmiştir.

Yi *et al.* (2013), çalışmalarında öğütülmüş yüksek fırın cürufu (GBS) ve reaktif magnezyumun (MgO), zemin stabilizasyonun'da kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar GBS-kireç ve çimento ile karşılaştırılmıştır. Deneylerde killi silt ve killi siltli kum olmak üzere iki farklı zemin kullanılmıştır. Numuneler, derin karıştırma yöntemine uygun olarak hazırlanmıştır. Numuneler 7, 28 ve 90 günlük kür odasında $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta ve 95 ± 3 nemde bekletildikten sonra, üzerlerinde serbest basınç mukavemeti (UCS), permeabilite, XRD ve SEM deneyleri uygulanmıştır. Sonuçlara göre, reaktif MgO, kireç ile karşılaştırıldığında yüksek oranda reaksiyona girerek stabilize edilmiş zeminlerin erken yaşlarda fazla dayanım aldıklarını göstermişlerdir. Ancak kür süresinin artmasıyla reaktif MgO ve kirecin dayanımları hemen hemen aynı olduğu belirlenmiştir. 28 günlük UCS deney sonucuna göre GBS: MgO'nun optimum miktarına göre (19:1–4:1) çimento ile hazırlanan numuneye göre yaklaşık 1,3–4 kat fazla dayanım göstermiştir.

Oluyemi-Ayibiowu and Ola (2015), yaptıkları çalışmada sodyum silikat kullanılarak şişme ve büzülme potansiyeline sahip killer (Black Cotton Soil) üzerinde iyileştirme yapmışlardır. Buna göre sodyum silikat farklı oranlarda (%2, %4, %6, %8 ve %10) kil zemine ilave edilerek numuneler hazırlanmıştır. Atterberg limitleri, tane büyüklüğü dağılımı, sıkışma ve California Bearing Ratio (CBR) deneyleri hem doğal zemin üzerinde hemde iyileştirilmiş zemin üzerinde yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre zeminin plastisite indisleri kompaksiyon özelliklerinin iyileşmesiyle önemli derecede azaldığı

gözlenmiştir. CBR değerleri ise %88 ile %95 arasında arttığı ve iyileştirilmiş zeminin dayanımı doğal zemine göre %214 arttığı belirlenmiştir.

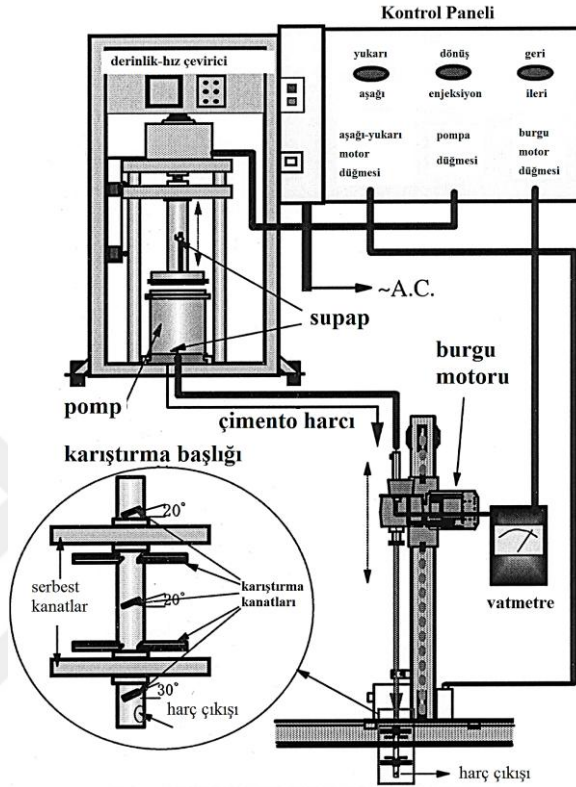
Miao *et al.* (2017), çalışmalarında şişme potansiyeline sahip zeminlerin iyileştirilmesinde kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) ve potasyum hidroksiti (KOH) katkı maddesi olarak kullanmışlardır. Aynı zamanda volkanik külü kullanarak numuneler üzerinde Atterberg limitleri, maksimum kuru yoğunluk, optimum su muhtevası, serbest basınç mukavemeti ve şişme deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre volkanik kül ile Ca(OH)_2 ve KOH'ın kullanılmasıyla, plastisite indisi %34,8'den %14,2'ye düşmüştür. Şişme potansiyeli %15,7'den %2,3–4,2'ye azalmıştır. Serbest basınç mukavemeti ise 90 günlük kür süresi için 16,55 MPa olmuştur. Deney sonuçlarından zeminin sertleşmesinde potasyum hidroksit, kalsiyum hidroksite göre daha etkili olduğu görülmüştür.

1.2.3. Laboratuvar da derin karıştırma yöntemi ile uygulanmış büyük ölçekli model deneyler

Shen *et al.* (2003a) yaptıkları çalışmada, laboratuvar ortamında yumuşak kil zemini içerisinde çimento ve alçı ile derin karıştırma kolonları uygulayarak, kil zemininin özelliklerinin değişme nedeninin tiksotropi, kırılma, çimento penetrasyonu ve difüzyonu, çimentolaşma, konsolidasyon ve ısı olarak ifade etmişlerdir. Su-çimento (W/C) oranı %100 ve çimento oarnı $100\text{-}500\text{ kg/m}^3$ olarak kullanılmıştır. Alçı ise zeminde oluşacak kırıkları gözlemlemek amacıyla kullanılmıştır. Kolonların çapı 10 cm, uzunluğu 30, 35 ve 40 cm olarak 7, 28 ve 42 günlük kür süreleri için deneyler yapılmıştır. Şekil 1.2'de derin karıştırma cihazının şematik görüntüsü verilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, derin karıştırma kolonlarını çevreleyen yumuşak kil zemini içerisinde etkili bölge olduğunu ve bu bölgede zemin özelliklerinin değiştiği belirlenmiştir. Etkili bölge, kolon merkezinden itibaren kolon çapı kadar olmuştur. Bu bölgede özellikle kolona yakın mesafelerde su muhtevasının azaldığı, pH değerlerinin ve elektrik iletkenliğinin (EC) arttığı gözlenmiştir. Sonuçlara göre, kolonların uygulama esnasında ve karıştırma süresinde kil zeminin drenajsız kayma mukavemeti azalmıştır

ancak 7 gün sonra dayanımını geri kazanmış ve 28 güne kadar dayanımın artması devam etmiştir.

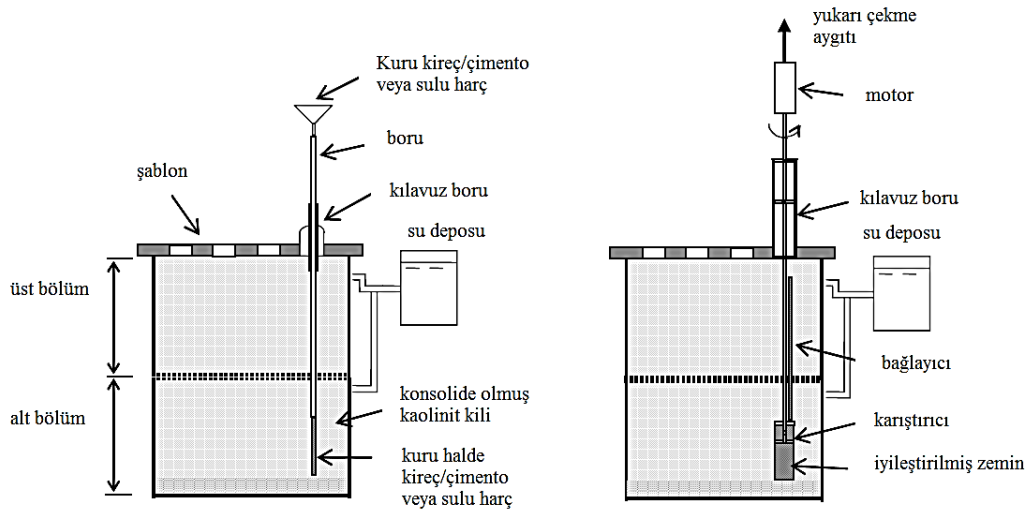


Şekil 1.2. Laboratuvar model kolonlarının yapımında kullanılan ekipman (Shen et al. 2003)

Tonoz et al. (2003) yaptıkları deneysel çalışmada, kireç karıştırma yöntemi kullanarak şişme potansiyeline sahip Ankara kili üzerinde stabilizasyon gerçekleştirmişlerdir. Laboratuvar ölçekli model deneyler ile kil zemini içerisinde uygulanmış kireç kolonları ile zeminin fiziksel, şişme, dayanım ve konsolidasyon özelliklerinin iyileştiği belirlenmiştir. Kolon uygulamasında araziden alınan blok halinde (35cm*35cm*30cm) kil örnekleri, laboratuvar el yapımı burgular (çapı 2 ve 4,8 cm) ile zeminde oyuk açılmış, sonra sönmemiş kireç kuru halde istenilen kolon yüksekliği (25-28 cm) kadar oyuklara doldurulmuştur. Deney sonuçlarına göre, efektif bölge ve kirecin göçmesi, yaklaşık kolon çapının iki katı kadar olduğu ve 28 gün içerisinde gerçekleştiği kanaatine varmışlardır. Kireç kolonu uygulanmasıyla, dayanımda %40 ila %80 artış olmuştur. Aynı zamanda ön konsolidasyon basıncı artmış, iyileştirilmiş zeminin sıkışabilirlik karakteristiğinin de azaldığı görülmüştür. Kireç kolonu uygulanmasıyla şişme basıncının

%40 ila %75 arasında azaldığı ortaya çıkmıştır. Kireç kolonu imalinden sonra, kolon çevresinde (yaklaşık kolon çapının iki katı) kil partikülleri %20 ila %40 kür süresine bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Bu durum, kireç göçmesine bağlı olarak önemli miktarda flokülasyon oluştuğunu göstermektedir. Likit limit ve plastisite indeksi benzer şekilde azalmıştır. Zeminin serbest basınç mukavemeti kireç kolonlarının sağladığı pozolanik reaksiyonlar sonucunda, artmıştır.

Kosche (2004), çalışmasında kaolin kili içerisinde derin karıştırma ile uygulanmış kireç-çimento kolonlarının (Şekil 1.3) çevresinde, geçiş bölge ve sınır tabakası üzerinde inceleme yapmıştır. Deneysel çalışmada küçük model kireç-çimento kolonları (çap=50 mm) bağlayıcı madde ve peptizör (lignosülfonat) miktarına göre 7 farklı kolon hazırlanmıştır. 7, 14, 30 ve 90 günlük numunelerin geçiş bölgesinde drenajsız kayma mukavemet deneyi uygulanmıştır. Bazı geoteknik deneyler için alınan numuneler üzerinde kayma mukavemeti, su muhtevası, Atterberg limitleri ve katyon miktarının belirlenmesinde (sodyum, kısmen potasyum ve kalsiyum) kimyasal deneyler (AAS, Atomic Absorption Spectrophotometer) yapılmıştır. Örselenmemiş ve örselenmiş numunelerin kayma mukavemeti (düşen koni penetrasyon deneyi ile), su muhtevası, Atterberg limitleri ve hassasiyeti kolon kenarından belirli uzaklıklarında tayin edilmiştir.



Şekil 1.3. Kireç – çimento kolonlarının uygulama şekli (Larsson 1999)

larsson et al. (2009), laboratuvarında kaolin zemini içerisinde derin karıştırma yöntemiyle uygulanan kireç-çimento kolonlarının çevresindeki zemin özelliklerinin değişmesini

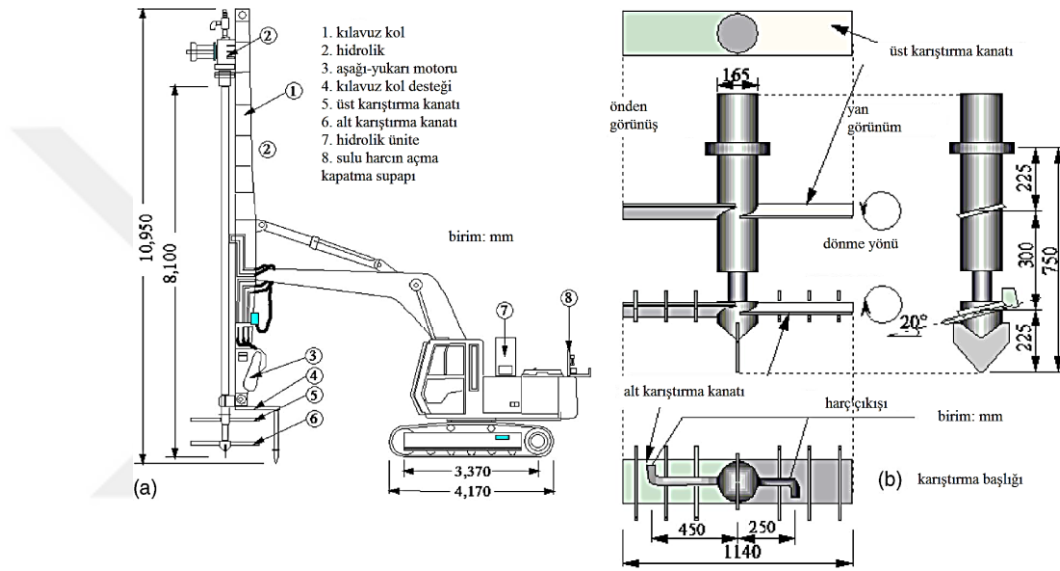
araştırmışlardır. Deneyde dört farklı küçük ölçekli kireç-çimento kolonları farklı bağlayıcı oranlarında 7, 14, 30 ve 90 günlük kür sürelerine tabi tutularak deneyler yapılmıştır. Örselenmemiş drenajsız kayma mukavemeti, yeniden kalıplanmış kayma mukavemeti (*remoulded shear strength*), Atterberg limitleri ve su muhtevası araştırılmıştır. Aynı zamanda, imal edilen kolonların etrafındaki zeminin değişebilen Ca^{2+} , Na^+ ve K^+ iyon konsantrasyonları ölçülmüştür. Kolon etrafındaki kaolinit zemininin drenajsız kayma mukavemetinin belirlenmesinde düşen koni penetrasyon aleti belli aralıklarda uygulanmıştır.

Deney sonuçlarından kolon çevresinde drenajsız kayma mukavemeti doğrusal olarak arttığı belirtilmiştir. Su muhtevasında farklı kolonların etrafından alınan numunelere göre önemli bir değişiklik görünmemiştir. Likit limit ve plastik limit değerleri ise kolonlara yakın mesafelerde önemli derecede artmıştır. Kimyasal analizlere göre, Ca^{2+} , Na^+ ve K^+ iyonları, kireç-çimento kolonlarından çevredeki zemine hareket ettiği, kolon kenarındaki kaolin zemininin drenajsız kayma mukavemeti, Ca^{2+} , Na^+ ve K^+ iyonlarının hareket etmeleri nedeniyle yüksek derecede etkilendiği belirtilmiştir.

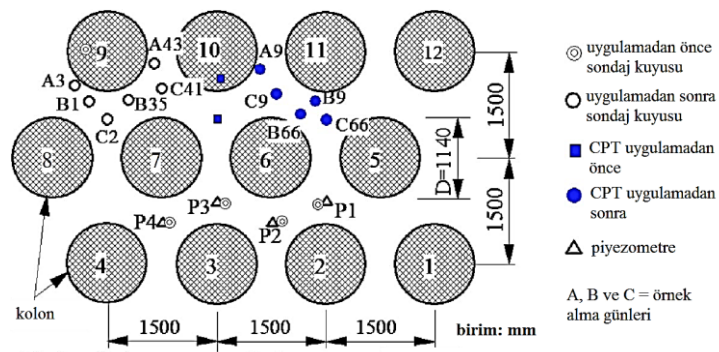
Shen *et al.* (2008), arazide derin çimento kolonları uygulayarak (Şekil 1.4) hassas deniz kilinin ne kadar etkilendiğini araştırmışlardır. Çapı 1.14 m ve uzunluğu 7 m olarak toplam on iki tane üçgen şeklinde ve birbirinden 1.5 m aralığında kolonlar imal edilmiştir. Katkı madde çimento harcı olarak su-çimento oranı %100 ve çimento oranı 140 kg/m^3 kullanılmıştır. Kolon kenarında kil zemininin zaman içerisinde dayanımının değişmesini belirlemek için koni penetrasyon deneyi uygulanmıştır. Kolon çevresindeki kil zemininin fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinin değişmesini incelemek amacıyla kolon uygulamasından önce ve sonra numuneler alınmıştır (Şekil 1.5).

Deney sonuçlarından, kolona yakın mesafelerde katyon konsantrasyonunun fazla olduğu için yumuşak kil zemininin su muhtevası azalmıştır. Kolon uygulamasında, kil zemininin kayma mukavemetinde azalma meydana gelmiştir. Bu azalma kısa bir süre içinde devam etmiş ancak 70 gün içerisinde tedricen arttığı görülmüştür. Kolon imalinden sonra, kil zemininin orjinal kayma mukavemetinde 40 gün sonra %23 oranında ve 70 gün sonra %50 oranında artış belirlenmiştir. Yine sonuçlara göre, derin karıştırma kolonlarını

çevreleyen kil zemininde geçiş bölgesinin olduğu ve bu bölgede zeminin fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri kür zamanına bağlı değiştiği gözlemlenmiştir. Geçiş bölgesinde, su muhtevası ve likitlik endeksi azalmış, plastik limit ve katyon konsantrasyonu ise artmıştır. Zemin özelliklerinin değişmesi kısa süre içinde, zeminde bozulmalar ve kırılmalardan kaynaklanırken uzun sürede tiksotropik sertleşme, konsolidasyon ve iyon difüzyonu olduğu kanaatine varmışlardır.



Şekil 1.4. Arazide kullanılan derin karıştırma makinesi, a) makinenin bileşimi, b) karıştırma başlığının yapısı

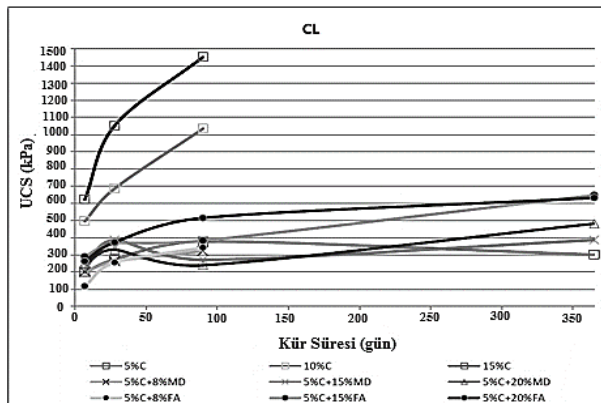


Şekil 1.5. Kolonların diziliş ve kolon kenarlarında yapılan bazı deneyler

Şengör (2011) yaptığı doktora tez çalışmasında, yumuşak kil zeminde uygulanmış derin karıştırma kolonlarının deformasyon karakteristiklerini, model deneyler yaparak araştırmıştır. Bu araştırmanın ilk aşamasında, iyileştirilmiş zeminler üzerinde tek eksenli basınç deneyleri yaparak yumuşak kil zeminler için etkili karışım oranları ve karışım

tipleri araştırılmıştır. 7, 28, 90 ve 365 günlük kür süreleri sonunda tek eksenli basınç dayanım değerleri elde edilmiştir. Bununla beraber iyileştirilmiş zeminlerin elastisite modülü (E_{50}) / serbest basınç dayanımı (q_u) oranları da ayrıca araştırılmıştır (Şekil 1.6). Araştırmanın ikinci aşamasında, büyük ölçekli konsolidasyon tankları içerisinde dört farklı yerleşimde ve üç tip karışım oranında model derin karıştırma kolonları oluşturulmuş ve derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmiş kil zeminin konsolidasyon özellikleri araştırılmıştır.

Derin karıştırma kolonları ile iyileştirilmiş yumuşak kil zemin üzerinde yapılan büyük ölçekli konsolidasyon deneylerinin sonuçlarına göre, iyileştirilmiş yumuşak kil zeminin sıkışma özellikleri kolon parametrelerine, özellikle etkili alan oranı ve karışım malzemesi miktarına bağlı olarak belirlenmiştir. İyileştirme açısından kolon çimento miktarının (buna bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımı, q_u) en etkili parametre olduğu tespit edilmiştir. İyileştirilmiş zeminin sıkışma modülünü belirlemek için kullanılan bağıntıların geçerliliği irdelenmiştir. İyileştirilmiş zeminin sıkışma modülünün tespitinde zeminin ve kolon malzemesinin sıkışma modüllerinin kullanılmasının daha iyi sonuç verdiği kanıtlanmıştır. Ön tasarım işlerinde kullanılabilecek şekilde, oturma azaltım faktörü ile alan oranı ve çimento miktarı arasındaki ilişkileri tespit edilmiştir. Oturma değerlerinden zemin ve kolon üzerindeki gerilmeler geri-hesaplanmış ve gerilme oranları tespit edilmiştir.



Şekil 1.6. Karışımların kür süresine bağlı olarak serbest basınç mukavemetleri (Şengör 2011)

Yi *et al.* (2013), Bu çalışmada laboratuvar ölçekli model-burgu sistemi kullanılarak karbonatlanmış zemin-MgO kolonlarının uygulanması ve performansı araştırılmıştır. MgO harç olarak burgu sistemi ile zeminle karıştırılıp ve imal edilen kolonlar CO₂ gazı ile karbonatlanmıştır (Şekil 1.7). Kolonların performansı, serbest basınç mukavemet (q_u), sertlik, kırılma deformasyonu deneyleri ve mikro yapı analizleri (X-ray ve SEM kullanarak) ile incelenmiştir. CO₂ gazı iki farklı yöntem ile kolonlarla karıştırılmıştır; Birinci yöntemde, kolonlar uygulandıktan sonra burgu temizlenir ve burgu CO₂ cihazına bağlanır, gaz burgu yolu ile pompalanır ve zeminle karıştırılır. Bu işlem 3 çevrimde ve her çevrim 2 dakika içerisinde tamamlanır. İkinci yöntemde, kolonlar uygulandıktan sonra, burgu çapı ile aynı olan bir delikli boru zemine iletilir ve gaz 1 saat süreyle zemine pompalanır ve böylelikle karbonatlaşma işlemi gerçekleşir. 28 günlük kür odasında bekletilen karbonatlanmış kolonların dayanımı, karbonatlanmamış kolonların dayanımına göre 5 kat daha olduğu belirlenmiştir.



Şekil 1.7. Derin karıştırma yöntemi ile uygulanan MgO kolonları

Muntohar (2010) ve Wardani and Muntohar (2011), yaptıkları deneysel çalışmada yumuşak kil zemin içerisinde derin karıştırma yöntemine (DMM) benzer olan kireç-kolon (LC) yöntemini kullanarak araştırma yapmışlardır. Uygulanmış kireç kolonunun etrafında yük dağılımı ve yük-oturma karakteristiği incelenmiştir. Kireç-kolonu tek kolon olarak yumuşak kil zeminde 50 mm çap ve 100-200 mm derinliğe sahip olarak 1,2 m x 1,2m x 1m çelik kalıp içerisinde imal edilmiştir. Deney sonuçlarına göre kireç-kolonunun merkezinden 3D (D= kolon çapı) kadar mesafede zeminin dayanımı hem radyal hem de dikey yönde artmıştır. Ayrıca kür süresinin artmasıyla zeminin dayanımı da artmıştır. Sonuçlardan yine belli oluğu gibi kireç-kolonu uygulandıktan sonra zeminin basıncı 0,23

kN'dan 5,2 kN çıkmıştır. Zeminin su muhtevası değeri kolona yakın mesafelerde özellikle kür süresinin artmasıyla azalmıştır. Kireç-kolonlarının birbirinden mesafesi ızgara şeklinde tasarlandığında 4D olarak önerilmiştir.

Zhu (2016) and Shen *et al.* (2005), yaptıkları laboratuvar çalışmasında derin karıştırma kolonlarının çevresinde bulunan yumuşak kil zemininin özelliklerinin değişmesini incelemişlerdir. Deneyde 1,5m x1,5mx1m beton tank kullanarak model kolonlarını küçük ölçekli zemin-çimento karıştırıcı cihazı ile imal etmişlerdir. Tankta yerleştirilen yumuşak kil 15 kPa'lık bir basınçla altı ay konsolide edilmiş ve sonra derin karıştırma kolonları uygulanmıştır.

Kolon imalatı sırasında ve sonrasında zeminde oluşan tiksotropi, kırılma, çimento penetrasyonu ve difüzyonu, simantasyon, konsolidasyon, ve sıcaklık, önemli faktörler olarak çevredeki zemin özelliklerinin değişmesine neden olmuştur. Derin karıştırma kolonları, çevredeki kil zemininde neden olduğu etki mekanizmaları yedi kategoride sıralanmıştır: kolon çevresindeki zeminin karıştırıcı ile bozulması veya yapısının hasar görmesi ve bağlayıcı maddenin enjeksiyon sonucu genleşmesi; yumuşak kilin tiksotropik davranışı; karıştırma ve genleşme sırasında kolon çevresinde zeminin kırılması; çimento penetrasyonu ve kolondan çevredeki zemine çatlaklar ve gözenekler yolu ile difüzyonu; boşluk suyunda katyon konsantrasyonunun artması nedeniyle simantasyon oluşumu; aşırı boşluk suyu basıncının dağılmasından sonra çevredeki zeminin efektif gerilmenin artması nedeniyle konsolidasyon etkisi ve hidratasyonun kimyasal reaksiyonu ve puzolanik reaksiyon sonucu oluşan sıcaklık.

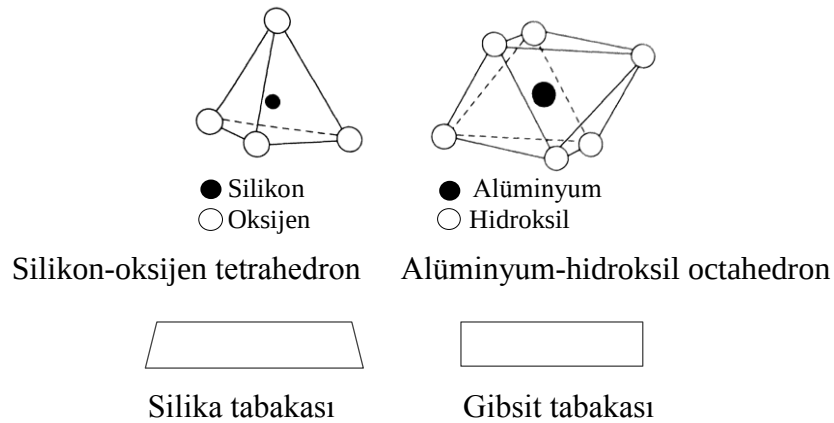
Zemin kırılması kolon çapının yaklaşık iki ila dört katı aralığında gerçekleşmiştir. Kil zemininin kırılması, özelliklerin değişmesinde ve çevreleyen kilin mukavemet artışı için temel faktör olarak vurgulanmıştır. Çatlaklar, enjekte edilen bulamaç için drenaj kanalları sağlayabilir ve aşırı boşluk suyu basınçlarına neden olabilir. Sonuç olarak, inşaat sonrası konsolidasyon hızı ve dayanım artmaktadır. Tiksotropik sertleşme nedeniyle 30 gün içerisinde dayanımın yaklaşık %80 ninin geri kazanıldığı belirtilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

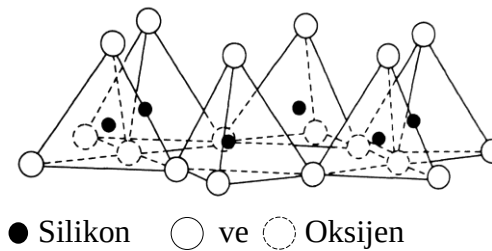
2.1. Killer

2.1.1. Kil Minerallerinin Tanımı

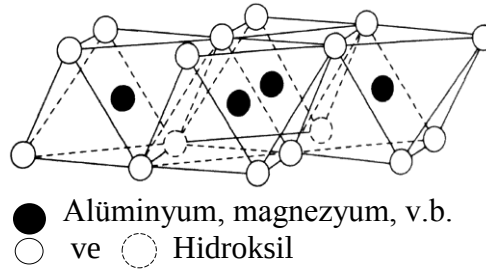
Kil; ince taneli minerallerden oluşmakta, belli miktarda su katıldığında plastik duruma giren, su kaybettiğinde veya pişirildiğinde sertleşen bir malzemedir (Şengül 2003). İnşaat mühendisliğinde killer, yapı malzemesi, kazı ve hafriyat işlemleri, baraj ve temel mühendisliğinde kullanılmaktadır (Çetin 2003). Kil minerallerinin temel yapısal birimi bir silis tetrahedron bloğu ve bir alüminyum oktahedron bloğundan oluşmaktadır (Şekil 2.1). Bu blokların değişik kombinasyonları ve düzenlemeleri ile farklı kil mineralleri oluşur. Tabaka yapısı, temel yapısal birimlerinin birleşmesiyle oluşturulur. Silika tabakası, silikon-oksijen tetrahedronların birleşimiyle (Şekil 2.2), alümina tabakası, alüminyum oktahedronların birleşiminden meydana gelmektedir (Şekil 2.3).



Şekil 2.1. Kil minerallerinin temel birimi (Craig 2004)



Şekil 2.2. Silika tabakaları (Mitchell 1993)



Şekil 2.3. Alümina tabakaları (Mitchell 1993)

Kil mineralleri doğada en çok 1:1 tipindeki kaolinit ve halloysitler, 2:1 tipindeki montmorillonit, illit ve vermikülitler olarak bulunmaktadır. Başka gruplar da esasen benzer özellikleri göstermektedirler (Vural 2012). Killerin bazı mineral özellikleri Çizelge 2.1’de verilmektedir.

Çizelge 2.1. Killerin bazı mineral özellikleri (Önalp 1983)

	Kaolinit	İllit	Montmorillonit
Tane büyüklüğü	0,1-5	0,1-2	10A-1
Tane şekli	Altı köşeli pul	Pul	Eş boyutlu Yaprak
Özgül yüzeyi (m ² /g)	10-20	65-100	50-800
Tane kalınlığı	0,05-2	30A	10A
Likit limit	30-70	60-120	110-710
Plastisite indisi	26-38	34-60	51-100
Şişme-büzülme potansiyeli	Düşük	Orta	Yüksek
Özgül ağırlık	2,60-2,95	2,60-3	2,35-2,70

2.1.2. Killerin farklı mineral tipleri

Killer çok küçük yapıya sahip olmalarına rağmen kristal özellik gösterirler ve dört ana gruba ayrılırlar; 1- kaolinit, 2- montmorillonit, 3- illit, ve 4- klorit kil minerali. Çizelge 2.2’de killerin mineral sınıflandırılması verilmektedir.

Çizelge 2.2. Bazı kil minerallerinin sınıflandırılması (Konta 1995)

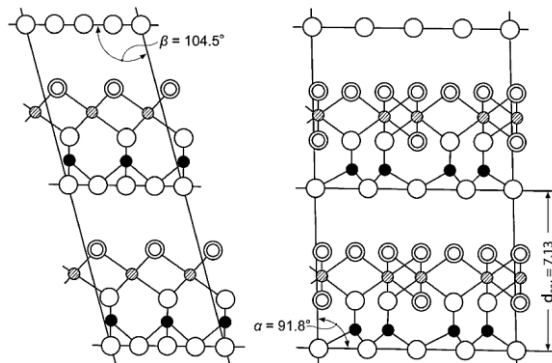
Grup	Mineraloji	Formülü
Kaolinit, Serpantinit	Kaolinit Halloysit	$Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$ $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$
Mika	İllit	$K_{<2}Al_3[(Si_{>6}Al_{<2})O_{20}](OH)_{4n}H_2O$

Çizelge 2.2. (Devam)

Grup	Mineraloji	Formülü
Vermikülit	Trioktahedral vermikülit	$(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})[(\text{Si}_{>}\text{Al}_8)\text{O}_{20}](\text{OH})_4\text{nH}_2\text{O}$
Simektit	Montmorillonit	$\text{M}^{+}_{x+y}(\text{Al}, \text{Fe}^{2+})_{4-y}[(\text{Si}_{8-x}\text{Al}_x)\text{O}_{20}](\text{OH})_4\text{nH}_2\text{O}$
	Beidellit	$\text{M}_x\text{Al}_4[(\text{Si}_{8-x}\text{Al}_x)\text{O}_{20}](\text{OH})_4\text{nH}_2\text{O}$
	Notronit	$(\text{M}^{+}_x\text{Fe}^{3+})_{4-y}[(\text{Si}_{8-x}\text{Al}_x)\text{O}_{20}](\text{OH})_4\text{nH}_2\text{O}$
	Saponit	$(\text{M}^{+}_x\text{Mg}_6)[(\text{Si}_{8-x}\text{Al}_x)\text{O}_{20}](\text{OH})_4\text{nH}_2\text{O}$
Profilit	Profilit	$\text{Al}_4[\text{Si}_8\text{O}_{20}](\text{OH})_4$
Talk	Talk	$\text{Mg}_6[\text{Si}_8\text{O}_{20}](\text{OH})_4$
Klorit	Donbassit	$\text{Al}_4[\text{Si}_8\text{O}_{20}](\text{OH})_2\text{Al}_4(\text{OH})_{12}$
Paligorskit	Paligorskit	$\text{Mg}_5[\text{Si}_8\text{O}_{20}](\text{OH})_2(\text{OH}_2)_4\text{H}_2\text{O}$
Sepiyolit	Sepiyolit	$\text{Mg}_8[\text{Si}_{12}\text{O}_{30}](\text{OH})_4(\text{OH}_2)_4\text{nH}_2\text{O}$

2.1.2.a. Kaolinit

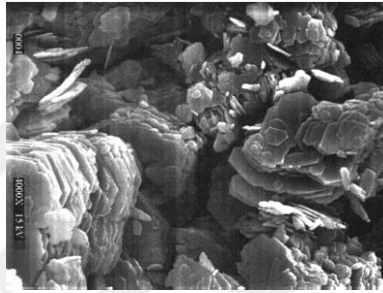
Kaolinit minerallerinin kristalleri düz ve levha şeklindedir. Kaolinit minerallerinin yapısı bir oktahedral ve bir tetrahedral tabakasının üst üste gelmesi ile oluşmaktadır. Tabakaların kalınlığı 7,2 Å (Murray 2006'ye göre 7,13 Å), yanal boyutları 1000-20000 Å ve kalınlığı 100-1000 arasındadır. İki tabakanın seri tekrarına göre kil mineralini 1:1 olarak tanımlamışlardır (Şekil 2.4). Birkaç katmanın bir araya gelmesi ile kalınlığı 0,72 nm olan kaolinit kristali oluşur (Bell and Walker 2000).



Şekil 2.4. Kaolinit yapısının şematik çizimi (Murray 2006)

Kristali oluşturan üniteler birbirine oksijen hidroksit bağı ile sıkıca bağlanmışlardır. Su ve katyonların kristal üniteleri arasına girmesi çok zordur. Kil su aldığı anda kristal

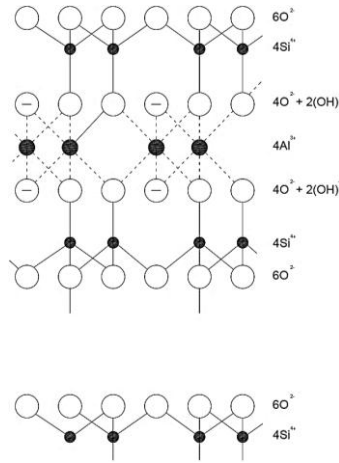
ünitelerin aralarında mesafeler genişlemez. Bu nedenle kaolinitin efektif yüzeyi dış yüzeyleri olarak bilinmektedir. Sonuç olarak kaolinitler başka kil minerallerine göre kasyon değişim kapasiteleri azdır (3-15 meq/100gr). Kaolinitlerin şişme ve büzülme potansiyeli, kohezyon ve plastiklik özellikleri diğer kil minerallerine göre daha azdır. Özgül yüzeyleri 10 m²/gr civarında, özgül ağırlıkları 2.60-2.68 gr/cm³ arasındadır (Çetin 2003). Kaolinit kiline ait taramalı elektron mikroskop görünümü Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Kaolinit kilinin SEM görüntüsü (Murray 2006)

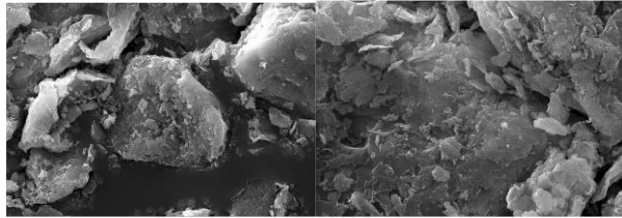
2.1.2.b. Montmorillonit

Bu grupta montmorillonit ile beraber nontronit, saponit, hektorit, gibi mineraller de bulunmaktadır. Montmorillonit kristali üstten ve alttan silica tabakası ile kapatılmış bir gipsit tabakasından ibaret kristal ünitelerinin üst üste gelmesiyle oluşmaktadır. Oksijen atomu ile silis ve gipsit tabakaları birbirine bağlanmıştır. Montmorillonit kristalleri iki silika ve bir gipsit tabakasından oluşarak 2:1 tipi ile sembolize edilmiştir. Montmorillonit yapısının şematik çizimi Şekil 2.6' da gösterilmiştir. Montmorillonit kristalinde, alümina tabakasında negatif yük boşluğu ve silika tabakalarını bağlayan Vander Walls kuvvetlerinin zayıf olması nedeni ile su molekülleri ve değişebilir iyonlar katmanlar arasına girerek birbirinden uzaklaştırabilmektedir. Bu nedenle montmorillonit yüksek derecede su alma potansiyeline sahiptir (Holtz and Kovacs 1981).



Şekil 2.6. Montmorillonit yapısının şematik çizimi (Ji et al. 2001)

Montmorillonit su aldığında yüksek plastisite ve düşük içsel sürtünme özelliğine, su kaybettikleri zaman yüksek oranda büzülme ve çatlamalara maruz kalır. Montmorillonit gurubundaki killerin özgül yüzeyleri $800 \text{ m}^2/\text{gr}$ ve özgül ağırlıkları $2.2\text{-}2.3 \text{ gr/cm}^3$ arasındadır (Vural 2012). Montmorillonit kiline ait taramalı elektron mikroskop görünümü Şekil 2.7’de gösterilmiştir.

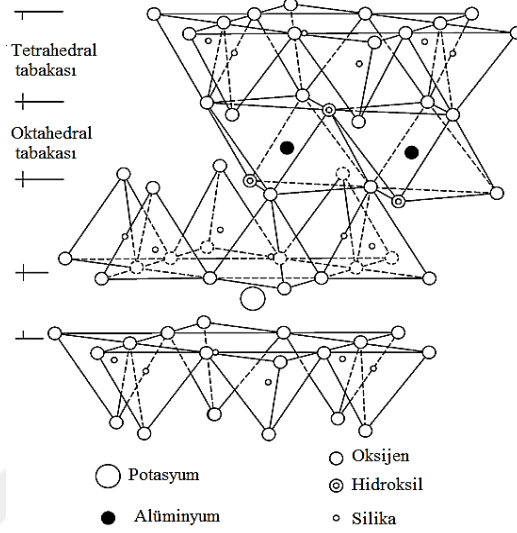


Şekil 2.7. Montmorillonit kilinin SEM görüntüsü (Baysal 2010)

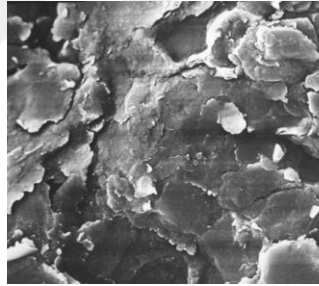
2.1.2.c. İllit

Tane boyutu daha büyük ve yapısal olarak montmorillonite benzemektedir. İllitin kristal yapısı 2:1 olarak tanımlanmıştır. Amorfus yer değiştirmeler sonucunda, silis tabakasında %15 oranda silis alüminyum ile yer değiştirir. Açıkta kalan yükler ise K^+ iyonları ile doldurulur. İyonların üniteler arasına girmesi ve birbirine bağlaması nedeni ile kristal üniteleri arasındaki mesafeler fazla genişlemezler. İllit kilinin içsel sürtünme açısı montmorillonite göre fazla ve şişme potansiyeli daha azdır. Özgül ağırlığı $2,64\text{-}3,0 \text{ gr/cm}^3$

ve özgül yüzeyi 80 m²/gr dır. İllit kilinin yapısal görünümü Şekil 2.7’de ve SEM görüntüsü Şekil 2.8’de verilmiştir.



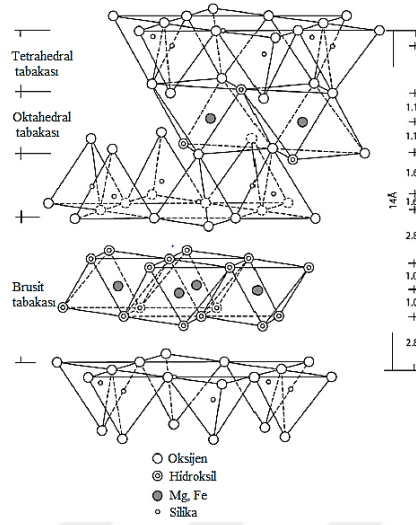
Şekil 2.7. İllit yapısının şematik çizimi (Murray 2006)



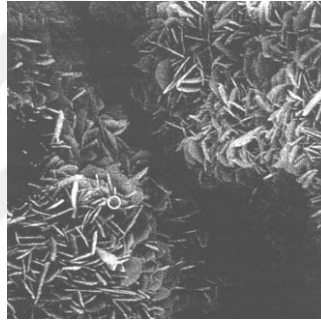
Şekil 2.8. İllit kilinin SEM görüntüsü (Murray 2006)

2.1.2.d. Klorit

Kloritler hidrotermal taşlar, kristalin şistler ve silikatların alterasyonundan oluşmaktadır. Phyllit’li minerallerin belirlenmesinde ve demirli taşların içinde yeşil renkte bulunan maddelere klorit adı verilmektedir. Kloritlerin yapısı dört katlı (2:1:1) ve kristal yapıları mika ve brusit tabakalarından oluşmaktadırlar. Toprak ve sedimenter kayalar içinde aktüel sedmanlar bulunmakta ve bazılarının kompozisyonlarını kloritler oluşturmaktadır (Yalçın, 1997). Klorit kiline ait şematik görüntü Şekil 2.9’da ve SEM görüntüsü Şekil 2.10’da verilmiştir.



Şekil 2.9. Klorit yapısının şematik çizimi (Murray 2006)



Şekil 2.10. Klorit kilinin SEM görüntüsü (Murray 2006)

2.1.3. Killerin fiziko-kimyasal özellikleri

2.1.3.a. Elektriksel iletkenlik

Kil-su sisteminin elektriksel iletkenliği, ortamın elektrik taşıma kapasitesinin bir ölçüsüdür. Kil-su sisteminin elektriksel iletkenliği, karışımdaki iyonların tipi ve sayısı ile ilgilidir. Dane konsantrasyonu artarsa, kil yüzeyindeki iyonlar solüsyona karışır. Elektriksel alan altındaki katyon iyonlarının iletkenliği ve kolloidal danelerin hareketi solüsyonun iletkenliğini arttırmaktadır.

Bir danede elektriksel yükün değeri doğrudan o danenin yüzey alanı ile ilgilidir. Bu nedenle o danenin davranışına etki eden elektriksel kuvvetlerin kitle kuvvetlerine göre değeri de danelerin birim kütlesine düşen yüzey alanı ile ilgilidir. Dane birim kütlesine

gelen yüzey alanı danelerin davranışına etki eden elektriksel yükün mertebesini gösterir (Vural 2012).

2.1.3.b. pH

pH değeri, ortamda H^+ veya OH^- iyonlarının bulunma derecesini ifade etmektedir. pH değişimi zemin-su karışımını önemli ölçüde etkilemektedir. Karışımın yüksek pH değeri kil danelerini dispers yapmakta ve kil daneleri yüzeyindeki negatif yükü arttırmaktadır. Dolayısıyla daneler arasındaki itmeyi arttırmaktadır. Düşük pH değeri, toprakta flokülasyonu ve gevşek zemini ifade ederken, yüksek pH değeri ise dispersiyonu ve sıkı zemini ifade etmektedir.

pH değeri kil danelerinin adsorpsiyon karakterlerini etkiler. Asit durumunda adsorpsiyon artar. Kil danelerinin köşeleri pozitif yükü yüklenir, pH değerinin düşük olması kil dane yüzeyinin elektriksel potansiyelini azaltmaktadır.

pH değeri şişen zeminlerin kireç ile stabilizasyonunda, optimum kireç miktarının belirlenmesi amacıyla da kullanılmaktadır. Bu yöntemde pH değeri 12,40 sınır değer olarak belirlenmiştir. Zemine artan miktarda kireç ilave edilerek pH değeri ölçülür. 12,40 pH değerini sağlayan miktar, optimum olarak belirlenir (Vural 2012).

2.2. Derin Karıştırma Yöntemi

Yumuşak veya kirlenmiş zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi için zemin karıştırma (SM) yönteminin, kullanımı geniş çapta artmıştır. SM yöntemi, özel projelerde ve saha koşullarıyla adapte olması hemde geoteknik problemlerinin giderilmesinde maliyet-verimliliği yüksek derecede esneklik gösterdiği için büyük ilgi görmektedir. Bu yöntemde, arazide farklı bağlayıcı maddeler ile zemin karıştırılır ve kimyasal reaksiyonlar sonucunda zeminlerin iyileştirilmesi sağlanır. İyileştirilmiş zeminler, doğal zemine göre yüksek dayanıma, düşük geçirimsiliğe ve düşük sıkışabilirliğe sahiptirler. Zeminlerin iyileştirilmesiyle, kil minerallerinin yüzeyinde katyon değişimi, partiküllerin birbiriyle bağlanması ve/ya kimyasal reaksiyonlar

sonucunda boşlukların doldurulması demektir. Çimento ve kireç en önemli bağlayıcı maddelerden olarak bunlarla birlikte, yüksek fırın cürufu, jips ve küller diğer ikincil ürünler olarak kullanılmaktadır (Kirsch and Bell 2012).

Zeminlerin karıştırılması iki ana grupta sınıflandırılmaktadır: 1) derin karıştırma yöntemi (DMM), 2) yüzeysel karıştırma yöntemi (SMM).

DMM yönteminde bağlayıcı madde kuru veya sıvı halde içi boş şaftlar yoluyla çeşitli kesme aletleri ve kanatlı burgular ile zemine enjekte edilir ve iyice karıştırılır. Tekli veya çoklu düzenlemelerde monte edilen şaftlar, dikey eksenle dönerek münferit veya birbiriyle örtüşen zemin-karışım kolonlar elde edilir. Panel oluşturmada kesme / karıştırma kollarına yatay eksenlere kesici tekerlekler monte edilir veya kesme zincirlerinin dönmesiyle sürekli duvarların inşasında harç, boru ve kollar boyunca monte edilmiş çıkışlar vasıtasıyla enjekte edilir. Bazı yöntemlerde, mekanik karıştırıcıda veya kesme aletlerinde sıvı bağlayıcı yüksek hızla püskürtme yolu ile eş zamanlı uygulaması sağlanmıştır (Kirsch and Bell 2012).

Yerinde karıştırma, çok yönlü bir zemin iyileştirme yöntemidir. Yumuşak killeri, siltler ve iyi derecelenmiş kumlar dahil olmak üzere çeşitli zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabilir. Organik zeminlerde, örnek olarak gyttja (bol organik madde içeren gölsel bir çamur, sedimenter organik zemin), turba, ve sulu çamurların stabilizasyonunda bu yöntem kullanılabilir. Bu yöntemde, bağlayıcının özenle hazırlanması ve uygulama usulleri dikkatlice yürütülmelidir. Bununla birlikte, iyileştirilmiş zeminlerin mühendislik özellikleri sadece bağlayıcının özelliklerine bağlı değildir. Ayrıca, her zeminin büyük oranda doğal özelliklerine ve çökme şekline, hemde şantiyede karıştırma ve kütleme şartlarına bağlıdır. Bu nedenle, bu faktörlerden kaynaklanan kimyasal reaksiyonların tamamen öğrenilmesi ve uygulanan zeminin iyileştirme teknolojisinin başarılı olduğundan emin olmak lazım (Kirsch and Bell 2012).

2.2.1. Derin karıştırma yönteminin tarihsel gelişimi ve sınıflandırılması

Derin karıştırma yöntemi 1950 yılının ortalarında Intrusion-Prepakt Inc. tarafından yerinde karıştırma (MIP), kazık yönteminin geliştirmesiyle ortaya çıkmıştır (FHWA 2000). Bu yöntemde mekanik karıştırıcılar çimento esaslı harç kullanarak zemin ile karıştırılır, temel elemanları ve istinat duvarları oluşturulur. Harç, sondaj başlığından ve yatay eksenle kanatlar ile donatılmış karıştırıcıların ucundan enjekte edilmektedir. Modern derin karıştırma tekniklerini yansıtan, ve bununla birlikte, Japon ve İskandinav ülkelerinde son elli yıl içerisinde büyük çapta araştırmalar yapılmıştır. Son yıllarda Avrupada tekerlekli kesiciler ve hendek tipi karıştırıcı sistemleri geliştirilmiştir (Kirsch and Bell 2012).

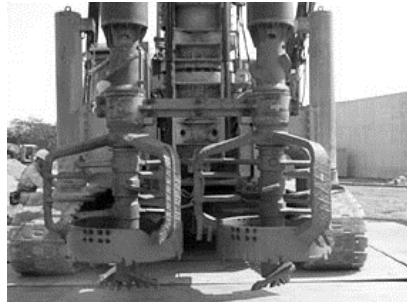
Japonyada DMM üzerinde araştırmalara ve geliştirmelere büyük ilgi gösterilmektedir. Derin kireç karıştırma yöntemi (DLM), ilk ticari uygulaması, 1974 yılında Fudo Construction Co. Ltd. tarafından, mekanik besleme yöntemi kullanılarak yürütülmüştür. Japonya'daki Chiba eyaletinde ıslah edilmiş yumuşak alüvyon kilini iyileştirmek amacıyla, Mark IV makinesini kullanılmıştır. DLM'nin denizde ilk kullanımı, 1975'te Tokyo limanında yapılmıştır. Stabilize edilen zeminlerin tekdüzeliğini (uniformity) geliştirmek amacıyla 1970'lerin ortalarında Kawasaki Steel, Fudo ve Takenaka Group tarafından sırasıyla geliştirilen CMC ve DCM (derin çimento karıştırma) yöntemleri ile çimento harcı ve çimento-su bulamacını bağlayıcı olarak kullanılmasına Port Harbor araştırma enstitüsünün nezareti altında yeni bir fikir ortaya koymuşlardır. CMC ve DCM'nin ilk arazi ve deniz uygulamaları 1976 yılında uygulanmıştır. Aynı yıl Seiko Kogyo Co. tarafından zemin-karıştırma duvarlarını (SMW) kesintisiz burgular ve aralıklı olarak yerleştirilen kanatlar geliştirerek ortaya koymuştur. Bu yöntem önceki çalışmalarda kazı desteği ve yer altı sularında kesme duvarları olarak uygulanmıştır (Kirsch and Bell 2012).

Çimento derin karıştırma (CDM) yöntemi, farklı bağlayıcı maddelerin bulamaç şeklinde (ıslak yöntem) kullanılması demektir. 1977'de Japonya'nın CDM Kurumu bu yöntemi desteklemek ve geliştirmek amacıyla farklı kurumlarla işbirliği yapmıştır. Sonuç olarak yeni CDM makineleri geliştirilmiştir (CDM-Mega, CDM-LODIC, CDM-Land4, ve

CDM-Column 21). Denizel uygulamalarında, CDM yöntemi temel başlıklarının, rıhtım duvarları ve dalgakıran temellerinin geliştirilmesinde kullanılmıştır. Karıştırıcı kanatlarının çapı 1,0-1,6 m arasında ve maksimum iyileştirme yüksekliği suyun altından 70 m kadar sağlanmıştır. Arazi uygulamalarında ise, CDM yöntemi kayma ve sıvılaşmaların önleminde, oturmaların azaltılmasında ve temellerin taşıma gücünün iyileştirilmesinde kullanılmıştır. Standart CDM makineleri iki şafttan, 1 m çapında karıştırıcı kanatı ve 50 m penetrasyon derinliğini sağlayacak aletten oluşmaktadır (Şekil 2.11 ve Şekil 2.12).



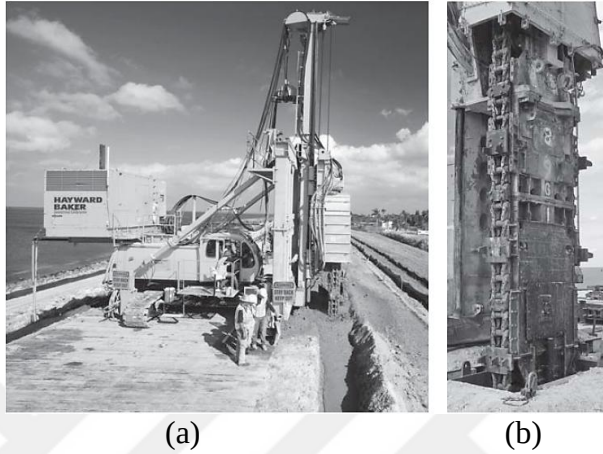
Şekil 2.11. CDM'nin denizde derin karıştırma uygulamasının ıslak yöntemi, (CDM kurumu Japon, <http://www.cdm-gr.com>)



Şekil 2.12. CDM makinesi arazide derin karıştırma uygulamalarının ıslak yöntemi, (CDM kurumu Japon, <http://www.cdm-gr.com>)

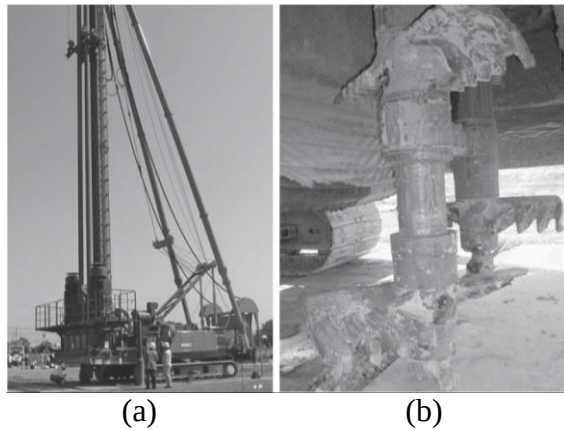
1993'te Japonyada TRD (trench re-mixing and cutting deep wall) yöntemi geliştirilerek ortaya çıkmıştır. Bu yöntemde, arazide zemine bağlayıcı madde ilave ederek, dikey ve yanal yönde hareketli cincirler ile karıştırılarak sürekli duvarlar inşa edilir (Şekil 2.13). Japonya'da ıslak yöntem, yüksek hızda enjeksiyon ile mekanik karıştırmanın birleştirilmesiyle geliştirilmiştir. 1984 yılında sürülebilir kanat (spreadable wing (SWING)) yöntemi ortaya çıkmıştır. Bu yöntemde geri çekilebilir karıştırma bıçakları

tekli burgu şaftına monte edilir ve istenilen derinlik ve çap elde edilir. 1986 yılında SWING yöntemine jet grout ilave edilerek geliştirilmiştir. Mekanik karıştırma ve jet karıştırma sonucunda 3,6 m'ye kadar çap elde edilmiştir (Kirsch and Bell 2012).



Şekil 2.13. a) TRD yöntemi ile uygulanan kesme duvarı b) kesme / karıştırma aparatı (Kirsch and Bell 2012)

1978'de, kuru jet karıştırma (DJM) olarak bilinen bir pnömatik bağlayıcı besleme sistemi kullanılarak, arazi uygulamaları için Japon kuru yönteminin geliştirme çalışmaları başlatılmıştır. İlk arazi uygulaması 1981 yılında olmuştur. Bu yöntem daha sonra, 1985'te Japonyanın San-yo karayolu projesinde 10 m kalınlığında yumuşak hassas kil üzerinde, 10 m yüksekliğinde dolgu inşa ederek geliştirilmiştir. DJM ekipmanı iki karıştırıcı şaftan, 1,0 m çapında kanat ve maksimum penetrasyon derinliği 33 m olarak oluşmuştur (Şekil 2.14).

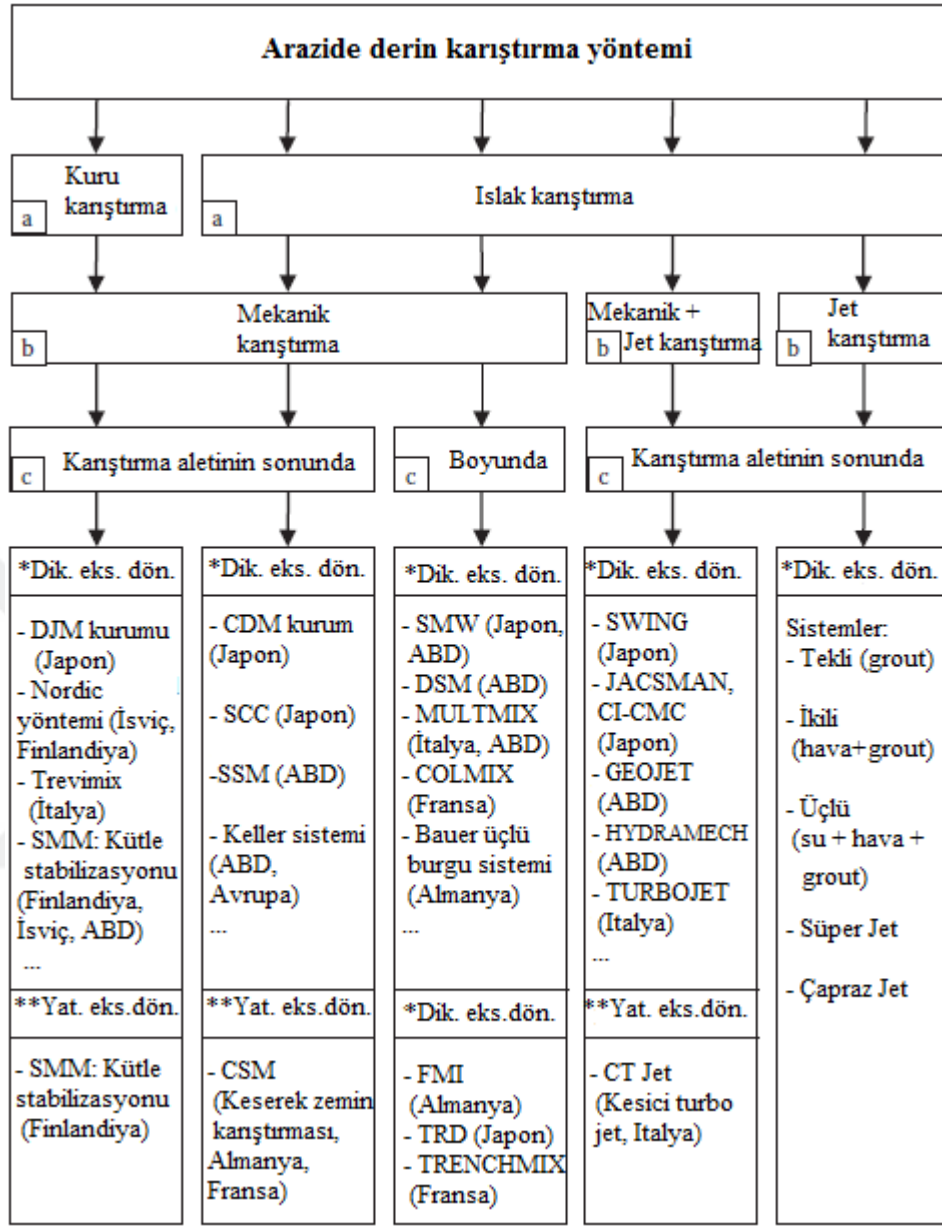


Şekil 2.14. a) Arazide derin karıştırma için kullanılan kuru yöntemi (DJM ekipmanı), b) çapı 1,0 m olan iki karıştırıcı (Kirsch and Bell 2012)

İskandinav ülkelerinde DMM'nin geliştirilmesi 1967 yılında İsveç'te laboratuvar ve arazide yumuşak kil zeminlerin iyileştirilmesinde sönmemiş kireç kullanarak başlamıştır. Bu araştırmalar Finlandiya'da da aynı yılda başlamıştır. Kireç kolonu yönteminin ticari kullanımı, 1975'te İsveç'in Stockholm şehrinde, kazı desteklerinde, dolgu stabilizasyonunda ve sığ temellerde kullanılarak başlamıştır. Aynı yılda çimento ve sönmemiş kireç ile çimento karışımı kuru bağlayıcı maddeler olmak üzere araştırmalar yapılarak pratikte uygulamaya başlamışlardır. Finlandiyada kireç-çimento kolonu yönteminin ilk ticari projesinin uygulaması 1988 yılında ve sonra ise 1990 yılında İsveç ve Norveç'in işbirliğiyle yapılmıştır. DMM'nin bu tür uygulaması farklı yumuşak zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılarak geliştirilmiştir. Bu yöntem günümüzde Nordic kuru derin karıştırma yöntemi olarak tanımlanmaktadır (Holm 2002). Şekil 2.15'de arazide derin karıştırma yönteminin farklı uygulamaları verilmiştir.

Nordic yönteminde nispeten hafif ve taşınabilir ekipmanları genel olarak kolon inşasında tekli şaft kullanılmaktadır. Kolonların çapı 0,5-1,0 m arasında ve zemin koşuluna bağlı olarak derinliği 25 m civarında olmaktadır. DMM, zeminlerin iyileştirilmesinde oturmaların azaltılmasında, karayollarının ve demir yolu dolgularının stabil durumda kalmasında, ve aynı zamanda çok yumuşak, ve yüksek derecede sıkışabilir killerin ve / ya organik zeminlerde zemin / kolon etkileşimlerinin çözümünde kullanılırlar. Yüksek hızlı trenlerin sebep olduğu titreşimleri azaltmak için ilk uygulaması 2000 yılında İsveç'te gerçekleştirilmiştir (Kirsch and Bell 2012). İskandinav ülkeleri hariç Avrupa ülkelerinde özellikle Polonyada 1995'ten beri Nordic yöntemini kullanarak yaklaşık 743,000 metretül DM kolonlarının kuru yöntemi inşa edilmiştir (Şekil 2.16). Çalışmalar Birleşik Krallık'ta (2001) artarak, Hollanda da ve Almanyada arazi uygulamaları da yapılmıştır.

Modern DMM'nin uygulaması ve geliştirilmesi Amerika Birleşik Devletlerinde 1980'lerin ortalarında ıslak yöntem olarak başlamıştır. Daha sonralar SMW yöntemi 1987-1989 yılları arasında Wyoming, Jackson Lake barajında 130,000 metretül kolon ve maksimum derinlik 33 m olarak uygulanmıştır (FHWA, 2000). Kuzey Amerikada 2009 ile 2011 yılları arasında 1,3 milyon metre küp DM kolonları (derin ıslak kolonu) ve kolon yüksekliği 20,5 m olarak yapılmıştır. Çalışmada cüruf / çimento bağlayıcı madde olarak harç şeklinde 460,000 ton'dan fazla hazırlanmıştır.



*Dikey ekseninde dönme, **Yatay ekseninde dönme

Şekil 2.15. Arazide zemin karışımının genel sınıflandırılması (Kirsch and Bell 2012), a) Bağlayıcı formu, b) Karıştırma prensibi, c) Karıştırma mekanizmasının bulunduğu yer



Şekil 2.16. Derin kuru karıştırma yöntemi, a) Keller/LCM ekipmanı, b) Kışın kuru karıştırma (Kirsch and Bell 2012)

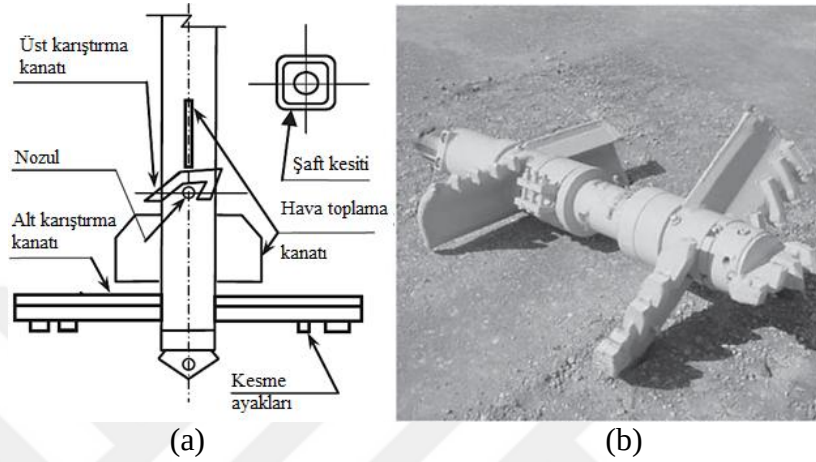
2.2.2. Ekipman ve uygulama şekli

2.2.2.a. Derin kuru karıştırma

Derin kuru karıştırma ekipmanı, sabit veya hareketli bir bağlayıcı depolama / önkariştirme ve besleme ünitesine sahiptir. Bağlayıcı maddenin enjeksiyonunda ve kolonların uygulamasında bir karıştırma makinesine sisteme ilave edilmiştir. Bağlayıcı, hava kompresörü vasıtasıyla gönderilir. Derin kuru karıştırma ekipmanı; bağlayıcı maddeler içeren silolar, bağlayıcı besleme sistemi ile basınçlı depo, yüksek kapasiteli hava kompresörü, hava kurutucu, filtre ünitesi, jeneratör, kontrol ünitesi ve bağlantı hortumlarından oluşmaktadır. Kuru karıştırma için Japon DJM ve Nordic (İskandinav) yöntemi iki önemli teknik olarak tanımlanmaktadır.

DJM karıştırma makineleri bir veya iki karıştırma şafttan oluşur, kolon uygulama uzunluğu ise maksimum 16-33 m arasındadır. Çiftli karıştırma şaftı standard durumlarda kullanılırken dar çalışma alanlarında veya tek yönlü kısıtlamalara sahip alanlarda tek bir şaft kullanılabilir. Standart karıştırma aleti 1 m'lik bir çapa sahiptir ve şaftın sonunda iki karıştırma kanatı 90 °C açıyla iki farklı seviyede monte edilir (Şekil 2.17). Tıkanmayı önlemek için, enjeksiyon portları, açılı karıştırma bıçaklarının altında ve arkasındaki karıştırma şaftına yerleştirilir. Alttaki portun görevi penetrasyon esnasında havanın enjekte edilmesi veya yüksek miktarda bağlayıcı madde ve havanın birlikte kullanılmasıdır. Genel olarak, bağlayıcı madde üst porttan ve karıştırıcı kanatlarının

yukarı çekildiği an şaftın ters çevrilmesiyle altta oluşan boşluğa enjekte edilmektedir. Bağlayıcı miktarı ve hava basıncı otomatik olarak kontrollü bir biçimde zemine iletilir (Kirsch and Bell 2012).



Şekil 2.17. a) Karıştırma cihazının şematik görüntüsü (DJM yöntemi), b) 1,0 m çapında tekli karıştırma aleti (Kirsch & Bell, 2012)

20-30 kNm aralığındaki dönme momentine sahip DJM makineleri, tabakalı zeminlerde farklı dirençle karıştırma işlemini gerçekleştirebilirler. Yumuşak killerde penetrasyon hızı genel olarak 1-1,5 m / dakika, dönme hızı 24 ya da 32 rpm (elektrikli motorlar için) ve enjeksiyon sırasında tıkanmayı önlemek için 2 m^3 / dakika hava basıncı oluşturulmaktadır. Karıştırıcı dışarı çekildiğinde 0,7 ya da 0,9 m / dakika hızla, 48 yada 64 rpm dönme hızıyla, ve hava basıncı 5 ile 3 m^3 / dakika olmalıdır. Tipik karıştırma aletleri, yatay, eğimli veya açılı kesme / karıştırma kanatlarının görüntüsü şekil 2.18’de ve derin kuru karıştırma yöntemlerinin özeti Çizelge 2.3’te verilmiştir.



Şekil 2.18. Derin kuru karıştırmada kullanılan farklı karıştırıcılar (Kirsch and Bell 2012)

Çizelge 2.3. Derin kuru karıştırma yöntemlerinin, karıştırma koşulları (Kirsch and Bell 2012)

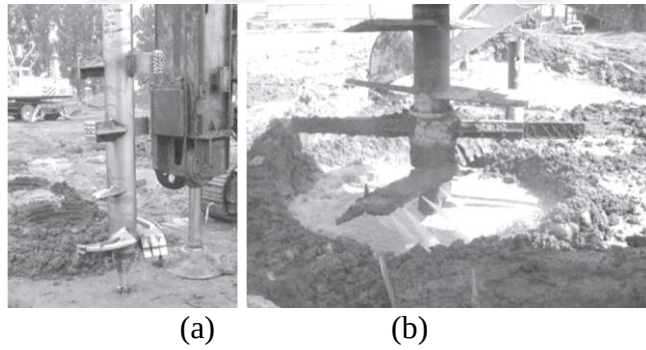
Derin kuru karıştırma yönteminin seçilmesi				
Teknik özellik	DJM	Nordic yöntemi	Trevimix	
Karıştırma şaftlarının sayısı	2 (standart), 1	1	2 (daha yaygın), 1	
Karıştırma cihazının çapı (m)	1,0 (standart) 1,3 (modifiye)	0,5-1,0 makul 0,6-0,8 standart	0,8-1,0 (standart)	
Maksimum penetrasyon derinliği (m)	33	25 (30)	30	
Penetrasyon / Geri alma hızı	0,5-3 (4), 7 Tipik: P: 1,5, G:0,7, 0,9	P:2-15 G: 2-6	P: 0,4 G: 0,6	
Penetrasyon / Geri alma dönme hızı	P: 24,32 G: 48,64 P/G 21-64	G: 100-220	10-40 P: 20 tipik G: 30 tipik	
Enjeksiyon sırasında Penetrasyon / Geri alma	G P hava/bağlayıcı kullanarak	G P mümkün	G P hava/bağlayıcı kullanarak	
Karıştırma aletinin ayak izi alanı (max.) [m ²]	0,78: 1 * 1,0 m 1,56: 2 * 1,0 m 2,56: 2 * 1,3 m	0,28, (0,78)	0,5 0,78: 1 * 1,0 m 1,56: 2 * 1,0 m	
Enjekte edilen kuru bağlayıcının miktarı [kg/m ³]	100-400 çimento:kum 200-600 çimento:turba 50-300 kireç: kil	70-150 150-250 organik zeminler	150-300 250 genel olarak	
Her bir şaft için bağlayıcı besleme miktarı [kg/min]	25-120 standart, 200 kadar artabilen	40-230	100	
Enjeksiyon basıncı [kPa]	P: 100-600 G: 600-100	400-800	600-1,000	
Verimlilik [m ³ /shift]	300-700	150-300	150-220	

2.2.2.b. Derin ıslak karıştırma yöntemi

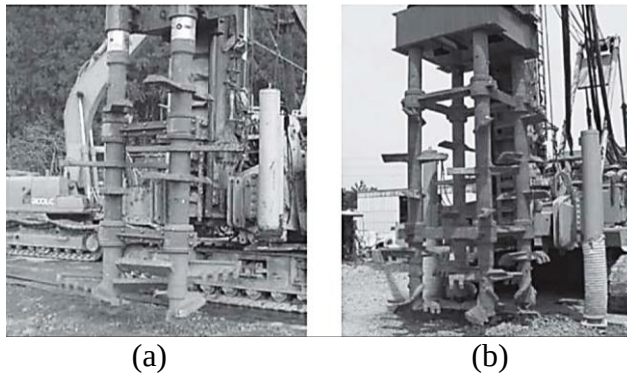
Japonya, ABD ve Avrupada derin ıslak karıştırma yöntemi geliştirilerek arazide zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Kolonlar, paneller / duvarlar uygulayarak, stabilize edilmiş zeminlerin serbest basınç mukavemetleri 0,5-5 MPa arasında olması beklenilir.

Tipik ıslak derin karıştırma ekipmanı, sulu bağlayıcının hazırlama ve karıştırma tesisinden, bağlayıcının zemine enjekte edilmesi ve zeminle karıştırılması için bir karıştırma makinesinden oluşmaktadır. Tesisler genel olarak silolar, su deposu, harmanlama sistemi, geçici depolama tankı, bulamaç pompaları ve güç kaynağı ünitesinden ibarettir. Harmanlama sistemi (batching system) manuel veya bilgisayar kontrollü olarak, koloidal kesme mikserini çok hızlı bir şekilde jet karıştırma sistemine dönüştürebilir. Pompalama oranı tipik olarak $0,08-0,4 \text{ m}^3 / \text{dk}$ arasında değişir, ancak yüksek kapasiteli karıştırma aletleri için $1 \text{ m}^3 / \text{dk}$ 'ya kadar çıkabilir. Bulamaçtaki herhangi bir değişiklik, her maddenin ağırlığını ayarlayarak yapılabilmektedir.

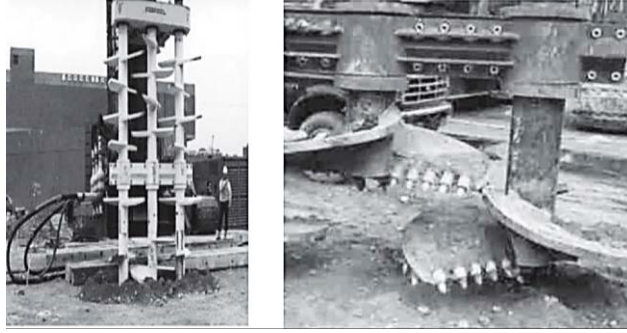
Islak derin karıştırma yöntemi karıştırma aletinin dikey veya yatay eksenler etrafında dönmesi veya kesme kolunun etrafında hesaba katılarak üç gruba ayrılabilir (Şekil 2.15). Tek ve çok-şaftlı karıştırma aletlerine örnekler Şekil 2.19, Şekil 2.20 ve Şekil 2.21'de ve tek-kolon karıştırma aletinin çiftli dönme örneği de Şekil 2.22'de gösterilmiştir. Çizelge 2.4'de arazide ıslak derin karıştırma yönteminin karıştırma koşulları verilmektedir.



Şekil 2.19. Tekli-şaft karıştırma aleti, a) Çap 0,8 m, b) Çap 2,4 m (Kirsch and Bell, 2012)



Şekil 2.20. Çoklu-şaft karıştırma aleti, a) Standart CDM 2,0 m, b) CDM Land4, 4 x 1,0 m (Kirsch and Bell 2012)



(c)

(d)

Şekil 2.21. Çoklu-şaft karıştırma aleti, a) SMW karıştırma kürekleri 3 x 1,5 m, d) Zemin kesme başlığı (Kirsch and Bell 2012)



Şekil 2.22. Tek-kolon karıştırma aletinin çiftli dönme makinesi, kolon çapı 1,8 – 2,0 m ve maksimum derinlik 23,5 m (Kirsch & Bell, 2012)

2.2.3. Derin karıştırma yönteminin avantajları ve uygulaması

Derin karıştırma yöntemi genellikle kayalık ve çok sert olmayan zeminler için ideal bir yöntem olmaktadır. İmal edilen kolonların derinliği yaklaşık 30 m'ye kadar varabilmektedir. Ayrıca, zemin katmanlarının üst tabakaları boşluklu ve iyileştirme hacmi büyük oranda olduğunda, titreşimsiz ekipmanların kullanılması durumunda ya da iyileştirilmiş zeminlerin serbest basınç mukavemeti 0,1-5 MPa arasında olduğu gerekiyor ise derin karıştırma yöntemi uygulanabilir (Bruce and Bruce 2003).

Derin karıştırma ile uygulanan alanlar aşağıdaki gibi sıralanmaktadır:

Çizelge 2.4. Arazide ıslak derin karıştırma yönteminin karıştırma koşulları (Kirsch & Bell, 2012)

Teknik özellikleri	Dikey eksen etrafında mekanik karıştırma için seçilen ıslak derin karıştırma yöntemi							
	CDM	CDM Land 4	SCC	HB-Keller ABD/Avrupa	Bauer	SMW	DSM	COLMIX
Karıştırma şaftlarının sayısı	2 1 (eski sis.)	4	1	1, 2, 3	3	1-3, 5	1-6	2, 3, 4
Karıştırma cihazının çapı (m)	1,0 1,2/1,3	1,0/1,2	0,6-1,5 1,2 (2 şaft)	0,5-2,4 0,6-1,2	3*0,37 3*0,55 3*0,88	0,55-1,5	0,8-1	0,23-0,75 :2 0,36-0,50 :3 0,50-0,75 :4
Maksimum penetrasyon derinliği (m)	50 (55) 30 20	25	20	20	0,37: 10,5 0,55: 15,7 0,88: 25	35 (50)	35	20
Penetrasyon / Geri alma hızı	P: (0,3) 0,5-1 G: 0,7-1 (2)	P: 0,7-1 G: 1,0	P: 1,0 G: 1,0	P: 0,3-1 G: 1-2	P: 0,2-1 G:0,7-1 (5)	P: 0,5-1 G: 1,5-2	P: 0,6-1 G: 1-2	P: 0,8 G: 1,0
Penetrasyon / Geri alma dönme hızı	P: 20 G: 40	P: 20 R: 40	30-60	P: 20-25 G: 40-60	20-40 (80)	P: 14-20 G: yüksek	15-25	8-30
Enjeksiyon sırasında Penetrasyon / Geri alma	P ve/ya G	P ve/ya G	P	P (+G) P +G	P ve/ya G P (%30-50)	P ve G	P (+G)	P (+G)
Su/Çimento oranı	0,6-1,3	0,6-1,3	0,6-0,8 killer, 1,0-1,2 kumlar	1-1,5 0,6-1,2	0,6-2,5	0,7-2,5	1,2-1,75	0,7-2,5
Karıştırma aletinin ayak izi alanı (max.) [m²]	1,5: 2 shafts 0,8: 1 shaft 2,17/2,56: M	2,83-3,14 ya 4,21-4,52	0,3-1,75 2,25 iki şaft	1,1-4,5 0,5-1,5	0,44:3*0,37 0,94:3*0,55 2,35:3*0,88	0,7: 3*0,55 1,7: 3*0,9 4,7 :3*1,5	2,5	0,08-0,95 :2 0,29-0,57 :3 0,76-1,60 :4
Enjekte edilen kuru bağlayıcının miktarı [kg/m³]	70-300 av. 140-200	70-300	150-400	150-275 250-450	80-500	200-750	120-400	100-550
Verimlilik [m³/shift]	100-200	500-700	100 m ² wall 400 m col.	250-750 m ³ 75-200 m ³	30-300	100-200	200-300	100-300

- Derin kazılarda yanal yüklerin tutmasında çelikle beraber perde duvar olarak derin karıştırma uygulanabilir,
- Cut-off duvarlarında veya hidrolik kesme özelliği istenilen yerlerde suyun bir taraftan diğer tarafa geçmesini engellemek amacıyla (barajlar vb.) derin karıştırma yöntemi kullanılabilir,
- Sıvılaşma potansiyeline sahip zeminlerde derin karıştırma kolonları ızgara şeklinde uygulandığında deprem anında sıvılaşmayı azaltabilmektedir,
- Zeminlerin ıslahında uygulanabilir,
- Zeminlerin iyileştirilmesinde, zemin hacminin sıkıştırılmasında derin karıştırma yöntemi kullanılabilir,
- Kimyasalların ve zararlı maddelerin doğaya yayılmasını engellemek amacıyla da kullanılabilir (Bruce and Bruce 2003).

2.2.4. Derin karıştırma yönteminde kullanılan katkı maddeleri

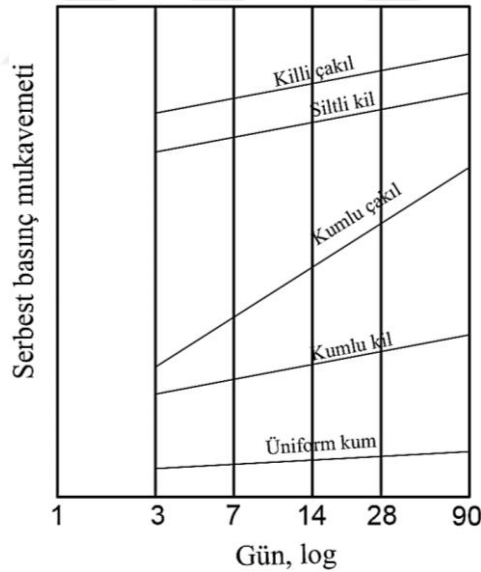
Derin karıştırma yönteminde kireç ve çimento katkı maddesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu katkı maddeleri ile birlikte alçı, yüksek fırın cürufu ve kül tek başına veya kombinasyonları da kullanılmaktadır. Zeminlerin iyileştirilmesinde katkı maddesi ile kil karıştırıldığında, kil minerallerinin yüzeyinde katyon değişmesine neden olup ve sonuç itibarıyla zeminde bulunan boşluklar kimyasal reaksiyonlar ile doldurulup ve zemin partiküllerinin birbirine bağlanmasına neden olmaktadır (Moseley and Kirsch 1993). Kohezyonlu zeminlere kireç ilave edildiği zaman, zeminin plastisitesi azalır ve puzolanik reaksiyon nedeniyle kil mineralleri ile kireç arasında çimentolanma meydana gelir ve zeminin mukavemetinin artmasına sebep olur. Kimyasal reaksiyonlar, ortamın nem ve sıcaklığından etkilenerken zamana bağlı geliştiği için, mukavemetin de zamanla artması beklenilmektedir (Tumluer 2006).

Zeminde kireç kullanıldığında, zeminin mukavemeti ve şekil değiştirme modülü artar, kabarma potansiyeli ve şişme basınçları azalır ve çevre koşulları etkisi altında zemin özelliklerinin bozulmasını sınırlı kalmasında, yani dayanıklılığının artmasını sağlamaktadır. Ayrıca plastisitenin azalmasına yol açtığı için arazi çalışma koşullarının

iyileşmesi sonucunu doğurmaktadır. Kireçle stabilizasyon, daha yaygın olarak killi zeminlerden yapılan dolgularda özellikle yol inşaatlarında kullanılmaktadır (Özaydın 2000). Değişik tip zeminler için kireç miktarı ile serbest basınç mukavemeti arasındaki ilişki Şekil 2.22’de görülmektedir (Tunç 2001). Ayrıca Şekil 2.23’te aynı kireç içeriğine sahip farklı zeminlerdeki zamana bağlı mukavemet artışı görülmektedir.



Şekil 2.23. Kireç içeriğinin çeşitli zeminlerdeki etkisi (Tunç 2001)



Şekil 2.24. Aynı kireç içeriğindeki farklı zemin cinslerinin zamana bağlı mukavemet artışı (Tunç 2001)

2.3. Polimerler

Polimerler mekanik özellikleri açısından çoğu zaman yeterli, kolay şekil alabilmekte, hafif, ucuz, dekoratif, farklı amaçlarda kullanabilmekte, kimyasal açıdan çoğunlukla inert

ve genel olarak korozyona uğramazlar. Polimerlerin bu özelliklerinden dolayı kimya sanayi ile birlikte endüstri, tekstil, makine ve fizik mühendisliği dahil olmak üzere birçok alanda ilgi çekmektedirler. Tıp, biyokimya, biyofizik ve moleküler biyoloji açısından da polimerlerin önemi büyüktür. Polimer kimyası adı geçen alanlarda ayrı bir araştırma alanı olarak günümüzde büyük ilgi görmektedir. Polimer kimyasında küçük mol kütleli maddeler ile fiziksel ve kimyasal temel kuran veya tekniklerin büyük ve karmaşık yapıdaki polimer molekülleri üzerine uygulanmasındaki güçlükler en önemli sorunlar olarak karşılaşılmaktadır.

Doğal polimerik maddeler, günlük hayatımızda yiyecekler, giysiler, yapı ve taşıt malzemelerin temel ögesi olarak bilinmektedir. Ağaç, yün, et, deri, kauçuk, kağıt ve bunlara benzer maddelerin temeli doğal organik polimerler olmak üzere nişasta, reçine, selüloz, proteinler, lignin vb. bileşikler canlı evrenin ürünleri olarak yapıları karışık moleküllerden oluşmaktadır. Moleküllerin karışık olması değişik ve üstün özellikler göstermeleri anlamına gelmektedir. Son yetmiş beş yıl içerisinde fiziksel ve kimyasal analiz yöntemlerinin geliştirilmesiyle doğal organik polimerlerin yapılarının aydınlatılması ve molekül özelliklerini düzenleyen ilkeler bulunmuştur (Baysal 1981)

Polimerlerin farklı özelliklere sahip olmaları nedeni ile sınıflandırılmaları da çeşitli şekillerde yapılmaktadır. Bunlardan en önemlileri aşağıdaki gibidir.

- Doğada bulunup bulunmamasına ve sentez biçimine göre (doğal - sentetik)
- Organik ve inorganik olmalarına göre (organik - inorganik polimerler)
- Molekül ağırlığına göre (oligomer - makromolekül)
- Isısal davranışlarına göre polimerler (termoplastik - termosetting)
- Sentezleme tepkimesine göre (basamaklı - zincir)
- Zincir kimyasal ve fiziksel yapısına göre (lineer, dallanmış, çapraz bağlı, kristal-amorf polimerler)
- Zincir yapısına göre (homopolimer - kopolimer)
- Polimerizasyon mekanizmasına göre (basamaklı - zincir)

2.3.1. Doğal polimerler

Doğada kendiliğinden oluşan polimerlere, doğal polimer adı verilmektedir. Proteinler (jelatin, aktin, elastin, kollajen, vb.), polinükleotidler (DNA ve RNA) ve polisakkaritler (kitin, nişasta, dekstran, selüloz, vb.) başlıca doğal polimerlerdir. Selüloz doğada en çok bulunan polimerdir. Ağaç, bitki ve pamuğun temel bileşeni olarak bilinmektedir (Saçak 2002).

Polisakkaritler, karbonhidratların 3 grupta sınıflandırılan monosakkarit-oligosakkarit polisakkarit grubundan bir tanesidir. Polisakkaritler, monosakkaritlerin bir araya gelmesiyle oluşan polimerik maddelerdir. Genel formülleri $(C_6H_{11}O_5)_n$ şeklindedir. Polisakkaritler n sayısındaki monosakkaritlerin birleşmesiyle $(n-1)$ mol suyun çıkmasından meydana gelir. Beyaz renklidir ve genellikle suda çözünmez. Polisakkarit sınıflandırmasına selüloz, nişasta, kitin, kitosan, lignin, dekstran, pektininin dışında glikojen, mannan, gamlar, agar agar, sodyum aljinat, inülin de girmektedir.

2.4. Biyopolimerler

Biyopolimerler yaşayan organizmalar tarafından oluşturulan, herhangi bir sentez sonucu oluşmamış, biyolojik olabileceği gibi canlıların hayati fonksiyonlarından bağımsız olarak doğada var olan organik polimerlerdir (Çizelge 2.5). Canlılar çok farklı tipte polimerler sentezleyebilirler. Bu polimerleri kimyasal yapılarına göre altı ana gruba ayırabiliriz: Polyesterler, proteinler, karbonhidratlar, yağ ve yağ asitleri, polifenoller ve özel polimerler. Biyopolimerler hemen hemen tüm ekonomik sektörlerde kullanılabilmektedir. Örneğin; yapışkan, emici, yağlayıcı, ilaç dağıtım aracı, tekstil, güçlü yapı materyalleri ve bilişim materyali vb. (Hardmen 1993, Çankaya 2011).

Biyopolimerler tekrar eden bir düzene sahiptirler, bu yüzden metaller, yüzey partikülleri ve diğer polimerlerle kimyasal reaksiyona girmeye yatkındırlar. Ağır metalleri ve radyoaktifleri barındıran çevresel kirlilik dünya çapında büyük bir sorundur. Nükleer ve diğer zararlı metalik atıkları yok etmeyi amaçlayan yeni bir evrensel teknoloji bulunmamaktadır. Biyopolimerler bu tip bir yenilikçi teknoloji için potansiyel araçlardır (Etemadi *et al.* 2003). Biyopolimerlerin kil ile etkileşimi ile elde edilen

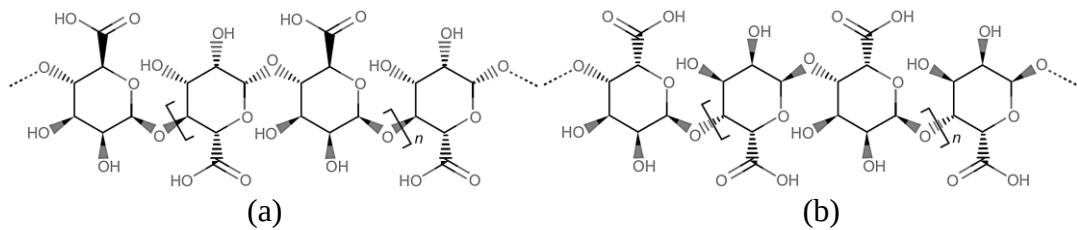
nanokompozitlerde termal, mekanik ve gaz bariyer özelliklerinde iyileşmeler olduğu tespit edilmiştir (John and Thomas 2012).

Çizelge 2.5. Biyopolimerler ve fonksiyonları (Etemadi *et al.* 2003)

Polimer	Monomerleri	Görevleri
Nükleik asitler (DNA ve RNA)	Nükleotidler	Doğadaki tüm canlılarda genetik bilgileri taşımak
Proteinler	α -Amino asitler	Biyolojik katalizörler (enzimler), büyüme faktörleri, reseptörler, yün, deri, ipek, saç, doku bağlantı vb. Yapı taşları, hormonlar, toksinler
Polisakkaritler (karbonhidratlar)	Şekerler	Bitki ve bazı yüksek organizmaların yapı elemanları (selüloz, kitin), enerji sağlayıcı maddeler (nişasta, glikojen), molekül tanıma (kan grupları), bakteri salgıları
Polihidroksialkanoatlar	Yağ asitleri	Mikroorganizmaların enerji depolama maddeleri
Polifenoller	Fenoller	Bitkilerin yapı elemanları (lignin), topraktaki humus, bitki savunma mekanizması (tannin)

2.4.1. Sodyum Aljinat (NaAL)

Aljinatlar, bir grup polisakkaritten oluşmaktadır ki kahverengi deniz yosununun hücre duvarlarından elde edilir. Aljinatlar, (1,4) - β -D-mannuronik asit (Şekil 2.24a) ve (1, 3) - α -L-guluronik asitin (Şekil 2.24b) doğrusal zincirlerinden ibarettir (BeMiller 2008, Gomes *et al.* 2012).



Şekil 2.25. Aljinat zincirlerinin şematik görüntüsü, a) (1,4) - β -D-mannuronik asit bloku, b) (1, 3) - α -L-guluronik asit bloku

Aljinatlar polidispers (çok yönlü dağılmış) ve sodyum aljinatlar ile hazırlanan çözeltiler oldukça viskozdur. Aljinat, su tutucu, jelleştirici, viskozlaştırıcı ajan ve stabilizatör olarak endüstride kullanılmaktadır. Leon-Martínez *et al.* (2014) çalışmalarında kahverengi deniz

yosununu VEA (Viskozite arttırıcı katkısı) olarak çimento-bazlı malzemelerde kullanmışlardır. Bu karışımın kullanılmasıyla Herschele-Bulkley akma gerilmesinin önemli derecede etkilendiği belirlenmiştir. Sonuçlara göre çimento ve aljinat polimerinin katyonlar arasında bir jelleşme ağının oluştuğu ortaya çıkmıştır. Aljinatlar, kil zemin kompozitlerinin hazırlanmasında bir bağlayıcı madde olarak kullanılması ve kontrol numunelerine kıyasla basınç mukavemetinin artması ortaya çıkmıştır (Galan-Marín *et al.* 2010).

Sodyum aljinat (NaAl), bir polielektrolit olarak birkaç özelliğe sahiptir. Örneğin; biyolojik kökenli, biyo-bozunabilirlik ve biyo-uyumluluk gibi birçok özelliğe sahip olan son zamanlarda büyük ilgi gösterilmektedir. Yara sargısı gibi biyomedikal uygulamalarda doğal kaynak olarak (Knill *et al.* 2004; Barikosky 1999; Fenton *et al.* 1998; Kershaw and Mahoney 1999; Lloyd *et al.* 1998), ilaç taşıyıcı (Yuk *et al.* 1995, Hari *et al.* 1996), yapay doku mühendisliği yapı iskeleleri (Kuo and Ma 2001, Li *et al.* 2005) vb. alanlarda kullanılmıştır. NaAl'in işlenebilirliği ve performansı, sulu çözeltisinin uygun polimerler ile karıştırılmasıyla geliştirilebilir, çünkü polimer harmanları polimerik malzemeleri istenen özelliklere, düşük maliyete ve gelişmiş işlenebilirliğe sahiptir.

Kahverengi deniz yosunu sınıfının çeşitli alt gruplarından ekstrakte edilen asidik ve hidrofilik bir polisakkarit olan aljinik asit; kahverengi deniz yosunlarının hücre duvarlarında kalsiyum, magnezyum, potasyum ve sodyumun çözünmeyen tuzları şeklinde bulunmaktadır (Nishide *et al.* 1992). Aljinatların gıdalar üzerine etkilerine dair birçok çalışma yapılmıştır (Cottrell and Kovacs 1980, Nussinovitch 1993). Bunların arasında meyve yapısını iyileştirmeleri, difüzyonla dondurulmuş jellerin hazırlanması, patateslerin depolama sürelerinin uzatılması, et ürünlerinde kullanılması ve daha birçok üründe kullanımı yer almaktadır. Ayrıca aljinatlar, yumuşak bir doku elde etmek, buz-kristal oluşumunu geciktirmek amacıyla dondurmalarda da kullanılmaktadır (Boyle 1959).

2.5. Sodyum Hidroksit, NaOH

Sodyum hidroksit beyaz, kokusuz, uçucu olmayan, yanmayan fakat oldukça reaktif olan bir maddedir. Su ve benzeri maddeler ile şiddetli tepkimeye girmesi sonucunda ısı ortaya çıkarır. Su ile kolay reaksiyona girmesiyle aynı derecede kompaksiyon yapılan numunelere göre daha fazla yoğunluk elde edilmektedir. Aynı zamanda sodyum hidroksit, alüminyum bakımından zengin olan zeminlerle etkili reaksiyona girebilir (Alshaaer 2000, Olaniyan 2008).

2.6. Potasyum Hidroksit, KOH (Kostik)

Potasyum hidroksit ya da potasyum hidrat bir kimyasal bileşiktir. Akkor derecede uçucu olan, 360 °C'de eriyen, suda ısı açığa çıkararak çözünen, beyaz renkte katı bir maddedir. Alkalik bir baz olan potasyum hidroksidin geniş bir kullanım alanı vardır. Endüstride arap sabunu üretiminde, pillerde elektrolit olarak ve gübre yapımında kullanılır. Potasyum hidroksit tarımda asidik toprakların pH derecesini dengelemek alkalik yapmak amacıyla sıkça kullanılır. Ayrıca tarım ilaçlarının yapımında da kullanılır. Bunun yanında tıpta, endüstriyel kimyada da kullanılır. Potasyum hidroksit endüstriyel kimyada geniş kullanım alanlarına sahiptir. Geri dönüşümlü kâğıtların yapımı, sıvı sabun yapımı ve birçok temizlik ürününün üretiminde potasyum hidroksitten yararlanılır. Ayrıca veteriner hekimliğinde bazı hayvan ilaçlarının yapımında kullanılmaktadır. Potasyum hidroksit CO₂ tutucudur bu yüzden bitkisel deneylerde yararlanılmaktadır. Kağıt Hamuru ve Kağıt Endüstrisi, Patlayıcı Endüstrisi, Su Arıtma Endüstrisi, Tekstil Endüstrisi, Yiyecek Endüstrisi, Alüminyum Endüstrisi, İyon Değiştirici Reçinelerin, Rejenerasyonunda, Gıda Endüstrisi, Cevher Flatasyonu ve İşle Endüstrisi, Deterjan ve Sabun Endüstrisi, İlaç Endüstrisi, Asit Nötralizasyonu, Petrol Rafineri Endüstrisi Tarımsal Kimyasallar Endüstrisi, Boya Endüstrisi, Suni İpek Endüstrisi.

2.7. X – Işını Kırınımı (XRD) Analizi

X-Işınları ile madde analizi, bir maddenin karakteristiği olan kırınım desenine dayanır. Kırınım, üzerine düşen elektromanyetik radyasyonun dalga boyuyla uyumlu farklı

geometrik varyasyonlar içeren periyodik yapılara çarpması sonucu gözlenen bir etkidir. Aynı şekilde X-Işını Kırınım metodu (XRD), her bir kristalin fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak, aynı mertebedeki dalga boyuna sahip X-ışını dalgalarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır. Her bir kristal faz, X ışınları ile etkileştiğinde kendi yapısına özgü bir X-ışını kırınım deseni oluşur ve bu kırınım desenleri bir nevi parmak izi gibi o kristali tanımlar. X- Işını Kırınımı için 3-8 keV arası foton enerjisine sahip X- ışınlarıyla uyumlu olan moleküler ve kristaldeki atomlar arası mesafe 0,15-0,4 nm civarında olmalıdır. X-Işını Kırınım analiz metodu, analiz sırasında numuneyi tahrip etmez ve çok az miktardaki numunelerin dahi analizlerinin yapılmasını sağlar.

2.8. SEM / EDX Analizleri

Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) deneyinde numune yüzeyini odaklanmış bir elektron demeti ile tarayarak görüntüler elde eden bir mikroskop aletidir. Elektronlar numunelerin sahip olduğu atomlar ile etkileşime girerek numune yüzeyindeki kompozisyon ve topografi hakkında bilgiler içeren sinyaller üretir.

Taramalı elektron mikroskopisiyle (SEM) birlikte kullanılan Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDX), niteliksel bir kimyasal mikro analiz tekniğidir. EDS tekniği, analiz edilen hacmin temel bileşimini karakterize etmek için bir elektron demeti ile bombardıman sırasında numuneden çıkan X-ışınlarını tespit eder. 1 μm veya daha küçük boyutlardaki özellikler veya fazlar analiz edilebilmektedir.

Numune SEM'in elektron ışını tarafından bombardıman edildiğinde, elektronlar numunenin yüzeyini içeren atomlardan atılır. Elde edilen elektron boşlukları daha yüksek bir seviyedeki elektronlarla doldurulur ve iki elektronun yükleri arasındaki enerji farkını dengelemek için bir X-ışını yayılır. X-ışını enerjisi, yaydığı elementin karakteristiğidir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Doktora tez çalışmasında sodyum aljinat, selüloz, kalsiyum oksit, magnezyum oksit, metil selüloz, sodyum karboksimetil selüloz, sodyum karbonat, sodyum hidroksit, potasyum hidroksit, D-glikoz ve pirinç kabuğu külü gibi farklı maddeler ile CL kilinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, yapılan ön deneylerin sonuçlarından sodyum aljinat, sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit ile hazırlanan numunelerin q_u değerleri diğerlerine göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle çalışmaların devamında bu üç madde kullanılmıştır.

3.1.1. Kil

Deneylerde kullanılan düşük plastisiteli kil (CL) özel bir firmadan (Ankara) temin edilmiştir. Kile ait Atterberg limitleri [likit limit (WL), plastik limit (PL)], maksimum kuru birim hacim ağırlık, optimum su muhtevası ve hidrolik iletkenlik deneyleri sırasıyla ASTM D4318-17, ASTM D1557-12 ve ASTM D5084-00 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Laboratuvar ortamında ilgili standartlara göre belirlenen kile ait bazı özellikler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kile (CL) ait bazı özellikler

	CL
Kil içeriği, <0,002 mm (%)	10
İnce oranı, <0,075 mm (%)	80
Özgül ağırlık, Gs	2,77
Likit limit, WL (%)	40
Plastik limit, PL (%)	23
Plastisite indisi, PI (%)	17
Optimum su muhtevası, (%)	15
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m ³)	18,3
Hidrolik iletkenlik, k (cm/s)	$6,974 \times 10^{-7}$

3.1.2. Musluk suyu

Numunelerin hazırlanmasında musluk suyu kullanılmıştır. Musluk suyuna ait analizler Atatürk Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünde yapılmış ve elde edilen analiz sonuçları Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Musluk suyu analiz sonuçları

	F	Cl	NO ₃	SO ₄	Na	K	Mg	Ca
(mg / L)	0,26- 0,35	12,46- 13,13	18,08- 23,21	27,14- 27,96	6,40- 6,52	3,42- 3,44	13,98- 14,04	50,10- 50,59

3.1.3. Biyopolimer

Deneylerde biyopolimer olarak özel bir firmadan temin edilen toz haldeki sodyum aljinat (NaAL) kullanılmıştır (Şekil 3.1). NaAL’ın temin edildiği firmadan alınan bazı özellikleri Çizelge 3.3’te verilmiştir. Deneylerde NaAL düşük plastisiteli kilin kuru ağırlığının %0,25, %0,5, %0,75 ve %1 oranlarında kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Biyopolimer (NaAL)

Çizelge 3.3. Sodyum aljinata ait kimyasal özellikler

	Sodyum aljinat
Kimyasal formülü	(C ₆ H ₈ O ₆) _n
Molekül ağırlığı	398,31668 g/mol
Erime noktası	>300°C
Kaynama noktası	495,2 °C
pH	5,5 – 7,5
Yoğunluk	1,601 g/cm ³
İçinde çözünebilen	Su

3.1.4. Kimyasallar

Deneylerde özel bir firmadan temin edilen sodyum hidroksit (NaOH) (Şekil 3.2a) ve potasyum hidroksit (KOH) (Şekil 3.2b) kimyasal olarak kullanılmıştır. NaOH ve KOH'ın temin edildiği firmadan alınan bazı özellikleri sırasıyla Çizelge 3.4'te ve Çizelge 3.5'te verilmiştir. Deneylerde hem NaOH hemde KOH düşük plastisiteli kilin kuru ağırlığının %1, %3, %5, %7, %10, %15 ve %20 oranlarında kullanılmıştır.



Şekil 3.2. Kimyasallar (a- NaOH, b- KOH)

Çizelge 3.4. Sodyum hidroksite ait kimyasal özellikler

	Sodyum hidroksit
Kimyasal formülü	NaOH
Moleküler ağırlığı	39,9771 g/mol
Erime noktası	318 °C
Kaynama noktası	1388 °C
pH	11,5-12,5
Yoğunluk	2,13 g/cm ³
İçinde çözünebilen	Su, etanol, metanol

Çizelge 3.5. Potasyum hidroksite ait kimyasal özellikler

	Potasyum hidroksit
Kimyasal formülü	KOH
Molar kütle	56,1056 g/mol
Erime noktası	406 °C
Kaynama noktası	1327 °C
pH	14
Yoğunluk	2,044 g/cm ³
İçinde çözünebilen	Su, alkol, gliserin

3.2. Yöntem

Deneyle üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Bu aşamalar sırasıyla aşağıda izah edilmiştir.

3.2.1. Birinci aşama, serbest basınç numunelerinin hazırlanışı

Bu aşamada biyopolimer ve kimyasal katkılarla NaAL + CL, NaOH + CL ve KOH + CL karışım numuneleri hazırlanmış ve her bir numunenin serbest basınç mukavemeti belirlenmiştir. Herbir numune için belirlenen orandaki katkı kuru haldeki CL kiline ilave edilerek homojen hale gelinceye kadar el ile karıştırılmıştır. Karışım mekanik karıştırıcıya konulmuş ve içerisine CL kiline ait likit limiti (WL=40%) kadar su eklenerek mekanik karıştırıcıda 150 rpm hızla 10 dakika süresince karıştırılmıştır. Bu karışım 38 mm çapında 76 mm yüksekliğindeki silindirik kalıplar içerisine üç tabaka halinde içerisinde hava kabarcıkları oluşmayacak şekilde özenle doldurulmuştur. Numunelerin kalıplardan rahatça çıkarılabilmesi için iç kısmı ince bir film tabakası olacak şekilde yağlanmıştır. Hazırlanan numuneler 7, 14, 28, 56 ve 112 gün uygun kür şartlarında (%90 nem ve 20 ± 3 °C) ilk üç günü kalıpta olacak şekilde bekletilmiştir (Şekil 3.3a-b). Numunelerin hazırlanması ve kür şekli Euro Soil Stab (2001) ve Arasan *et al.* (2017)'a göre yapılmıştır.



Şekil 3.3. Kürdeki numuneler (a-ilk üç gün kalıplı b- kalıpsız)

Kür süresi tamamlanan numunelerin serbest basınç mukavemet deneyleri (UCS) ASTM D2166/D2166M (2016)'ya uygun olarak yapılmıştır. Buna göre 38 mm çapında ve 76 mm yüksekliğinde silindirik numuneler 20 ton kapasiteye sahip serbest basınç cihazına yerleştirilerek 0,5 mm / dakika hızla yapılan yükleme, numune kırılıncaya kadar devam

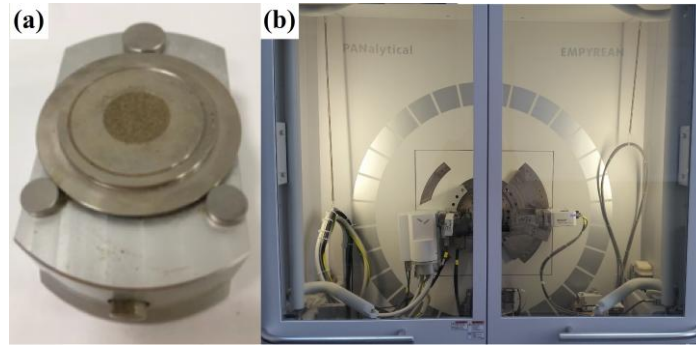
ettirilmiştir. Kırılma anındaki maksimum değer kaydedilmiş ve bağıntı 1 kullanılarak serbest basınç mukavemet değeri belirlenmiştir. Deneyler en az üçer kez tekrar edilmiş ve q_u 'nun ortalama değeri kullanılmıştır.

$$q_u = P_{\max} / A_f \quad (1)$$

Bağıntıda, $P_{\max}$: kırılma anındaki maksimum serbest basınç mukavemet değeri, A_f : numunenin kırılma anında en kesit alanını ifade etmektedir.

3.2.1.a. X – ışını kırınımı (XRD) analizi

Hazırlanan her bir NaAL + CL, NaOH + CL ve KOH + CL karışım numunelerinden en yüksek q_u değerine sahip numuneler için X – ışını kırınımı (XRD) analizi yapılmıştır. XRD analizi Atatürk Üniversitesi, Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (DAYTAM) yapılmıştır. XRD analizi için seçilen numuneler toz haline getirilerek XRD numune plakasına özenle yerleştirilmiş ve yüzeyi düz hale getirilmiştir (Şekil 3.4a). Analizler PANalytical marka Empyrean model XRD cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.4b).

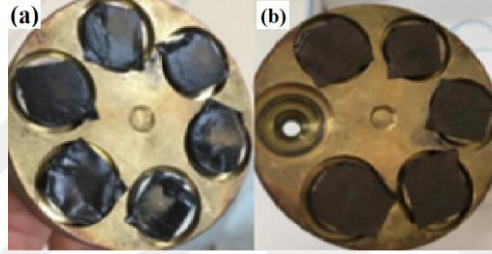


Şekil 3.4. a) Numune plakasına yerleştirilen toz numune b) XRD cihazı

3.2.1.b. Taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ve enerji dağılımlı x-ışını spektroskopisi (EDX) analizleri

Taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ve enerji dağılımlı x-ışını spektroskopisi (EDX) analizleri XRD analizlerinde seçilen numuneler için ayrı ayrı yapılmıştır. SEM / EDX

analizleri Atatürk Üniversitesi, Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (DAYTAM) yapılmıştır. Seçilen numuneler toz hale getirildikten sonra karbon bant yapıştırılan numune plakasına konulmuştur (Şekil 3.5a). Numunelerin karbon bant üzerinde ince bir film şeklinde yer alması için tezgâh üzerine hafif darbe vurarak hem fazlalıklar bertaraf edilmiş hemde vakum sırasında cihaza zarar vermesi önlenmiştir. Numune iletken bir malzeme olmadığından taranırken sarj olmaya eğilimli olduğundan iletken bir malzeme olan altın ile 5 nanometre kalınlığında kaplanmıştır (Şekil 3.5b).



Şekil 3.5. SEM analizi a) Karbon bant üzerine konulan toz numune, b) altın ile kaplanılan toz numune yüzeyi

Kaplama işleminden sonra 3 dakika boyunca vakum işlemi yapılmıştır. Normal şartlar altında yalıtkan malzemelere vakum yapılmaması önerilmektedir. Ancak vakum yapmama düşük çözünürlüğe neden olduğundan ve kaplama yapılan numunelerde vakum önerildiği için vakum işlemi yapılmıştır. Daha sonra numune tutucuya yerleştirilerek analiz gerçekleştirilmiştir. SEM analizi için DAYTAM’da bulunan Zeiss marka Sigma 300 model cihaz kullanılmıştır (Şekil 3.6). Bu analizde hem mikroskobik görüntü taraması hem de elemanter analiz yapılmıştır.



Şekil 3.6. SEM analiz cihazı

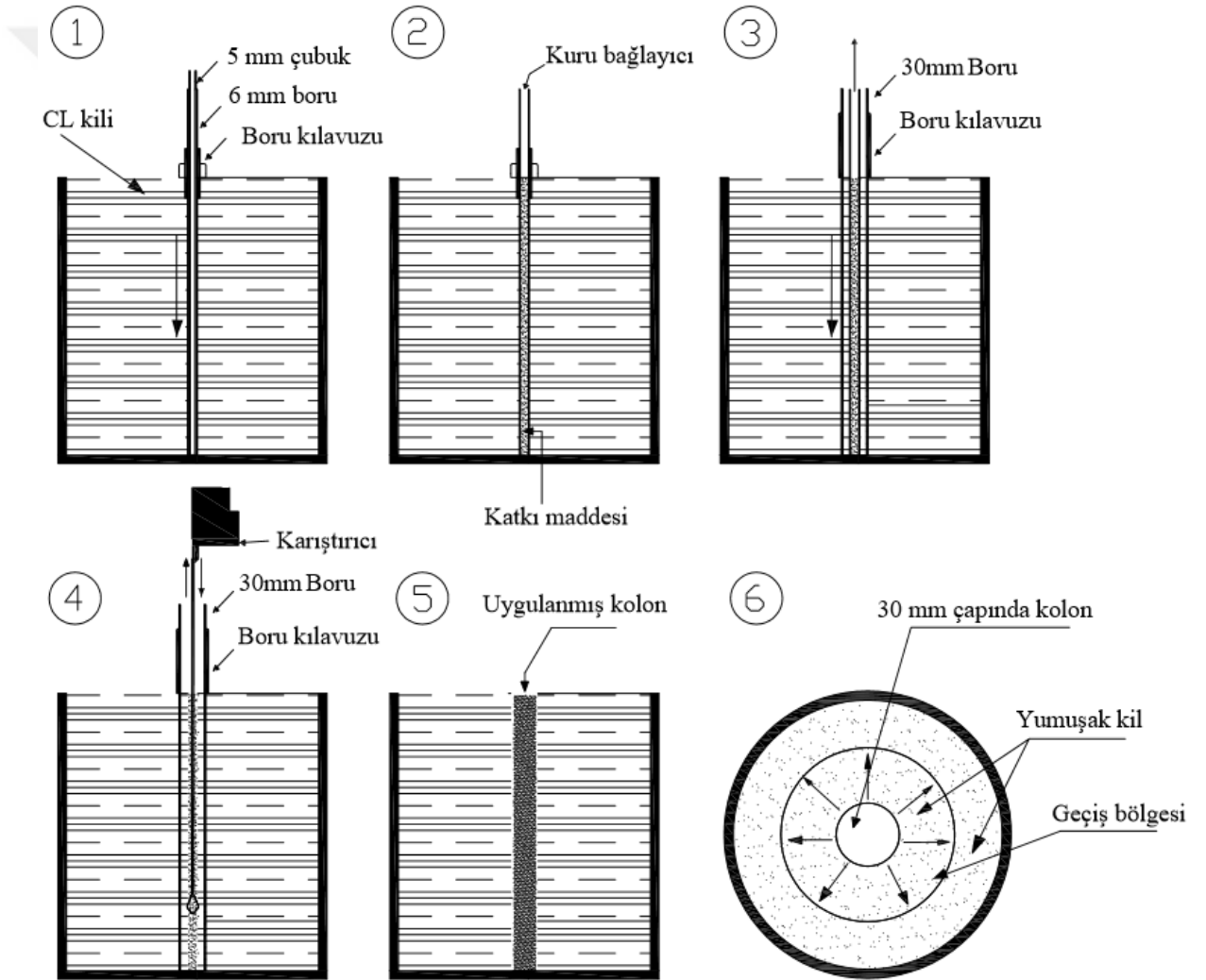
3.2.2. İkinci aşama, derin karıştırma uygulanmış küçük model deneyleri (KMD)

Bu aşamada, CL kili 40% su muhtevası ile karıştırılıp 100 mm çapında, 110 mm yüksekliğindeki polivinil klorür (PVC) kalıplara (küçük ölçekli deney modeli) üç tabaka şeklinde hava kabarcığı oluşmayacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.7). Derin karıştırma yöntemi (DMM) için 30 mm ve 6 mm çaplarında, 150 mm yüksekliğinde et kalınlığı çok ince olan iki adet silindir boru ile 5 mm çapında ve 160 mm yüksekliğinde silindir çubuk olmak üzere üç parçadan oluşan bir sistem kullanılmıştır. Kolon uygulamasında çapı 5 mm olan çubuk çapı 6 mm olan borunun içerisine yerleştirildikten sonra birlikte zemin içerisine tabana değecek şekilde sokulmuştur. Böylece zeminin boru içerisine girmesi engellenmiştir. Çubuk dışarı çıkarıldıktan sonra zeminde kalan boru içerisine kuru toz haldeki katkı maddesi belirlenen oranda doldurulmuştur (Larsson *et al.* 2009, Kosche 2004). 30 mm çapındaki boru katkı maddesi ile dolu olan boruya (6 mm) merkezlenecek şekilde zemin içerisine batırılmıştır. Daha sonra 6 mm lik borunun içerisindeki katkı maddesi zeminde kalacak şekilde boru yukarıya doğru dikkatlice çekilerek 30 mm borunun içerisine karıştırıcı daldırılmıştır. Karıştırıcının hızı 60 rpm olarak seçilmiştir. Karıştırıcı aşağıdan yukarıya doğru yavaşça çekilerek zemin ile katkı malzemesi karıştırılıp 30 mm çapında, 110 mm yüksekliğindeki kolon imal edildikten sonra boru zeminden çıkarılmıştır. Bu sürecin şematik sıralaması Şekil 3.8 gösterilmiştir. Hazırlanan numuneler plastik örtü ile sarılarak 7, 14, 28, 56 ve 112 gün uygun kür şartlarında (40% sabit nem, 20 ± 3 °C sabit sıcaklıkta) bekletilmiştir (Şekil 3.9a-b).

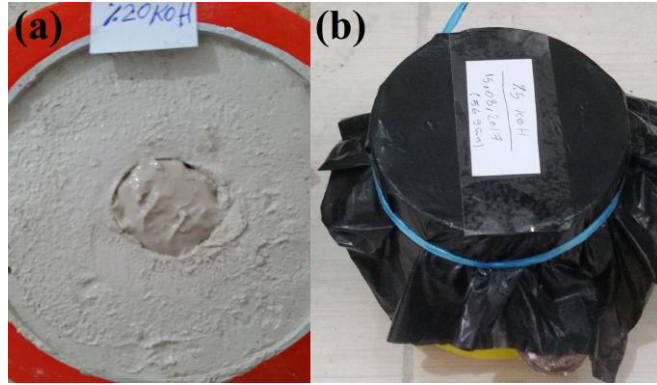
Kür sürlerinin sonunda kolon kenarından 5, 10, 15, 20 ve 25 mm uzaklıklarda Cu (Pham 2012 and Larsson *et al.* 2009), pH (ASTM D4972), EC (Rayment and Higginson, 1992) ve su muhtevası (ASTM D2216) deneyleri yapılmıştır.



Şekil 3.7. %40 su muhtevasında CL nin kalıplara doldurulması



Şekil 3.8. Kolon imalat aşamaları



Şekil 3.9. a) 30 mm çapında kolonun DMM ile uygulanması, b) numunelerin plastik örtü ile kapatılması ve kür odasında bekletilmesi.

Çizelge 3.6. KMD numunelere ait deney programı

No	Katkı	Katkı yüzdesi (%)	Katkı miktarı (gr)	Kür süresi (gün)	Toplam numune
1	NaAL	0,25	0,247	7, 14, 28, 56, 112	5
2	NaAL	0,5	0,495	7, 14, 28, 56, 112	5
3	NaAL	0,75	0,743	7, 14, 28, 56, 112	5
4	NaAL	1	0,991	7, 14, 28, 56, 112	5
5	NaOH	1	0,991	7, 14, 28, 56, 112	5
6	NaOH	3	2,973	7, 14, 28, 56, 112	5
7	NaOH	5	4,955	7, 14, 28, 56, 112	5
8	NaOH	7	6,37	7, 14, 28, 56, 112	5
9	NaOH	10	9,91	7, 14, 28, 56, 112	5
10	NaOH	15	14,865	7, 14, 28, 56, 112	5
11	NaOH	20	19,82	7, 14, 28, 56, 112	5
12	KOH	1	0,991	7, 14, 28, 56, 112	5
13	KOH	3	2,973	7, 14, 28, 56, 112	5
14	KOH	5	4,955	7, 14, 28, 56, 112	5
15	KOH	7	6,37	7, 14, 28, 56, 112	5
16	KOH	10	9,91	7, 14, 28, 56, 112	5
17	KOH	15	14,865	7, 14, 28, 56, 112	5
18	KOH	20	19,82	7, 14, 28, 56, 112	5

Derin karıştırma kolonlarının hazırlanmasında kullanılan katkı miktarı ve kür süreleri Çizelge 3.6’da verilmiştir. Kolon uygulamasında katkı miktarının hesaplanması için aşağıdaki yöntem kullanılmıştır.

Metal boru : çap= 30 mm, boy = 110 mm

W_1 = metal boru ağırlığı = 72.16 gr

$W_2 = \%40$ su muhtevasında CL + $W_1 = 210.90$ gr

$W_3 = \%40$ su muhtevasında CL ağırlığı = $W_2 - W_1 = 138.74$ gr

$W_4 =$ CL'nin kuru ağırlığı = $138.74 * 100 / 140 = 99.1$ gr

$W_5 =$ katkı ağırlığı = $W_4 * \text{katkı yüzdesi}$

3.2.2.a. Drenajsız kayma mukavemet (Cu) deneyi

Küçük ölçekli kalıplarda derin karıştırma yöntemi ile hazırlanan kolon kenarında yumuşak kilin drenajsız kayma mukavemetinin (Cu) belirlenmesinde düşen koni penetrasyon deneyinden yararlanılmıştır. Cu değeri ile konik uç batma miktarı arasındaki ilişki dikkate alınarak Pham (2012) tarafından aşağıda verilen formül ile Cu değeri elde edilmiştir. Cu değerlerinin belirlenmesinde kolon kenarından 5, 10, 15, 20 ve 25 mm uzaklıkta drenajsız kayma mukavemet deneyi yapılmıştır.

$$C_u = C_g \frac{m}{i^2} \quad (2)$$

burada

$C_u =$ drenajsız kayma mukavemeti (kPa),

$C =$ zemin ve koni arasındaki açıya göre belirlenir (30 °C için $C=0,8$),

$g =$ yer çekim ivmesi (9,81 m/s²),

$m =$ konik uç ağırlığı (gr),

$i =$ konik uç batma miktarı (mm).

3.2.2.b. pH ölçümü (Power of Hydrogen)

pH, power of hydrogen (Hidrojenin Gücü) kelimelerinin baş harflerinden oluşan kısaltma ile gösterilir. Bir maddenin pH değeri hidrojen iyonu [H^+] ile hidroksit iyonunun [OH^-] derişimlerinin oranı olarak tanımlanabilir. Bu değer 0-14 değeri arasında değer almaktadır. 0 aşırı asidik, 7 nötr, 14 aşırı bazik olduğunu göstermektedir. Küçük ölçekli kalıplarda derin karıştırma yöntemi ile hazırlanan kolon kenarından belirli uzaklıklardaki yumuşak kilin pH değeri ASTM D4972 standardına uygun olarak belirlenmiştir. pH

değerlerinin belirlenmesinde kolon kenarından 5, 10, 15, 20 ve 25 mm uzaklıkta ve 20 mm derinlikten numune alınmıştır.

3.2.2.c. Elektriksel iletkenlik (EC) deneyi

Elektrik iletkenliği, bir ortam içerisindeki elektrik yüklerinin bir noktadan başka bir noktaya taşınması olarak tanımlanmaktadır. İletkenliğin malzeme içerisinde yük taşıyan atomik boyutlardaki elemanlar tarafından gerçekleştirildiği düşünülmektedir (Erat 2007). Küçük ölçekli kalıplarda derin karıştırma yöntemi ile hazırlanan kolon kenarından belirli uzaklıklardaki yumuşak kilin EC deneyi yapılmıştır. Yumuşak kilin EC değerinin belirlenmesinde Rayment and Higginson (1992) dikkate alınmıştır. EC değerlerinin belirlenmesinde kolon kenarından 5, 10, 15, 20 ve 25 mm uzaklıkta ve 20 mm derinlikten numune alınmıştır.

3.2.2.d. Su muhtevası deneyi

Küçük ölçekli kalıplarda derin karıştırma yöntemi ile hazırlanan kolon kenarından belirli uzaklıklardaki yumuşak kilin su muhtevası belirlenmesinde ASTM D2216 standardı kullanılmıştır. Su muhtevası değerlerinin belirlenmesinde kolon kenarından 5, 10, 15, 20 ve 25 mm uzaklıkta ve 20 mm derinlikten numune alınmıştır. Numuneler 24 saat 105 °C sıcaklıkta etüvde bekletildikten sonra aşağıdaki bağıntı ile su muhtevası hesaplanmıştır.

$$W = \frac{M_w}{M_s} * 100 \quad (3)$$

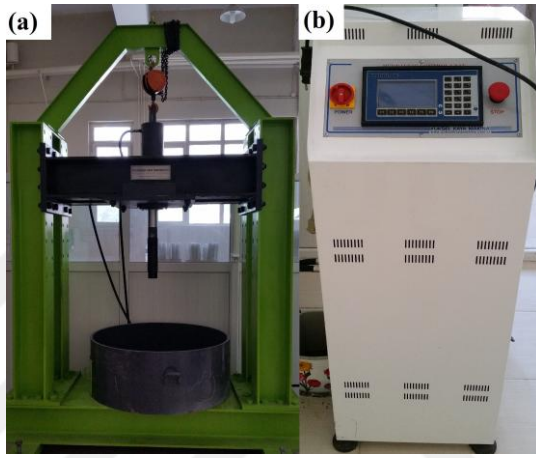
M_w = zeminde su ağırlığı, (gr)

M_s = zeminin kuru haldeki ağırlığı, (gr)

3.2.3. Üçüncü aşama, derin karıştırma uygulanmış büyük ölçekli model deneyler (BMD)

Bu aşamada çapı 1000 mm ve yüksekliği 400 mm olan büyük ölçekli silindirik tankta deneyler yapılmıştır (Şekil 3.10a-b). Deney haznesinin et kalınlığı 2 cm olup düşey yükler

altındaki muhtemel yanal deformasyonları karşılayacak kalınlıktadır. Birinci aşamada serbest basınç deneyinde en iyi sonucu %1 NaAL'ın 28 günlük kür süresinde vermiştir. Ancak bu yüzdede derin karıştırma yöntemiyle karıştırma çok zor olduğundan tercih edilmemiştir. Tank deneyinde ikinci aşamadan elde edilen deney sonuçları ve işlenebilirliği iyi olması nedeniyle %20 NaOH tercih edilmiştir. Bu deneylerde yük-düşey deformasyon ilişkisi ve boşluk suyu basıncı (U) -zaman ilişkisi belirlenmiştir.



Şekil 3.10. a) Deneylerde kullanılan model tank, b) yükleme ünitesi

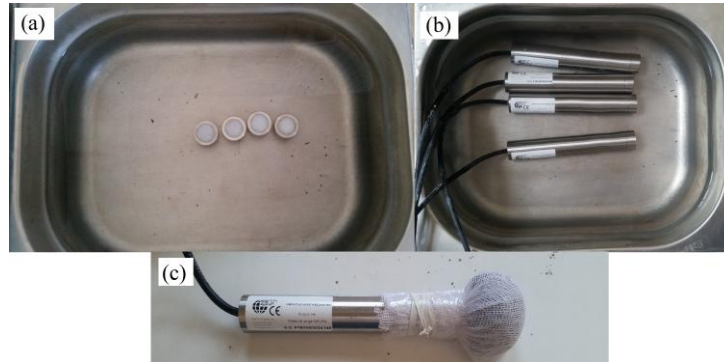
BMD lerinde kolonların imalatı üç adımda gerçekleştirilmiştir; birinci adımda, büyük ölçekli tankın içerisine, önceden belirlenen su miktarı (%40) dökülmüş ve ardından kuru halde kil yavaş yavaş tankın içerisine ilave edilerek yumuşak kil zemin hazırlanmıştır (Şekil 3.11a-b). Hazırlanan su-kil karışımının homojen hale gelmesi için üzeri plastik örtü ile kapatarak bir gün bekletilmiştir. Böylece çapı 1000 mm ve yüksekliği 200 mm olan %40 su muhtevastaki CL kili elde edilmiştir. İkinci adımda, yükleme süresince meydana gelecek boşluk suyu basınç değişimini (ΔU) belirliyelemek amacıyla piyezometre zemin tabakasının en alt kısmına yatay konumda kolon grubundan 50 mm uzaklıkta olacak şekilde yerleştirilmiştir. Deneyde kullanılan piyezometrenin veri almasında hata payını minimuma indirmek amacıyla piyezometrenin uc kısmında bulunan poroz başlık çıkarılmış ve önceden kaynatılıp soğutulan damıtık su içerisine daldırılarak 24 saat bekletilmiştir. Böylece poroz başlıktaki muhtemel hava kabarcıklarının çıkması sağlanmıştır (Şekil 3.12a). Hava kabarcıkları alınan poroz başlık damıtık su içerisinde tekrar piyezometreye takılmış ve suda bekletilmiştir (Şekil 3.12b). Piyezometrenin poroz başlıklarının kil daneleri ile tıkanmasını önlemek amacıyla kum

yastığı hazırlanmış ve su içerisinde piyezometrenin poroz başlık kısmına yerleştirilmiştir (Şekil 3.12c). Bu süreçlerden sonra piyezometreler büyük tank deneyde kullanılmıştır. Daha sonra kil yüzeyi düzeltilerek kolon uygulamasına hazırlanmıştır.

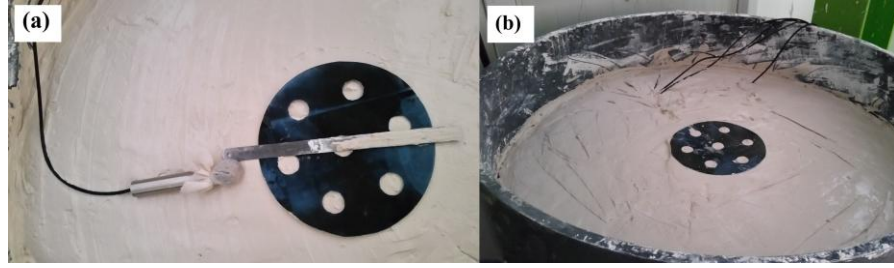
Üçüncü ve son adımda derin karıştırma yöntemi ile tekli, üçlü ve yedili kolonlar için hazırlanan şablonlar zemin üzerine yerleştirilmiş (Şekil 3.13a-b) ve kolonlar bölüm 3.2.2 de belirtildiği gibi imal edilmiştir (Şekil 3.14a-b-c-d). Karıştırıcının hızı 60 rpm olarak seçilmiştir. Kolonlar imal edildikten sonra (Şekil 3.15a-b-c) nem içeriğini koruyabilmek için tankın üzeri plastik örtü ile iyice kapatılmıştır. Nem içeriği kontrol etmek amacıyla higrometre kullanılmıştır (Şekil 3.16a-b). 28 günlük kür süresinin sonunda kolonlar üzerine uygun çaplardaki başlıklar konularak yükleme deneyi yapılmış ve yük-düşey deformasyon verileri belirli zaman aralıklarında data logger ile kaydedilmiştir. Yükleme sırasındaki boşluk suyu basıncı değişimi (ΔU) piyezometrenin bağlandığı mini logger ünitesi ile kaydedilmiştir. ΔU sadece yedili kolon grubunun yüklenmesi sırasında ölçülmüştür.



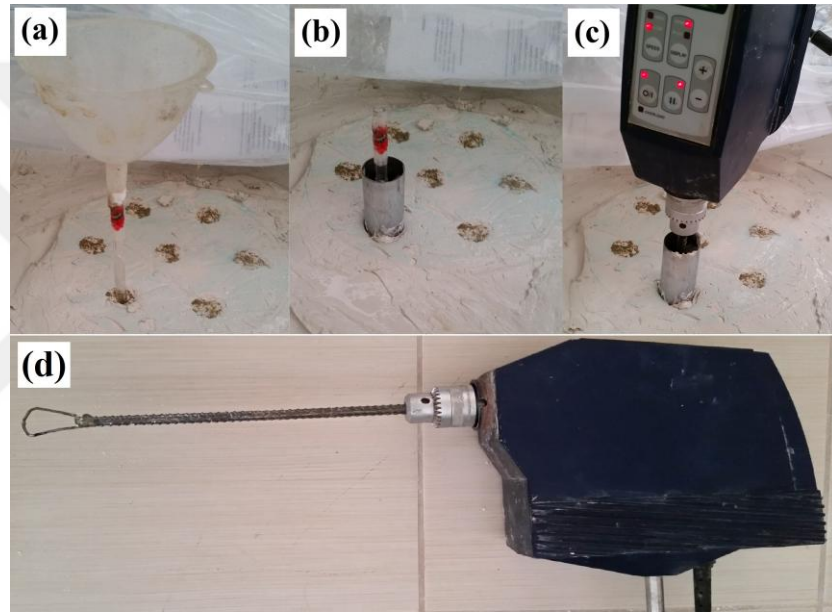
Şekil 3.11. a) Su ve CL kilinin kalıba doldurulması, b) kil-su karışımını mekanik karıştırıcı ile karıştırılması



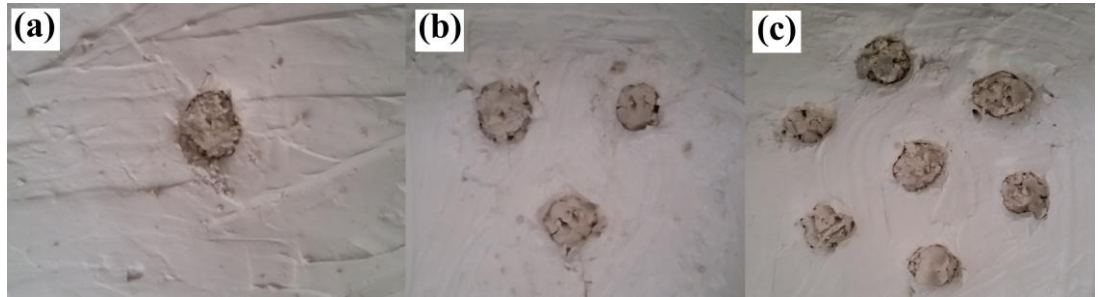
Şekil 3.12. a) Damıtık suda bekletilen poroz başlıklar, b) poroz başlıkların piyezometreye takılması, ve c) kum yastığının yerleştirilmesi



Şekil 3.13. a) Kum yastığı ile hazırlanan piyezometre ve kolon uygulamasında kullanılan şablon, b) piyezometrelerin yumuşak kile yerleştirilmesi ve kil yüzeyinin düzlenmesi



Şekil 3.14. a) Kuru halde kimyasalın zemine enjekte edilmesi, b) 3 cm borunun zemine sokulması, c) karıştırıcı ile kimyasal ve kil zemininin karıştırılması, ve d) deneyde kullanılan karıştırıcı



Şekil 3.15. Yumuşak kil zeminde uygulanan a) tekli, b) üçlü, ve c) yedili derin karıştırma kolonları

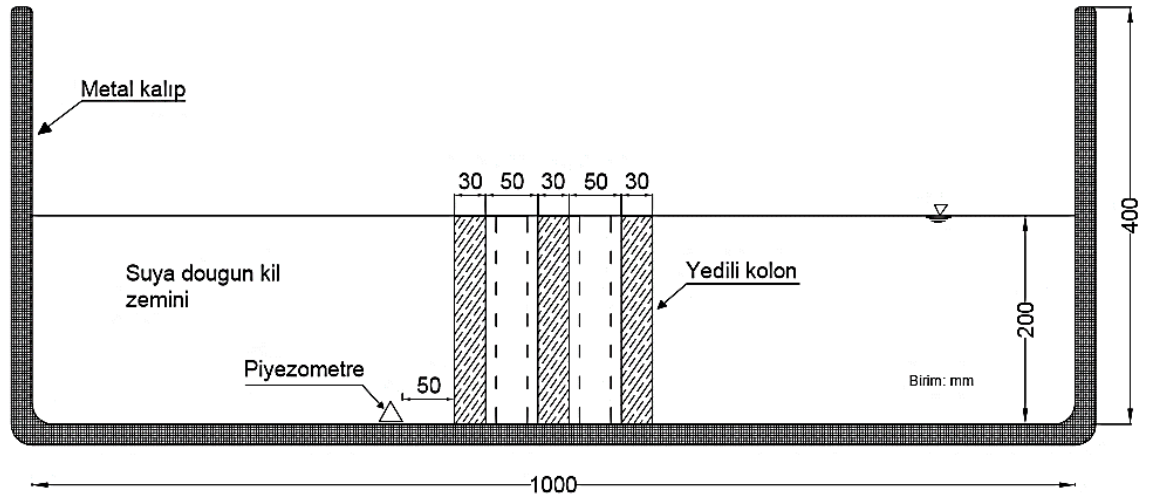


Şekil 3.16. a) Plastik örtü ile numunenin kapatılması, ve b) ortamın rutubetini ölçen higrometre

Deneylerde kullanılan piyezometreye ait özellikler Çizelge 3.7 de ve yedili kolonların etrafında yerleştirilen piyezometrenin şematik görüntüsü Şekil 3.17 da verilmiştir.

Çizelge 3.7. Piyezometreye ait özellikler

Çalışma prensibi	Basınç aralığı	Hassasiyet	Tip	Çıkış	18 °C – 993 mbar basınç ve %55 bağıl nem ortamında % hata ölçmesi
Vibrating wire	0-345 kPa	+/- %0,1	Bacalı olmayan	Hz	±0.02



Şekil 3.17. Model tank deneyinde kullanılan piyezometre

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Ön deneylerin serbest basınç mukavemet (q_u) sonuçları

Farklı maddeler kullanılarak yapılan ön deneylerin q_u değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelge 4.1’de verilen deney sonuçlarına göre NaAL, NaOH ve KOH seçilerek tez çalışmasına bu üç madde ile devam edilmiştir.

Çizelge 4.1. Ön deneylerin q_u değerleri

NO	Katkı madde	Kullanılan yüzdelere	7 günlük q_u değeri (kPa)	14 günlük q_u değeri (kPa)	28 günlük q_u değeri (kPa)
1	Sodyum aljinat	%0,25	663	713	731
		%0,5	740	943.5	2024
		%0,75	838	1022	2441,5
		%1	842	1036.5	5346,5
2	Selüloz	%3	62	138	264
		%5	68	186	271
		%10	56	78	34
		%15	38	47	uygulanmadı
3	Kalsiyum oksit	%3	74	177	536
		%5	98	202	643
		%10	124	256	841
		%15	136	169	199
4	Magnezyum oksit	%3	44	134	333
		%5	67	144.5	358
		%10	88.5	203	496
		%15	102	227	687
5	Metil selüloz	%3	24	88	174
		%5	32	93	182
		%10	48	114	201
		%15	63	133	247
6	Sodyum karboksimetil selüloz	%3	57	78.5	82
		%5	63.5	86	98
		%10	94	114	154
		%15	123	137	103
7	Sodyum karbonat	%3	78	103	256
		%5	91	146	289
		%10	118	194	218
		%15	127	234	184

Çizelge 4.1. (Devam)

NO	Katkı madde	Kullanılan yüzdeler	7 günlük q_u değeri (kPa)	14 günlük q_u değeri (kPa)	28 günlük q_u değeri (kPa)
8	Sodyum hidroksit	%3	542	726	739
		%5	606	898	1055
		%10	672	1195	1698
		%15	175	169	170
9	Potasyum hidroksit	%5	606	898	1055
		%10	672	1195	1698
		%15	175	169	170
		%15	170	362	1173
10	D-glikoz	%3	66	89	163
		%5	71	97	177
		%10	83	101.5	234
		%15	110	158	299
11	Pirinç kabuğu külü	%3	47	93	118
		%5	49	132	217,5
		%10	63	179.5	607
		%15	91	209	969

4.2. Serbest basınç mukavemet (UCS) Deney Sonuçları

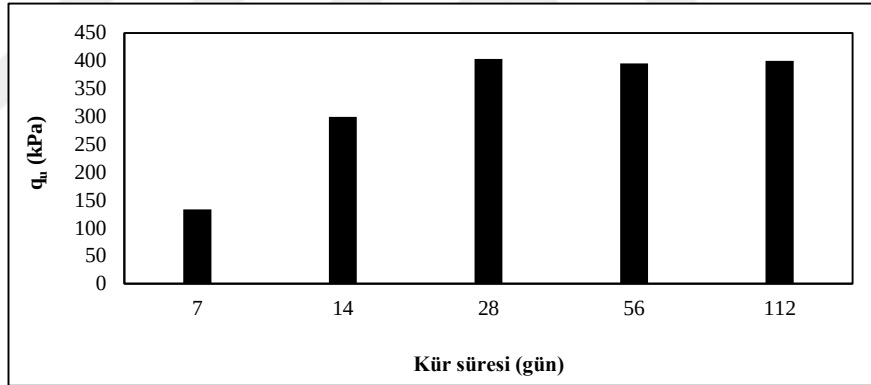
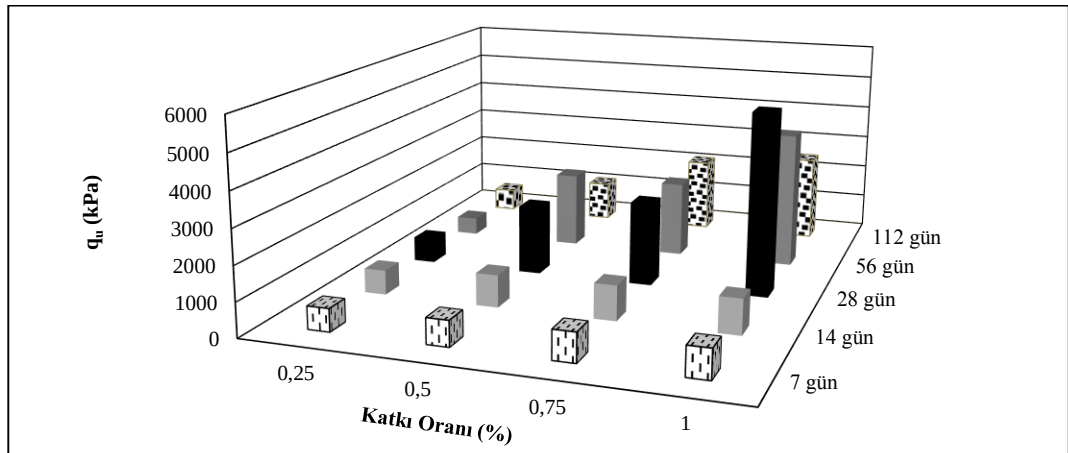
Birinci aşamada hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç mukavemet (UCS) deneyi yapılmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen q_u değerlerinin ortalamaları toplu halde Çizelge 4.2’de verilmiştir. UCS deney sonuçları kullanılarak katkısız CL’nin q_u -kür süresi ilişkisi Şekil 4.1’de ve NaAL, NaOH ve KOH katkılı CL numunelerine ait q_u -katkı oranı-kür süresi deney sonuçları ise sırasıyla, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’te gösterilmiştir.

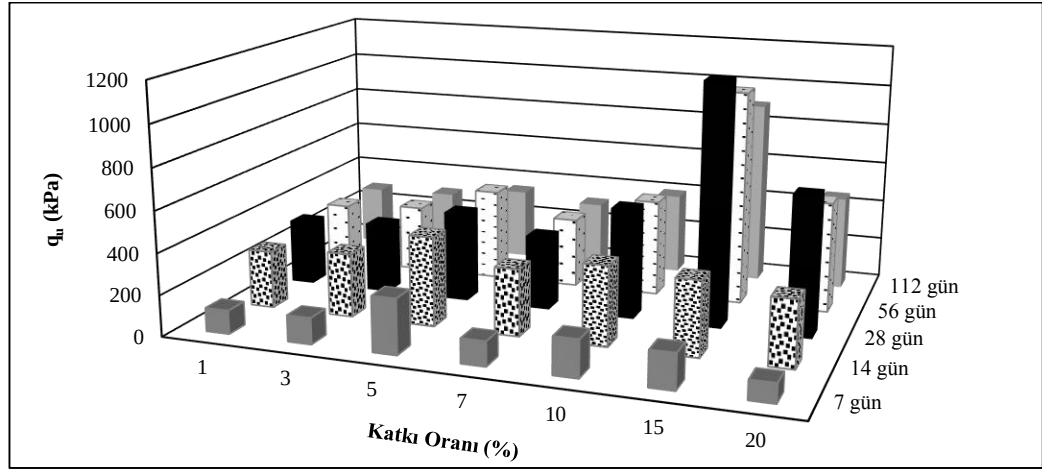
Çizelge 4.2. Biyopolimer ve kimyasal katkılı CL’nin q_u deney sonuçları

No	Katkı	Katkı Oranı (%)	q_u (kPa) 7 gün	q_u (kPa) 14 gün	q_u (kPa) 28 gün	q_u (kPa) 56 gün	q_u (kPa) 112 gün
1	NaAL	0,25	663	713	731	513	650,5
2	NaAL	0,5	740	943.5	2024	2220	1163
3	NaAL	0,75	838	1022	2441,5	2226	2168,5
4	NaAL	1	842	1036.5	5346,5	4011	2525,5
5	NaOH	1	421	570	582	271.5	193

Çizelge 4.2. (Devam)

No	Katkı	Katkı Oranı (%)	q_u (kPa) 7 gün	q_u (kPa) 14 gün	q_u (kPa) 28 gün	q_u (kPa) 56 gün	q_u (kPa) 112 gün
6	NaOH	3	542	726	739	479	386
7	NaOH	5	606	898	1055	994	805
8	NaOH	7	626	960	1486	1406	1374
9	NaOH	10	672	1195	1698	2178	2004
10	NaOH	15	175	169	170	1324	1163
11	NaOH	20	20	20	30	1249	1656
12	KOH	1	114	280	319	301	293
13	KOH	3	127	310	343	328	301
14	KOH	5	267	435	440	450	350
15	KOH	7	118	324	460	341	317
16	KOH	10	179	385	537	472	399,5
17	KOH	15	170	362	1173	1046	903
18	KOH	20	91	323	678	540	459

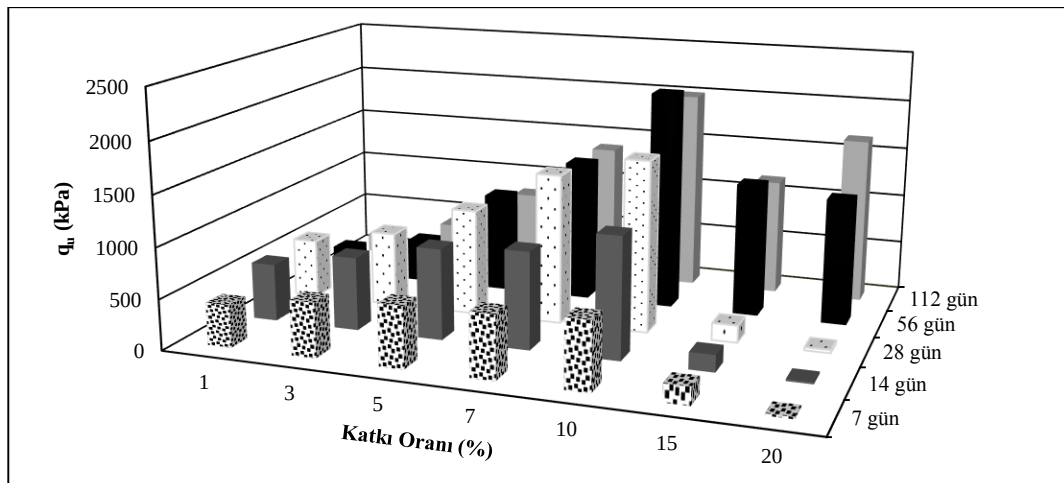
Şekil 4.1. q_u -Kür süresi ilişkisi (katkısız CL kili)Şekil 4.2. q_u -Katkı oranı-Kür süresi ilişkisi (NaAL katkılı CL)



Şekil 4.3. q_u -Katkı oranı-Kür süresi ilişkisi (NaOH katkılı CL)

Katkısız CL'nin q_u değerinde 28 günlük kür süresine kadar artış gözlenirken bu kür süresinden sonra önemli bir değişiklik meydana gelmediği Şekil 4.1'de görülmektedir.

Şekil 4.2'de, NaAL katkı oranının artmasıyla genel olarak q_u değerinde artış gözlenmiştir. Öte yandan 28 gün kür süresine kadar NaAL'ın tüm oranlarında q_u değerlerinin arttığı daha sonra azalma eğilimi gösterdiği Şekil 4.2'de gözlenmektedir. Şekil 4.2 ve Çizelge 4.1 birlikte incelendiğinde maksimum q_u değeri NaAL'ın %1 oranı ve 28 günlük kür süresinde yaklaşık 5347 kPa (5,347 MPa) olarak elde edilmiştir. Bu değer katkısız CL kilin aynı kür süresi ile karşılaştırıldığında yaklaşık %1227 olduğu görülmektedir.



Şekil 4.4. q_u -Katkı oranı-Kür süresi ilişkisi (KOH katkılı CL)

Şekil 4.3 incelendiğinde NaOH katkı oranının artması ile %10 NaOH katkı oranına kadar genel olarak q_u değerinin arttığı bu değerden sonra q_u değerinin azalışa geçtiği izlenmektedir. Yine Şekil 4.3'te 56 günlük kür süresine kadar q_u değerinde genel olarak bir artış olduğu gözlenmektedir. Şekil 4.3 ve Çizelge 4.1 birlikte incelendiğinde maksimum q_u değeri NaOH'ın %10 oranı ve 56 günlük kür süresinde yaklaşık 2178 kPa (2,178 MPa) olarak elde edilmiştir. Bu değer katkısız CL kilinin maksimum q_u değeri ile kıyaslandığında yaklaşık olarak %540,5 arttığı ancak NaAL'ın maksimum q_u değerine göre kıyaslandığında yaklaşık %245,5 az olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 4.4 incelendiğinde diğer katkı maddelerinden farklı olarak KOH katkı oranının artması ile %5 KOH katkı oranına kadar genel olarak q_u değerinin arttığı bu değerden sonra %7 KOH oranında azaldığı ve daha sonra %15 oranına kadar tekrar artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Şekil 4.4, 28 günlük kür süresine kadar q_u değerinde genel olarak bir artış olduğunu göstermektedir. Şekil 4.4 ve Çizelge 4.1 birlikte incelendiğinde maksimum q_u değeri KOH'ın %15 oranı ve 28 günlük kür süresinde yaklaşık 1173 kPa (1,173 MPa) olarak elde edilmiştir. Bu değer katkısız CL kilinin maksimum q_u değeri ile kıyaslandığında yaklaşık olarak %291 arttığı, NaAL'ın maksimum q_u değerine göre kıyaslandığında yaklaşık %456 düşük olduğu ve NaOH'ın maksimum q_u değeri ile kıyaslandığında yaklaşık %186 düşük olduğu görülmüştür.

Serbest basınç mukavemeti deneylerinde NaAL, NaOH ve KOH ile hazırlanan her bir numuneye ait kırılma şekilleri sırasıyla Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

4.2.1. X – ışını kırınımı (XRD) analiz sonuçları

Biyopolimer (NaAL) ve kimyasalların (NaOH ve KOH) CL kiline etkisini araştırmak amacıyla XRD analizi yapılmıştır. Bu amaçla, UCS deneyinden maksimum değerler (%1 NaAL, %10 NaOH ve %15 KOH) üzerinde analiz gerçekleştirilmiştir. Katkısız CL kiline ait XRD analiz sonucu Şekil 4.8'de, NaAL, NaOH ve KOH katkılı CL kilinin sonuçları ise sırasıyla Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de verilmiştir.

Şekil 4.5. Kırılma şekilleri (NaAL+CL)

Katkı oranı	NaAL			
	%0,25	%0,5	%0,75	%1
7 gün				
14 gün				
28 gün				
56 gün				
112 gün				

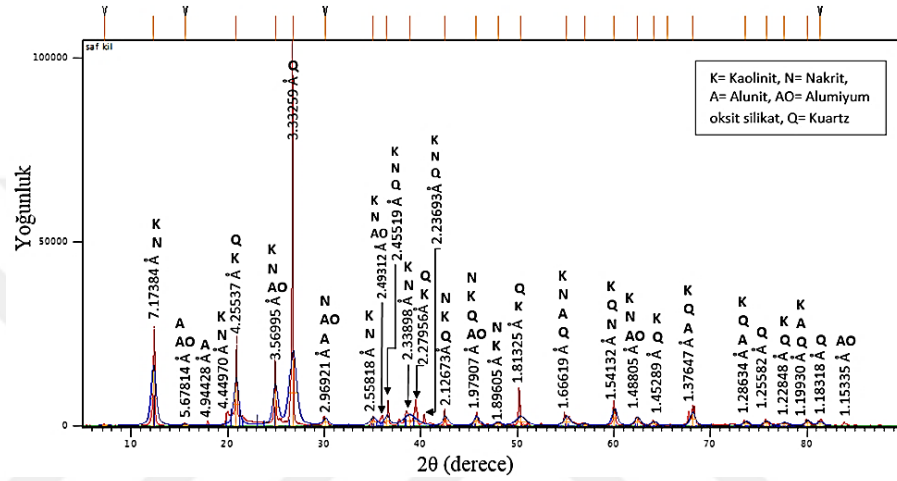
Şekil 4.6. Kırılma şekilleri (NaOH + CL)

Katkı oranı	NaOH						
	%1	%3	%5	%7	%10	%15	%20
7 gün							
14 gün							
28 gün							
56 gün							
112 gün							

Şekil 4.7. Kırılma şekilleri (KOH + CL)

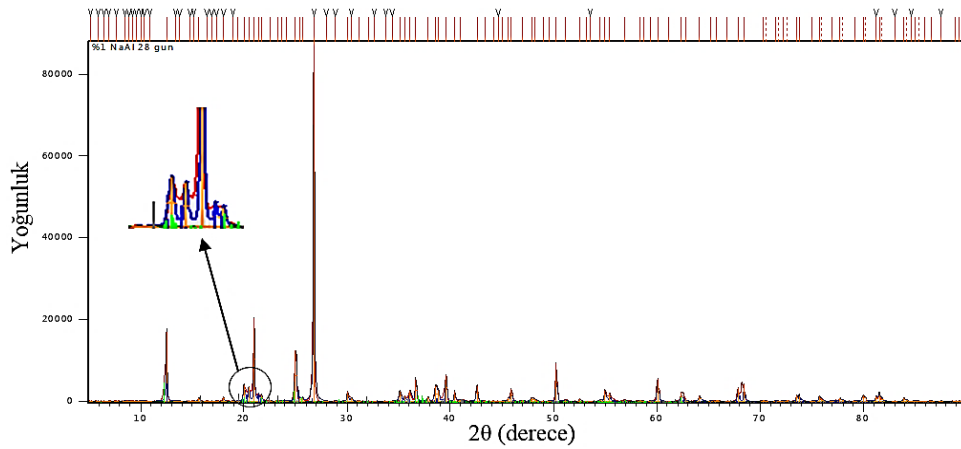
Katkı oranı	KOH						
	%1	%3	%5	%7	%10	%15	%20
7 gün							
14 gün							
28 gün							
56 gün							
112 gün							

XRD analizleri EMPYREAN Difraktometre sisteminde ve PANalytical ölçme programı kullanılarak incelenmiştir. XRD ölçümleri, Cu-Ku kaynağından $\lambda=1,54060$ Å dalga boyunda, $5-90^\circ$ tarama aralığında, 2 derece/dk tarama hızında ve 0.0260 derece tarama adımında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen yansıma pikleri mevcut JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) dosyası ile karşılaştırılmıştır.



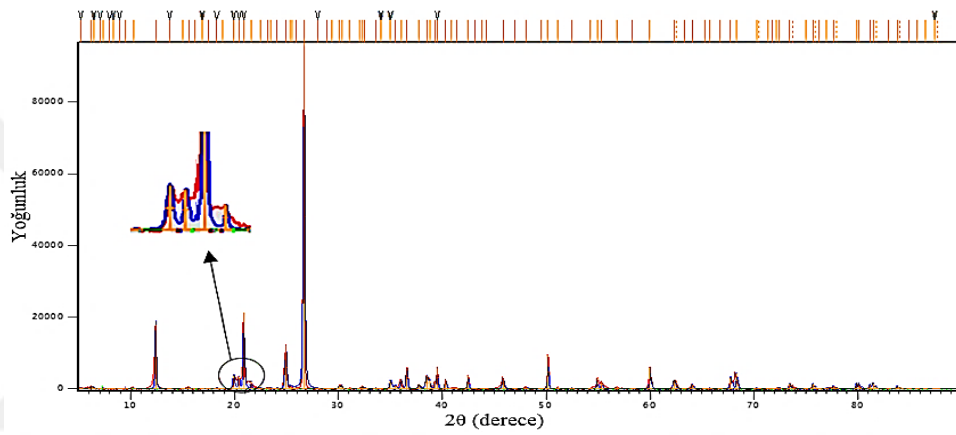
Şekil 4.8. XRD analizi (CL)

Şekil 4.8 incelendiğinde düşük plastisiteli kilde (CL) oluşan belirgin piklerden dolayı, kristal bir yapıya sahip olduğu anlaşılmaktadır. Yine şekilden CL kilin yapısı kaolinite [$H_4 Al_2 O_9 Si_2$], nacrite [$H_4 Al_2 O_9 Si_2$], alunite [$H_6 Al_3 K_1 O_{14} S_2$], aluminum oxide silicate [$Al_2 (Si O_4) O$] ve Quartz [$Si O_2$] minerallerinden oluştuğu görülmektedir.



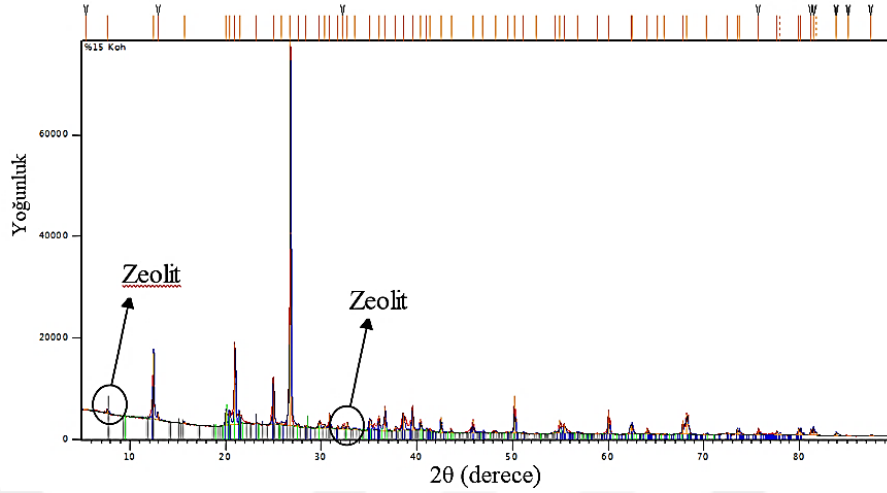
Şekil 4.9. XRD analizi (CL + %1 NaAl, 28 gün)

Şekil 4.9'dan görüldüğü üzere CL kili ile NaAL'ın ve ortamdaki suyun reaksiyona girmesiyle piklerin yoğunluğu önemli derecede azalmıştır. Aynı zamanda bu reaksiyonlar neticesinde yeni piklerin de ($2\theta = 21^\circ\text{C}$) olduğu şekilden anlaşılmaktadır. CL kili ile NaAL'ın reaksiyon sonucunda sodyum alüminyum silikat hidrat $[\text{Na}_{12.8} (\text{Al}_{7.2} \text{Si}_{16.8} \text{O}_{48})(\text{H}_2\text{O})_{6.84}]$, sodyum alüminyum silikat hidrat $[\text{Na}_{3.6} \text{Al}_{3.6} \text{Si}_{12.4} \text{O}_{32.14} \text{H}_2\text{O}]$, sodyum hidrojen alüminyum silikat $[\text{Na}_{3.06} \text{H}_{4.14} (\text{Al}_{7.2} \text{Si}_{40.8} \text{O}_{96})]$ ve sodyum hidrojen alüminyum silikat $[\text{Na}_{60} \text{H}_{32} (\text{Si}_{100} \text{Al}_{92} \text{O}_{384})]$ ortaya çıktığı şekilden gözlenmektedir.



Şekil 4.10. XRD analizi (CL + %10 NaOH, 56 gün)

CL kili, NaOH ve ortamdaki suyun reaksiyona girmesiyle piklerin yoğunluğunda kayda değer bir azalmanın olduğu Şekil 4.10'da izlenilmektedir. Aynı zamanda bu reaksiyonlar neticesinde yeni piklerin de ($2\theta = 20^\circ\text{C}$) olduğu şekilden anlaşılmaktadır. CL kili ile NaOH'ın reaksiyon sonucunda sodyum alüminyum silikat hidrat $[\text{Na}_{57} \text{Al}_{57} \text{Si}_{135} \text{O}_{384} (\text{H}_2 \text{O})_{3.8}]$, sodyum hidrojen alüminyum silikat $[(\text{Na}_{7.36} \text{H}_{1.64}) \text{Al}_9 \text{Si}_{15} \text{O}_{48} (\text{H}_2 \text{O})_{4.68}]$, sodyum hidrojen alüminyum silikat $[\text{Na}_{3.5} \text{H}_{19.9} (\text{Al}_{22.4} \text{Si}_{73.6} \text{O}_{192})]$, hidrojen sodyum alüminyum silikat $[(\text{H}_{72} \text{Na}_3) ((\text{Si}_{117} \text{Al}_{75}) \text{O}_{384})]$ ortaya çıkmaktadır.

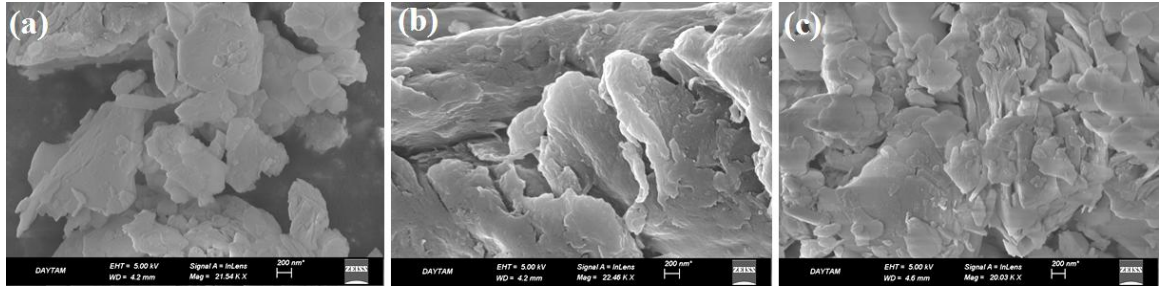


Şekil 4.11. XRD analizi (CL + %15 KOH, 28 gün)

Şekil 4.11 incelendiğinde CL kili, KOH ve ortamdaki suyun reaksiyona girmesiyle diğer katkı maddelerinde gözlemlendiği gibi piklerin yoğunluğunda belirgin azalmalar meydana geldiği görülmektedir. Reaksiyonlar neticesinde yeni piklerin de ($2\theta = 8^\circ\text{C}$, 31°C ve 32°C) olduğu şekilde görülmektedir. CL kili ile KOH'ın reaksiyon sonucunda alüminyum silikat ($\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}$) ve zeolit ($\text{Al}_5\text{K}_5\text{O}_{72}\text{Si}_{31}$) ortaya çıkmıştır.

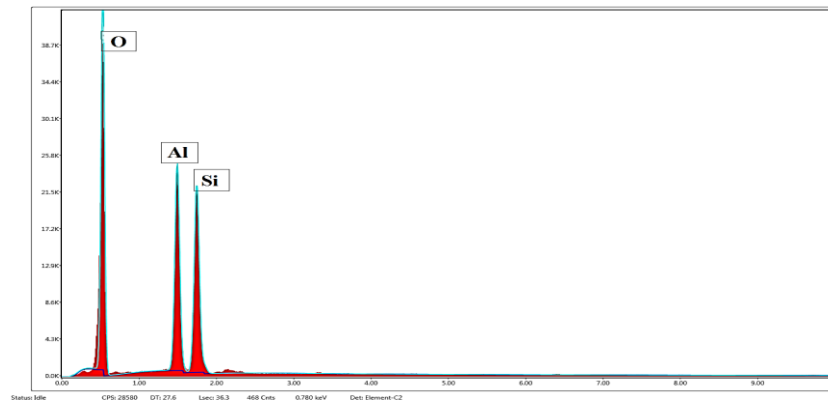
4.2.2. SEM/EDX analiz sonuçları

Biyopolimer ve kimyasal katkıların Likit limit değerinde ($\text{WL}=\%40$) CL kiline etkisini araştırmak amacıyla SEM/EDX analizi yapılmıştır. Bu amaçla UCS deneyleri sonucunda her bir katkı malzemesi için maksimum değerleri veren numuneler seçilerek SEM/EDX analizine tabi tutulmuşlardır. SEM analizi sonucunda CL kili, NaAL, %1 NaAL+CL görüntüleri Şekil 4.12' de, CL kili, NaOH, %10 NaOH+CL görüntüleri Şekil 4.15' de ve CL kili, KOH, %15 KOH+CL görüntüleri Şekil 4.17' de gösterilmiştir. EDX analizi sonucunda CL kili, %1 NaAL+CL görüntüleri Şekil 4.13 ve Şekil 4.14' de, %10 NaOH+CL görüntüleri Şekil 4.16' da ve %15 KOH+CL görüntüleri Şekil 4.18' de gösterilmiştir.

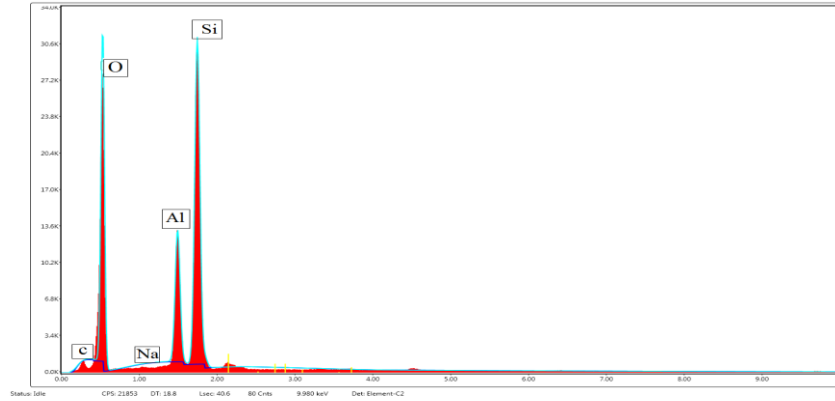


Şekil 4.12. SEM analizi (a- CL b- NaAL c- CL+%1 NaAL, 28 gün- büyüklük 200 nm)

Şekil 4.12a'dan anlaşılacağı üzere katkısız CL kilinin yapısında mikro boşlukların mevcut olduğu ve kil tabakalarının birbirini çok iyi tutamamaktadırlar. Şekil 4.12b'de NaAL'ın yapısı saf olmayan, pürüzlü ve boşluklu olmayan (dolu) bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Şekil 4.12c'de CL kiline %1 oranında NaAL ilave edildikten sonra daha sıkı, boşluksuz, sürekli kil minerallerinin tabakaları ile birlikte NaAL tabakaları ve aralarında boşluk olmayan sıkı bir yapı meydana geldiği görülmektedir. Mikroyapı şekillerden görüldüğü gibi CL yapısında %1 NaAL kullanarak boşluklu durumdan, sıkı ve boşluksuz yapıya dönmesi açıkça görülmektedir. Sonuç olarak %1 NaAL katkılı CL numunesi ile katkısız CL numunesi karşılaştırıldığında, katkılı numunede aglomerasyon neticesinde daha yoğun ve kümeleşmiş bir yapı oluştuğu ve q_u değerinin artış sebebinin bu reaksiyon sonucunda meydana geldiği söylenebilir.



Şekil 4.13. EDX analizi (CL)

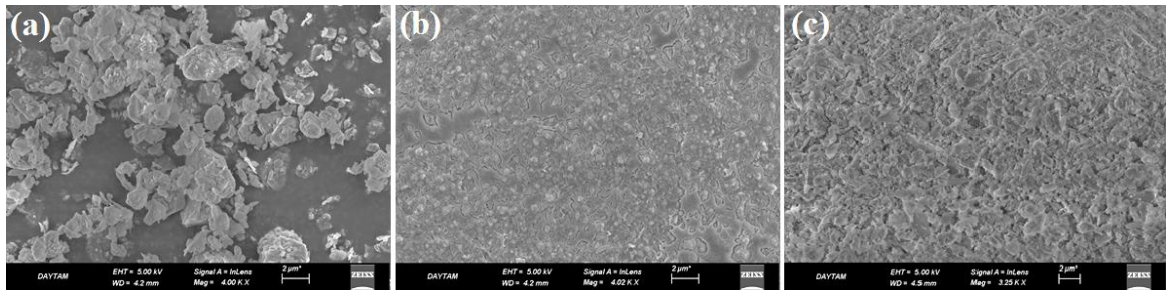


Şekil 4.14. EDX analizi (CL+%1 NaAL, 28 gün)

Çizelge 4.3. EDX elementel analiz sonuçları (CL+%1 NaAL, 28 gün)

Elementler	Ağırlık (%)						
	O	AL	Si	Na	K	H	C
CL kili	56,7	20,6	22,7	-	-	-	-
NaAL	50,2	-	-	20,3	-	-	29,6
CL + %1 NaAL	58	13,8	27,4	0,8	-	-	-

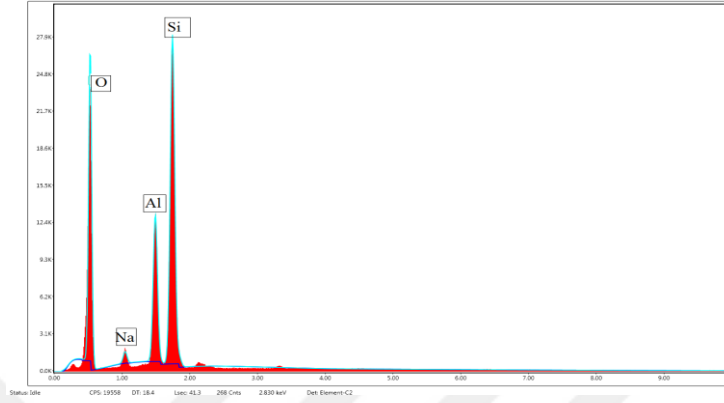
Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Çizelge 4.3 birlikte incelendiğinde CL kiline NaAL katılmasıyla elde edilen CL+%1NaAL yapısındaki Na varlığı yapıya NaAL'ın katıldığını göstermektedir.



Şekil 4.15. SEM analizi (a- CL b- NaOH c- CL+%10 NaOH, 56 gün- büyüklük 2µm)

Şekil 4.15a' incelendiğinde katkısız CL kilinin yapısının dağınık, homojen olmayan, mikro boşlukların olduğu ve kil tabakaları birbirlerini tutamadıkları açıkça görülmektedir. Şekil 4.15b'de NaOH boşluklu olmayan, düz plakaları halinde, köşeli ve homojen bir yapıya sahip olduğu anlaşılmaktadır. CL kiline %10 oranında NaOH'ın ilave edilmesiyle sıkı, boşluksuz ve homojen bir yapı elde edildiği Şekil 4.15c'de izlenmektedir. Yine Şekil 4.15c incelendiğinde kil mineralleri ile NaOH tabakaları iç içe girmeleri nedeniyle

topaklanmış, yoğun ve sürekli bir yapı ortaya çıktığı bunun sonucunda q_u değerinin arttığı söylenebilir.

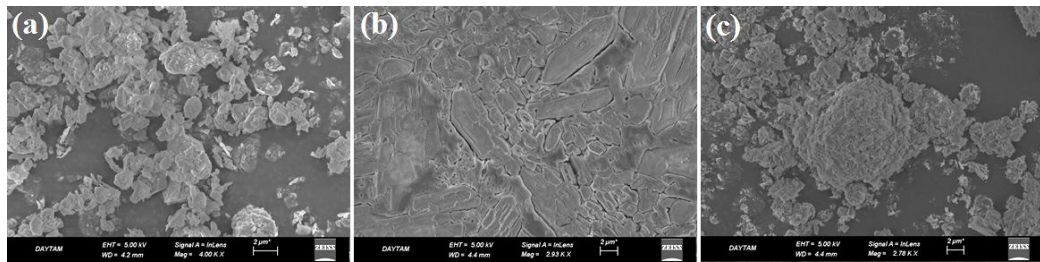


Şekil 4.16. EDX analizi (CL+%10 NaOH, 56 gün)

Çizelge 4.4. EDX elementel analiz sonuçları (CL+%10 NaOH, 56 gün)

Elementler	Ağırlık (%)						
	O	AL	Si	Na	K	H	C
CL kili	56,7	20,6	22,7	-	-	-	-
NaOH	40	-	-	57,479	-	2,52	-
CL + %10 NaOH	49,8	13,8	34,4	2	-	-	-

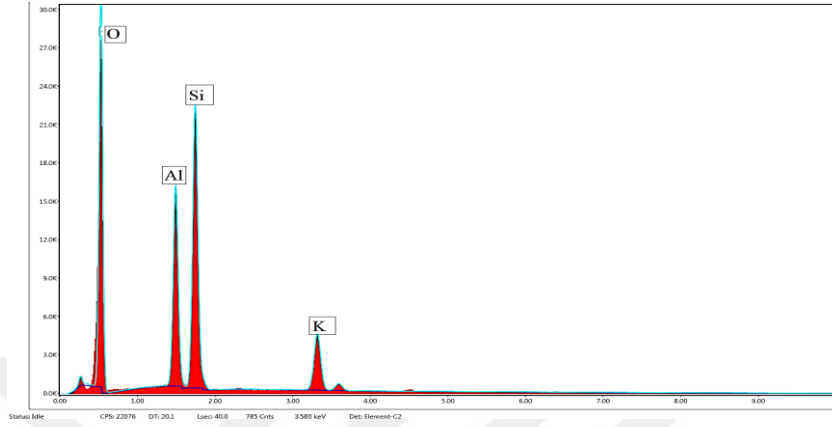
Şekil 4.16 ve Çizelge 4.4 birlikte incelendiğinde CL kiline NaOH katılmasıyla elde edilen CL+%10 NaOH yapısındaki Na varlığı yapıya NaOH'ın katıldığını göstermektedir.



Şekil 4.17. SEM analizi (a- CL b- KOH c- CL+%15 KOH, 28 gün- büyüklük 2µm)

Şekil 4.17a' dan katkısız CL kilinin yapısının dağınık, homojen olmayan, mikro boşlukların olduğu ve kil tabakaları birbirlerini tutamadığı anlaşılmaktadır. Şekil 4.17b'de görüleceği gibi KOH boşluklu olmayan, düz plakaları halinde, büyük ve küçük köşeli parçalardan oluşan homojen bir yapıya sahiptir. Şekil 4.17c'de CL kiline %15

oranında KOH'ın ilave edilmesiyle sıkı, boşluksuz bir yapı elde edilmiştir. Yine Şekil 4.17c'den anlaşıldığı gibi aglomerasyon sonucunda topaklanmış yapı ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.18. EDX analizi (CL+%15 KOH, 28 gün)

Çizelge 4.5. EDX elementel analiz sonuçları (CL+%15 KOH, 28 gün)

Elementler	Ağırlık (%)						
	O	AL	Si	Na	K	H	C
CL kili	56,7	20,6	22,7	-	-	-	-
KOH	28,5	-	-	-	69,7	1,8	-
CL + %15 KOH	55,4	14,5	22,7	-	7,4	-	-

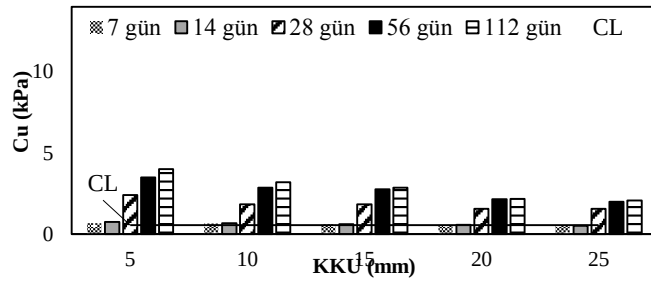
Şekil 4.18 ve Çizelge 4.5 birlikte incelendiğinde CL kiline KOH katılmasıyla elde edilen CL+%15 KOH yapısındaki K varlığı yapıya KOH'ın katıldığını göstermektedir.

4.3. Derin Karıştırma Uygulanmış küçük model deney (KMD) Sonuçları

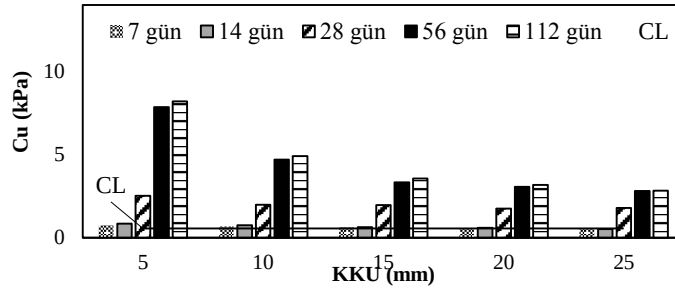
Biyopolimer ve kimyasal katkı maddeleri ile oluşturulan kolonların etki yarıçaplarını belirleyebilmek amacıyla bölüm 3.2.2'de tarif edildiği gibi oluşturulan 30 mm çap, 110 mm uzunluğundaki kolon kenarından uzaklıkları (KKU) 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm ve 25 mm mesafelerde drenajsız kayma mukavemeti (Cu), pH, elektriksel iletkenlik (EC) ve su muhtevası (w) deneyleri yapılmıştır. Kolonların uygulamasında kullanılan katkı maddeleri, katkı oranları ve kür süresi q_u numuneleri ile aynı seçilmiştir.

4.3.1. Drenajsız kayma mukavemet (Cu) deney sonuçları

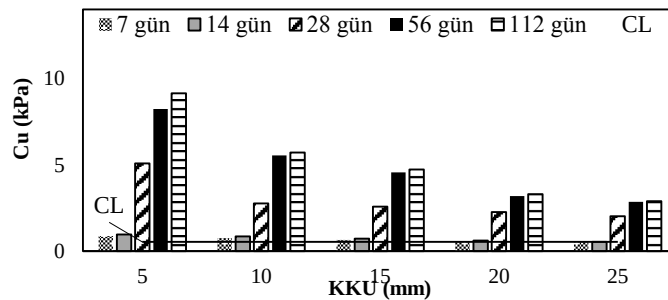
Bölüm 3.2.2.a’da izah edilen yöntemle elde edilen Cu deney sonuçları kullanılarak her bir katkı maddesi ve kür süreleri için Cu-KKU ilişkisi çizilmiştir. %0.25, %0.5, %0.75 ve %1 NaAL katkı malzemesi ilave edilerek derin karıştırma yöntemi ile oluşturulan kolonlara ait Cu-KKU ilişkisi sırasıyla Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Kolon kenarından itibaren belirlenen mesafelerde Cu değerini belirlemek için yapılan düşen koni penetrasyon deney görüntüsü ile elde edilen kolon görünüşü Şekil 4.23 de ve elde edilen kolon görünüşü Şekil 4.24’de gösterilmiştir.



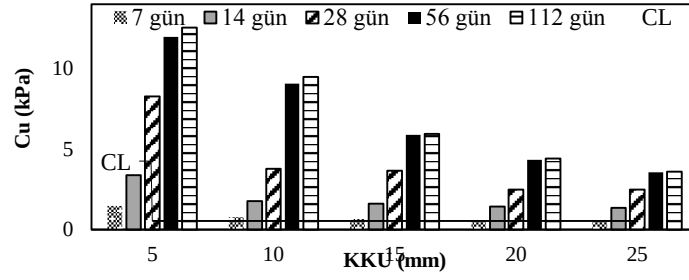
Şekil 4.19. Cu-KKU ilişkisi (%0,25 NaAL)



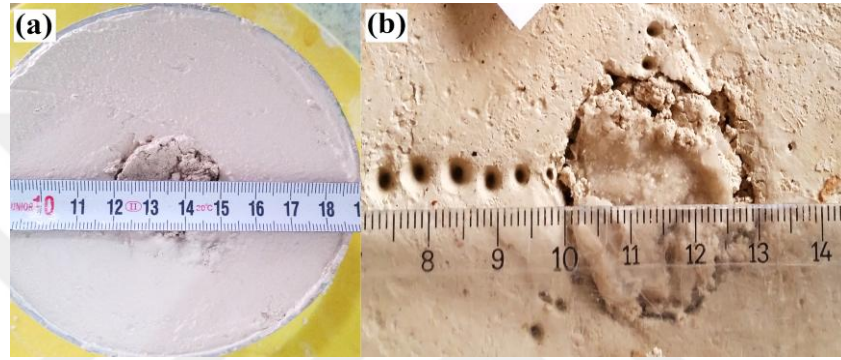
Şekil 4.20. Cu-KKU ilişkisi (%0,5 NaAL)



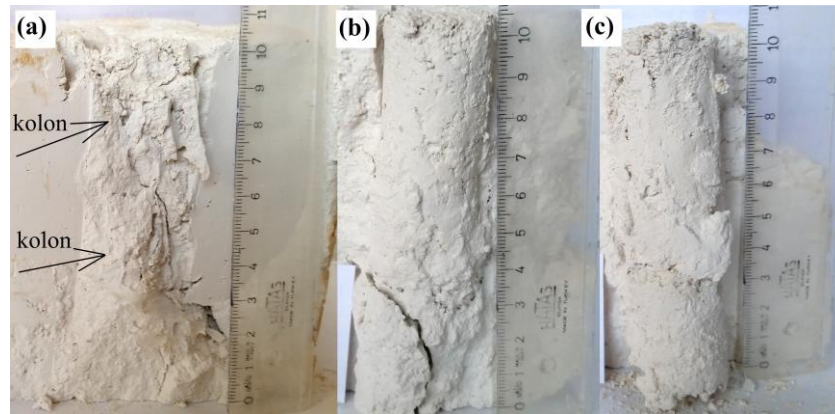
Şekil 4.21. Cu-KKU ilişkisi (%0,75 NaAL)



Şekil 4.22. Cu-KKU ilişkisi (%1 NaAL)



Şekil 4.23. NaAL katkılı CL numunesine ait Cu deneyi, a) 30 mm çapında NaAL + CL kolonunun uygulanması, b) Düşen koni penetrasyon aletinde uygulanmış Cu deneyi



Şekil 4.24. Farklı oranlarda NaAL katkılı CL kolonlarının uygulanması, a) %0.5 oranında NaAL + CL kolonunu, b) %0.75 oranında NaAL + CL kolonunu, c) %1 oranında NaAL + CL kolonunu

Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de görüldüğü üzere kür süresi arttıkça derin karıştırma yöntemi ile elde edilmiş her bir kolon kenar uzaklığı (KKU) için Cu değerinin arttığı görülmektedir. Derin karıştırma kolonlarının etrafında etki alanının olduğu ve bu alanda kil zemininin özellikleri değiştiği Miura et al. 1998; Shen 1998; Shen et al. 2003a; Shen et al. 2003b ve Larsson et al. 2009 yapılan çalışmalarda izah edilmiştir.

Yine şekiller incelendiğinde kolon kenar uzaklığı (KKU) arttıkça 7 ve 14 günlük kür sürelerinde Cu değerlerinde önemli bir değişiklik gözlenmezken diğer kür sürelerinde Cu değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Buna sebep olarak kolon kenarına yakın uzaklıklarda reaksiyonun fazla olması ve kolon kenarından uzaklaştıkça reaksiyonun azalması gösterilebilir. Diğer bir değişle NaAL kolon kenarına yakın mesafelere daha fazla hareket etmektedir. Derin karıştırma kolonlarını çevreleyen kil zemininde etkili alan veya geçiş bölgesinde zeminin fiziksel, mekaniksel ve kimyasal özellikleri kür zamanına bağlı değişmektedir. Geçiş bölgesinde drenajsız kayma mukavemeti (Cu) özellikle kolona yakın mesafelerde kür süresinin artmasıyla artmaktadır (Shen et al. 2003a; Shen et al. 2003b; Larsson et al.2009). Aynı şekillerden NaAL katkı malzemesi oranının artmasıyla Cu değerinin arttığı görülmektedir. Bu durumun tüm KKU için benzer eğilim gösterdiği söylenebilir.

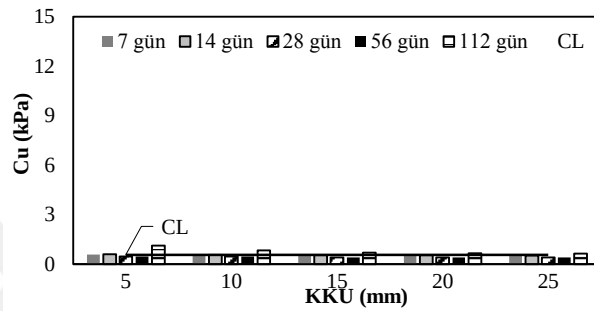
Şekiller incelendiğinde maksimum Cu değeri 112 gün kür süresi ve KKU 5 mm de olacak şekilde %0,25 NaAL, %0,5 NaAL, %0,75 NaAL ve %1 NaAL oranları için sırasıyla 4 kPa, 8,21 kPa, 9,15 kPa ve 12,53 kPa olarak belirlenmiştir. Bu değerler CL kili ile kıyaslandığında yaklaşık olarak sırasıyla %627, %1393, %1564 ve %2178 artış gösterdiği belirlenmiştir.

Derin karıştırma yöntemi ile farklı oranlarda NaAL katkı maddesi ilave edilerek oluşturulan kolonların farklı KKU ve farklı kür sürelerinde elde edilen Cu değerleri toplu olarak Çizelge 4.6’da verilmiştir.

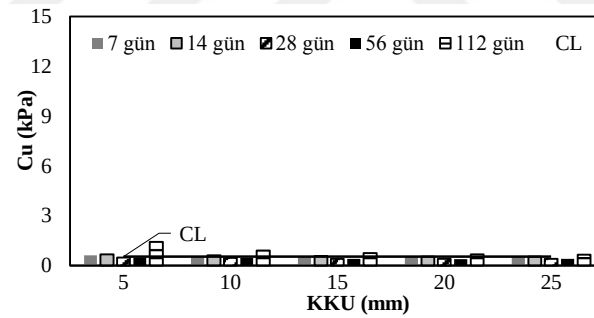
Çizelge 4.6. NaAL ile oluşturulan kolonların farklı K KU larda Cu değeri

		Cu (kPa)																								
KKU(mm)		5					10					15					20					25				
Kür süresi (gün)		7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112
Yüzde (%)	0,25	0,68	0,75	2,40	3,49	4,01	0,66	0,67	1,83	2,87	3,19	0,60	0,61	1,83	2,57	2,87	0,57	0,57	1,56	2,14	2,17	0,52	0,52	1,49	2,0	2,07
	0,5	0,75	0,84	2,51	7,85	8,21	0,67	0,74	1,98	4,69	4,90	0,62	0,63	1,96	3,33	3,56	0,58	0,6	1,75	3,05	3,18	0,52	0,52	1,79	2,81	2,84
	0,75	0,87	0,97	5,09	8,24	9,16	0,76	0,86	2,78	5,55	5,71	0,66	0,73	2,59	4,57	4,73	0,57	0,62	2,26	3,19	3,30	0,55	0,55	2,03	2,87	2,9
	1	1,47	3,38	8,27	11,,95	12,52	0,79	1,77	3,79	9,06	9,47	0,66	1,61	3,79	5,88	5,95	0,59	1,43	3,66	4,33	4,41	0,55	1,37	2,49	3,57	3,60

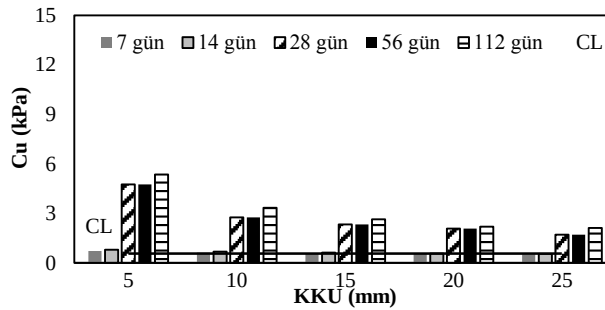
%1, %3, %5, %7, %10, %15 ve %20 NaOH katkı malzemesi ilave edilerek derin karıştırma yöntemi ile oluşturulan kolonlara ait Cu-KKU ilişkisi sırasıyla Şekil 4.25, Şekil 4.26, Şekil 4.27, Şekil 4.28, Şekil 4.29, Şekil 4.30 ve Şekil 4.31 de gösterilmiştir. Kolon kenarından itibaren belirlenen mesafelerde Cu değerini belirlemek için yapılan düşen koni penetrasyon deney görüntüsü Şekil 4.32 de ve elde edilen kolon görünüşü Şekil 4.33’de gösterilmiştir.



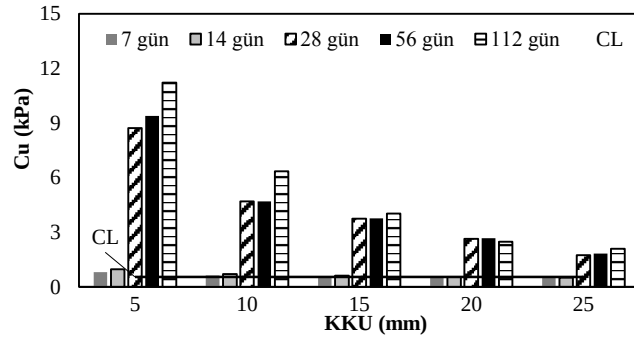
Şekil 4.25. Cu-KKU ilişkisi (%1 NaOH)



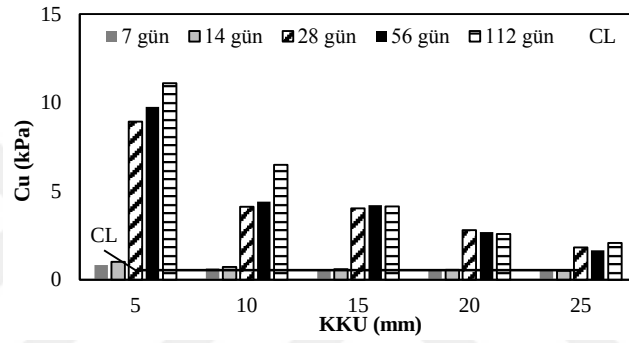
Şekil 4.26. Cu-KKU ilişkisi (%3 NaOH)



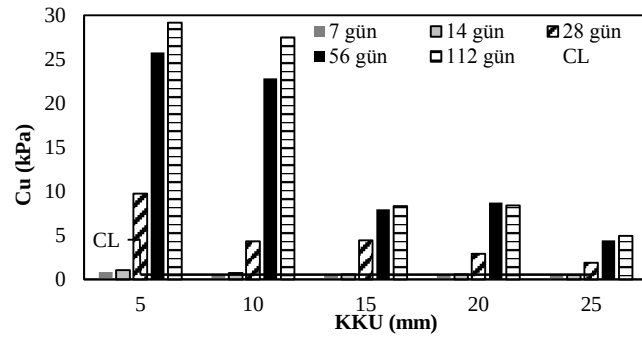
Şekil 4.27. Cu-KKU ilişkisi (%5 NaOH)



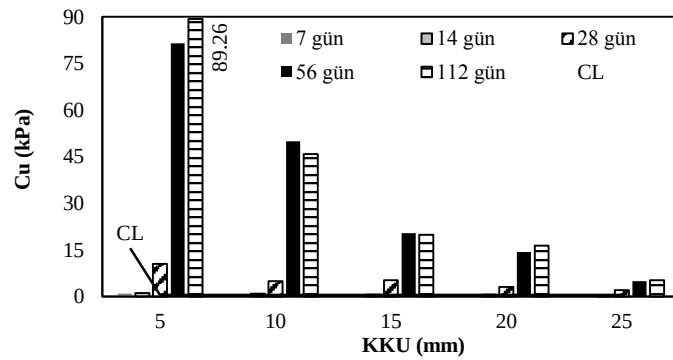
Şekil 4.28. Cu-KKU ilişkisi (%7 NaOH)



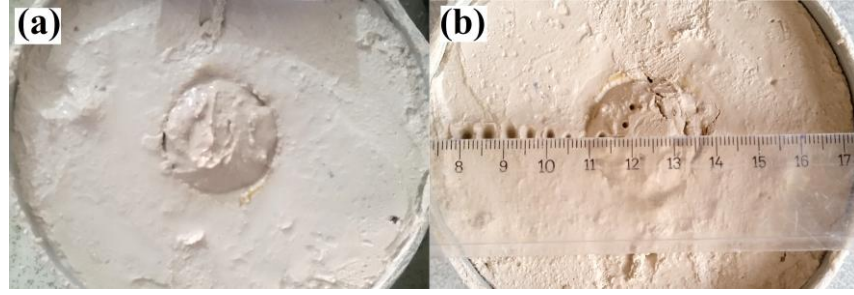
Şekil 4.29. Cu-KKU ilişkisi (%10 NaOH)



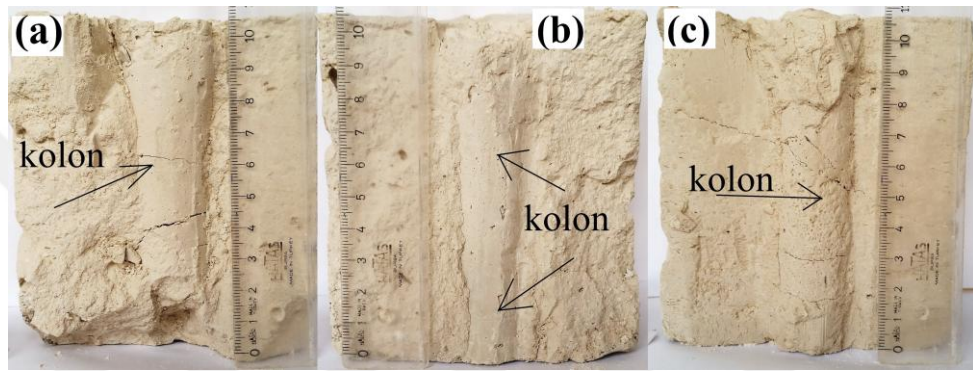
Şekil 4.30. Cu-KKU ilişkisi (%15 NaOH)



Şekil 4.31. Cu-KKU ilişkisi (%20 NaOH)



Şekil 4.32. NaOH katkılı CL numunesine ait Cu deneyinin uygulanması, a) 30 mm çapında NaOH + CL kolonunun, b) Düşen koni penetrasyon aleti ile yapılmış Cu deneyi



Şekil 4.33. Farklı oranlarda NaOH katkılı CL kolonlarının uygulanması, a) %5 oranında NaOH + CL kolonunu, b) %15 oranında NaOH + CL kolonunu, c) %20 oranında NaOH + CL kolonunu

Kür süresi arttıkça %1 ve %3 NaOH ilave edilerek derin karıştırma yöntemi ile elde edilmiş kolonlarda Cu değerinde 112 günlük kür süresine kadar önemli bir değişiklik olmazken 112 günlük kür süresinde Cu değerinde artışın olduğu Şekil 4.25 ve Şekil 4.26 görülmektedir. Şekil 4.27, Şekil 4.28, Şekil 4.29, Şekil 4.30 ve Şekil 4.31 incelendiğinde %5, %7, %10, %15 ve %20 NaOH ilave edilerek oluşturulan kolonlarda Cu değerinin kür süresi arttıkça 14 güne kadar önemli bir değişikliğe uğramadığı ancak bu kür süresinden sonra arttığı görülmektedir. Bu durum NaOH düşük oranlarında etkileşim oluşturabilmesi için uzun süreye ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Öte yandan NaOH oranının artmasıyla etkileşiminin daha kısa sürelerde meydana geldiği dolayısıyla oluşturulan kolonun etrafında etki alanının olduğu ve bu alanda kil zemininin özellikleri değiştiği belirlenmiştir. Benzer kanıya Miura et al. 1998; Shen 1998; Shen et al. 2003a; Shen et al. 2003b ve Larsson et al. 2009 yapılan çalışmalarda ulaşmışlardır. Aynı şekillerden KCU arttıkça 28, 56 ve 112 gün kür sürelerinde elde edilen Cu değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Bu sonuç bize NaOH'ın kolon kenarına yakın olan mesafelerde daha hızlı

ve daha fazla hareket ettiğini göstermektedir. Derin karıştırma kolonlarını çevreleyen kil zemininde etkili alan veya geçiş bölgesinde zeminin fiziksel, mekaniksel ve kimyasal özellikleri kür zamanına bağlı değişmektedir (Shen et al. 2003a; Shen et al. 2003b ve Larsson et al.2009). Aynı şekillerden NaOH katkı malzemesi oranının artmasıyla Cu değerinin arttığı görülmektedir. Bu durumun tüm KKU için benzer eğilim gösterdiği söylenebilir.

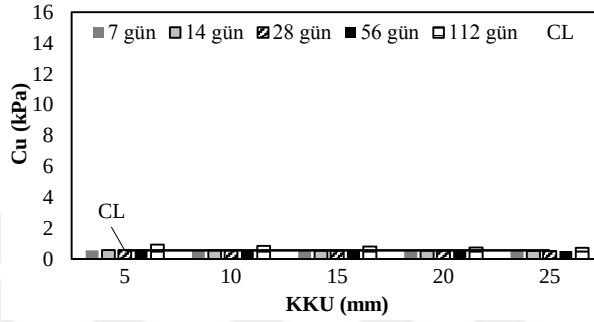
Şekillerden anlaşılabacağı üzere maksimum Cu değeri 112 gün kür süresi ve KKU 5 mm de olacak şekilde %1 NaOH, %3 NaOH, %5 NaOH, %7 NaOH, %10 NaOH, %15 NaOH ve %20 NaOH oranları için sırasıyla 1,2 kPa, 1,42 kPa, 5,34 kPa, 11,22 kPa, 11,08 kPa, 29,14 kPa ve 89,26 kPa olarak belirlenmiştir. Bu değerler CL kili ile kıyaslandığında yaklaşık olarak sırasıyla %118, %158, %871, %1940, %1914.5, %5198 ve %16129 artış olduğu belirlenmiştir.

Derin karıştırma yöntemi ile farklı oranlarda NaOH katkı maddesi ilave edilerek oluşturulan kolonların farklı KKU ve farklı kür sürelerinde elde edilen Cu değerleri toplu olarak Çizelge 4.7’de verilmiştir.

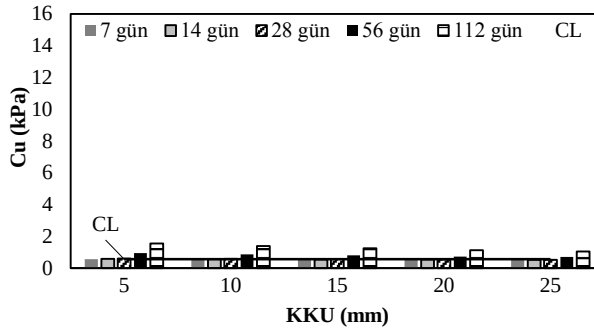
Çizelge 4.7. NaOH ile oluşturulan kolonların farklı K KU larda Cu değeri

		Cu (kPa)																								
KKU (mm)		5					10					15					20					25				
Kür süresi (gün)		7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112
Yüzde (%)	1	0,57	0,59	0,47	0,47	1,13	0,54	0,55	0,46	0,46	0,83	0,54	0,54	0,41	0,41	0,7	0,53	0,53	0,4	0,4	0,66	0,51	0,51	0,4	0,4	0,64
	3	0,61	0,67	0,47	0,48	1,43	0,55	0,62	0,47	0,47	0,91	0,54	0,57	0,41	0,40	0,75	0,53	0,54	0,40	0,39	0,67	0,51	0,53	0,40	0,41	0,65
	5	0,71	0,78	4,76	4,76	5,34	0,62	0,68	2,75	2,75	3,33	0,56	0,61	2,33	2,33	2,64	0,53	0,55	2,07	2,07	2,19	0,52	0,53	1,71	1,71	2,11
	7	0,80	0,97	8,73	9,40	11,23	0,64	0,70	4,69	4,70	6,35	0,57	0,62	3,74	3,76	4,03	0,54	0,55	2,64	2,68	2,49	0,52	0,51	1,75	1,83	2,10
	10	0,84	1,01	8,92	9,77	11,09	0,63	0,72	4,13	4,42	6,49	0,55	0,59	4,03	4,22	4,15	0,51	0,56	2,81	2,71	2,59	0,51	0,50	1,83	1,66	2,09
	15	0,85	1,07	9,77	25,79	29,15	0,59	0,74	4,34	22,84	27,48	0,57	0,59	4,45	7,99	8,33	0,54	0,58	2,93	8,73	8,42	0,53	0,52	1,90	4,45	4,96
	20	0,92	1,16	10,52	81,51	89,27	0,61	0,92	4,96	49,92	45,85	0,59	0,62	5,24	20,38	19,93	0,55	0,60	3,12	14,28	16,34	0,58	0,56	2,07	4,96	5,28

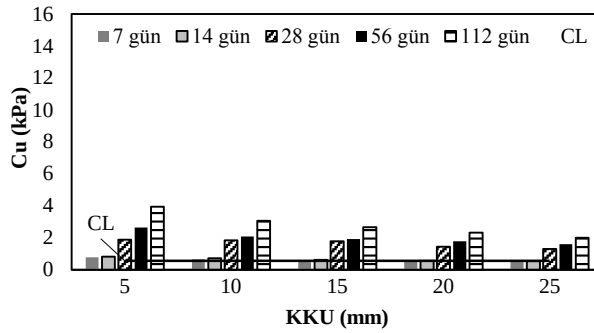
%1, %3, %5, %7, %10, %15 ve %20 KOH katkı malzemesi ilave edilerek derin karıştırma yöntemi ile oluşturulan kolonlara ait Cu-KKU ilişkisi sırasıyla Şekil 4.34, Şekil 4.35, Şekil 4.36, Şekil 4.37, Şekil 4.38, Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'da gösterilmiştir. Kolon kenarından itibaren belirlenen mesafelerde Cu değerini belirlemek için yapılan düşen koni penetrasyon deney görüntüsü Şekil 4.41, elde edilen kolon görünüşü Şekil 4.42'de gösterilmiştir.



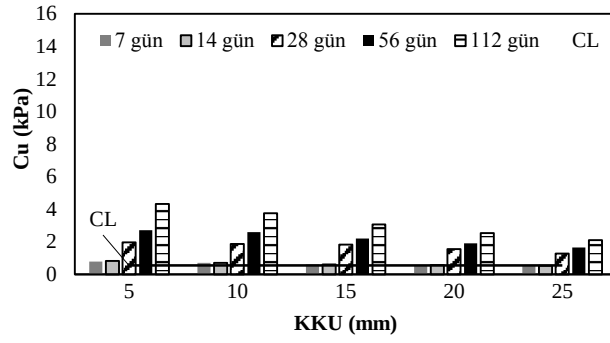
Şekil 4.34. Cu-KKU ilişkisi (%1 KOH)



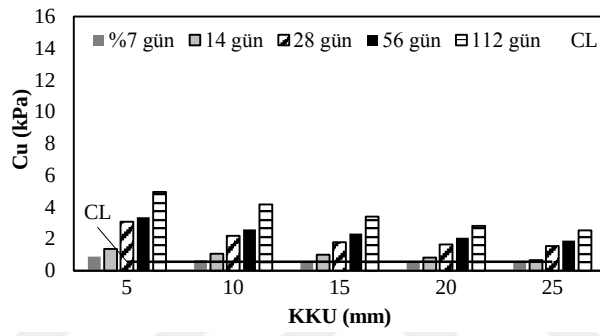
Şekil 4.35. Cu-KKU ilişkisi (%3 KOH)



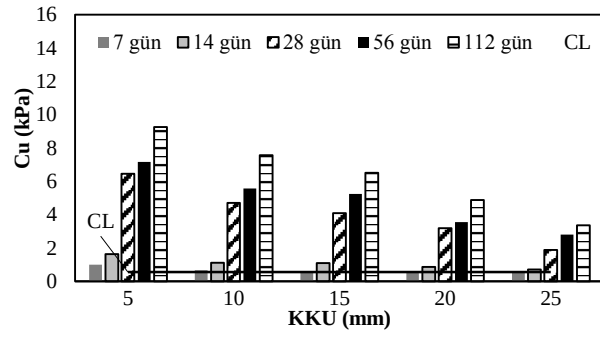
Şekil 4.36. Cu-KKU ilişkisi (%5 KOH)



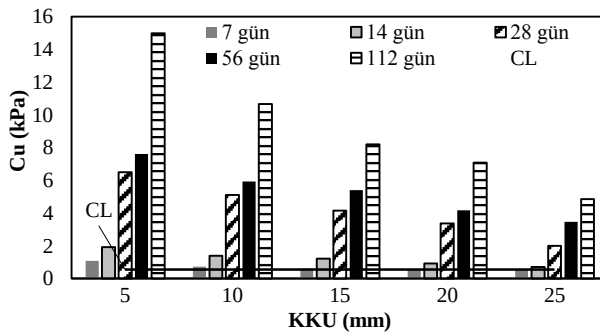
Şekil 4.37. Cu-KKU ilişkisi (%7 KOH)



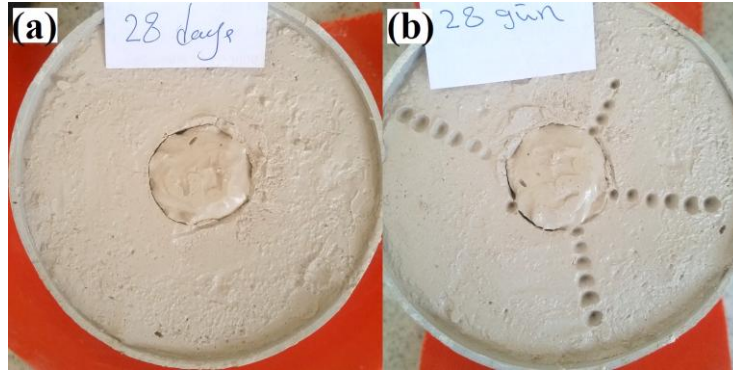
Şekil 4.38. Cu-KKU ilişkisi (%10 KOH)



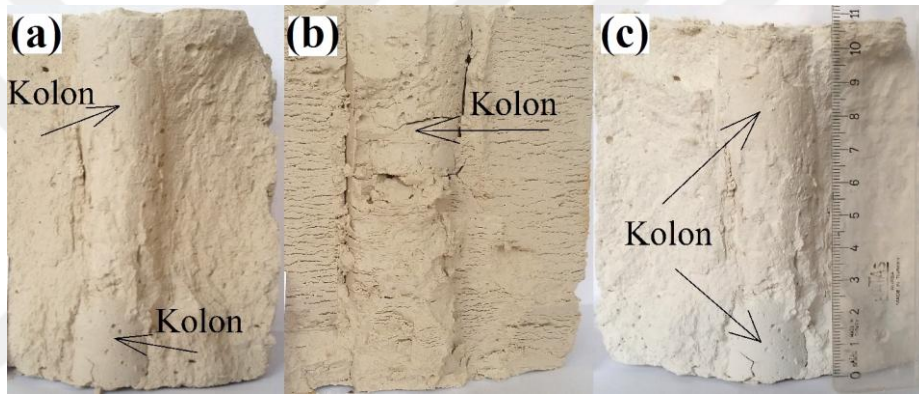
Şekil 4.39. Cu-KKU ilişkisi (%15 KOH)



Şekil 4.40. Cu-KKU ilişkisi (%20 KOH)



Şekil 4.41. KOH katkılı CL numunesine ait Cu deneyi, a) 30 mm çapında KOH + CL kolonu, b) Düşen koni penetrasyon aleti ile yapılmış Cu deneyi



Şekil 4.42. Farklı oranlarda NaOH katkılı CL kolonlarının uygulanması, a) %5 oranında KOH + CL kolonunu, b) %15 oranında KOH + CL kolonunu, c) %20 oranında KOH + CL kolonunu.

Şekil 4.34 ve Şekil 4.35 göz önüne alındığında kür süresi arttıkça %1 ve %3 KOH ilave edilerek derin karıştırma yöntemi ile elde edilmiş kolonlarda Cu değerinde 112 günlük kür süresine kadar önemli bir değişiklik olmazken 112 günlük kür süresinde Cu değerinde bir artışın olduğu görülmektedir. %5 ve %7 KOH ilave edilerek oluşturulan kolonlarda Cu değerinin kür süresi arttıkça 14 güne kadar önemli bir değişikliğe uğramadığı ancak bu kür süresinden sonra arttığı Şekil 4.36 ve Şekil 4.37’de görülmektedir. Şekil 4.38 Şekil 4.39 ve Şekil 4.40 da görüleceği gibi %10, %15 ve %20 KOH ilave edilerek oluşturulan kolonlarda Cu değerinin kür süresi arttıkça genel olarak arttığı anlaşılmaktadır. Bu durum NaOH de olduğu gibi KOH’ın da düşük oranlarında etkileşim oluşturabilmesi için uzun süreye gerek olduğunu göstermektedir. Öte yandan KOH oranının artmasıyla etkileşiminin daha kısa sürelerde meydana geldiği dolayısıyla oluşturulan kolonun geçiş bölgesinde kil zemininin özelliklerinin değiştiği belirlenmiştir. Miura et al. 1998; Shen

1998; Shen et al. 2003a; Shen et al. 2003b ve Larsson et al. 2009 yapmış oldukları çalışmada farklı katkı malzemeleri ile oluşturulan kolonların etrafında benzer etkinin olduğunu belirtmişlerdir.

Aynı şekiller üzerinden KKU arttıkça hemen hemen tüm kür sürelerinde elde edilen Cu değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Bu sonuç bize NaOH'a benzer olarak KOH'ın da kolon kenarına yakın olan mesafelerde daha hızlı ve daha fazla hareket ettiğini göstermektedir. Derin karıştırma kolonlarını çevreleyen kil zemininde etkili alan veya geçiş bölgesinde zeminin fiziksel, mekaniksel ve kimyasal özellikleri kür zamanına bağlı değişmektedir. Geçiş bölgesinde drenajsız kayma mukavemeti (Cu) özellikle kolona yakın mesafelerde kür süresinin artmasıyla artmaktadır. Benzer kaniya Shen et al. 2003a; Shen et al. 2003b; Larsson et al. 2009 yapmış oldukları çalışmalarda yer vermişlerdir. Aynı şekillerden KOH katkı malzemesi oranının artmasıyla Cu değerinin arttığı görülmektedir. Bu durumun tüm KKU için benzer eğilim gösterdiği söylenebilir.

Şekiller incelendiğinde maksimum Cu değeri 112 gün kür süresi ve KKU 5 mm de olacak şekilde %1 KOH, %3 KOH, %5 KOH, %7 KOH, %10 KOH, %15 KOH ve %20 KOH oranları için sırasıyla 0,92 kPa, 1,53 kPa, 3,92 kPa, 4,32 kPa, 4,94 kPa, 9,26 kPa ve 14,97 kPa olarak belirlenmiştir. Bu değerler CL kili ile kıyaslandığında yaklaşık olarak sırasıyla %67, %178, %613, %685.5, %798, %1584, %2622 artış olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.41b den görüleceği gibi yapılan konik uçlu penetrasyon deneyinde kolon kenarından uzaklaştıkça batma miktarının arttığı ve buna bağlı olarak da Cu'nun azaldığı görülmektedir. Derin karıştırma yöntemi ile farklı oranlarda KOH katkı maddesi ilave edilerek oluşturulan kolonların farklı KKU ve farklı kür sürelerinde elde edilen Cu değerleri toplu olarak Çizelge 4.8 verilmiştir.

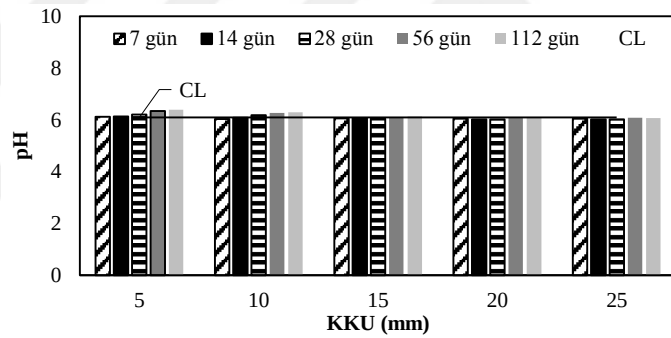
Çizelge 4.8. KOH ile oluşturulan kolonların farklı KKU larda Cu değeri

Cu (kPa)																										
KKU (mm)		5					10					15					20					25				
Kür süresi (gün)		7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112
Yüzde (%)	1	0,55	0,58	0,58	0,59	0,92	0,54	0,56	0,55	0,56	0,84	0,54	0,55	0,54	0,54	0,80	0,52	0,53	0,53	0,53	0,74	0,51	0,51	0,52	0,52	0,71
	3	0,56	0,58	0,59	0,93	1,53	0,54	0,56	0,56	0,85	1,37	0,54	0,53	0,55	0,79	1,23	0,53	0,52	0,54	0,71	1,12	0,51	0,51	0,52	0,70	1,04
	5	0,76	0,81	1,87	2,63	3,92	0,64	0,70	1,83	2,06	3,06	0,57	0,61	1,78	1,91	2,65	0,53	0,56	1,42	1,77	2,32	0,51	0,53	1,29	1,58	1,99
	7	0,78	0,82	1,96	2,72	4,33	0,69	0,71	1,85	2,59	3,75	0,59	0,60	1,81	2,20	3,05	0,53	0,56	1,53	1,89	2,53	0,51	0,53	1,27	1,64	2,10
	10	0,88	1,37	3,07	3,36	4,94	0,65	1,06	2,18	2,58	4,17	0,57	1,01	1,79	2,33	3,40	0,54	0,82	1,64	2,06	2,81	0,51	0,66	1,53	1,89	2,54
	15	0,99	1,63	6,44	7,16	9,26	0,67	1,10	4,69	5,56	7,56	0,58	1,09	4,09	5,23	6,51	0,54	0,86	3,18	3,53	4,88	0,51	0,69	1,86	2,80	3,35
	20	1,07	1,91	6,48	7,61	14,97	0,71	1,39	5,09	5,92	10,65	0,59	1,21	4,14	5,39	8,19	0,54	0,92	3,35	4,17	7,07	0,52	0,71	1,99	3,47	4,85

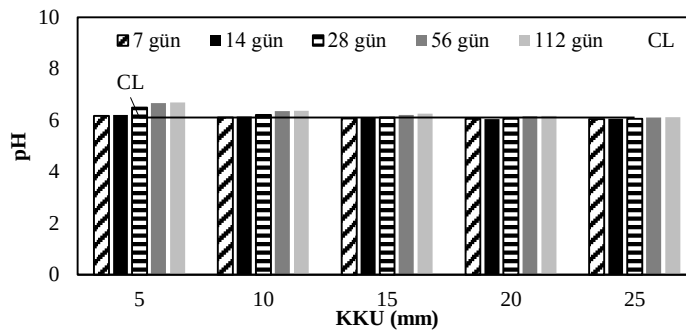
4.3.2. pH Deney Sonuçları

Biyopolimer (NaAL) ve kimyasal (NaOH, KOH) katkı maddeleri ile oluşturulan derin karıştırma kolonları kenarlarından farklı uzaklıklardaki pH değerlerinin belirlenmesi bölüm 3.2.2.b’de anlatıldığı gibi yapılmıştır. Bölüm 3.2.2.b’de izah edilen yöntemle elde edilen pH deney sonuçları kullanılarak her bir katkı maddesi ve kür süreleri için pH-KKU ilişkisi çizilmiştir.

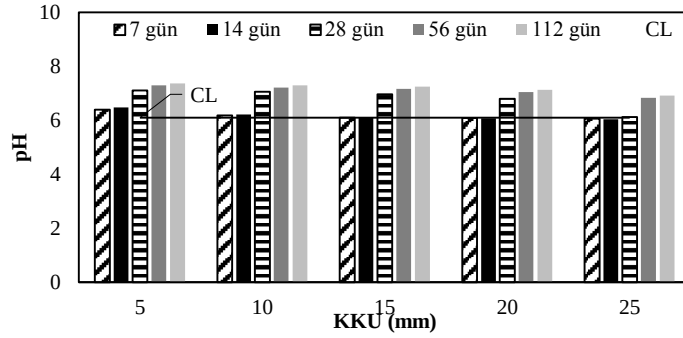
%0,25, %0,5, %0,75 ve %1 NaAL katkı malzemesi ilave edilerek derin karıştırma yöntemi ile oluşturulan kolonlara ait pH-KKU ilişkisi sırasıyla Şekil 4.43, Şekil 4.44, Şekil 4.45 ve Şekil 4.46’da gösterilmiştir.



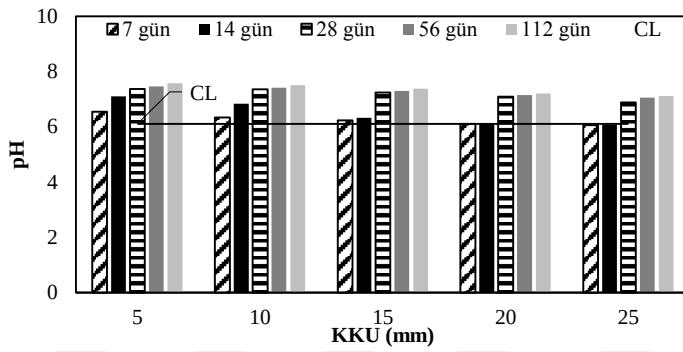
Şekil 4.43. pH-KKU ilişkisi (%0,25 NaAL)



Şekil 4.44. pH-KKU ilişkisi (%0,5 NaAL)



Şekil 4.45. pH-KKU ilişkisi (%0,75 NaAL)



Şekil 4.46. pH-KKU ilişkisi (%1 NaAL)

Şekil 4.43 ve Şekil 4.44’de görüleceği üzere kür süresi arttıkça derin karıştırma yöntemi ile elde edilmiş her bir kolon kenar uzaklığı (KKU) için pH değerinde önemli bir değişiklik olmadığı anlaşılmaktadır. Ancak her iki şekilde de 5 ve 10 KKU da 56 ve 112 günlük kür süreleri dikkate alındığında pH değerinin bir miktar arttığı görülmektedir. %0.75 ve %1 NaAL ilave edilerek oluşturulan kolonlarda ise kür süresi arttıkça 28 günlük kür süresine kadar önemli bir değişikliğinin gözlenmediği bu kür süresinden sonra tüm KKU larda genel olarak pH değerinin arttığı Şekil 4.45 ve Şekil 4.46 da görülmektedir. Ancak Şekil 4.45 de kolon kenarından 5 mm uzaklıkta pH değerinin kür süresinin artmasıyla arttığı gözlenmiştir. NaAL tüm oranları için KKU değeri arttıkça pH değerinde kısmen azalma olduğu belirlenmiştir. Bu sonuca kolon kenarlarından uzaklaştıkça pH değerinin azalması yani katyon konsantrasyonunun azalması sebep olmuştur. Benzer sonucu Shen et al. 2003a ve Shen et al. 2003b yapmış oldukları çalışmada geçiş bölgesinde katyon konsantrasyonu, iyon difüzyonu ve pH değerlerinin kolona yakın mesafelerde arttığını ifade etmişlerdir. Öte yandan NaAL katkı malzemesi oranının artmasıyla tüm KKU larda pH değerinin arttığı görülmektedir. Bu sonuca artan NaAL

miktarı nedeni ile katyon konsantrasyonunun artmasının neden olduğu açıktır. Bunun sonucu olarak da daha sağlam bir zemin ortamı elde edilmiştir. Vural (2012) yapmış olduğu çalışmada düşük pH değerinin zeminlerde flokülasyonu ve gevşek zemini ifade ettiğini, yüksek pH değerinin ise dispersiyonu ve sıkı zemini belirttiği kanatine varmıştır.

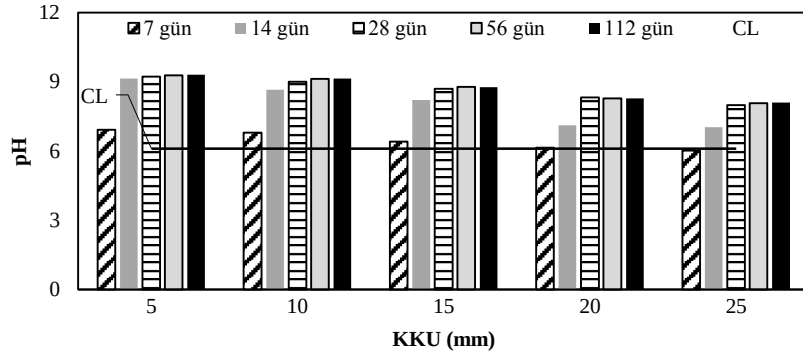
Şekiller incelendiğinde maksimum pH değeri 112 gün kür süresi ve KCU 5 mm de olacak şekilde %0,25 NaAL, %0,5 NaAL, %0,75 NaAL ve %1 NaAL oranları için sırasıyla 6,39, 6,69, 7,37 ve 7,58 olarak belirlenmiştir. Bu değerler CL kili ile kıyaslandığında yaklaşık olarak sırasıyla %4,75, %9,7, %21 ve %24,3 artış olduğu belirlenmiştir.

Derin karıştırma yöntemi ile farklı oranlarda NaAL katkı maddesi ilave edilerek oluşturulan kolonların farklı KCU ve farklı kür sürelerinde elde edilen Cu değerleri toplu olarak Çizelge 4.9'da verilmiştir.

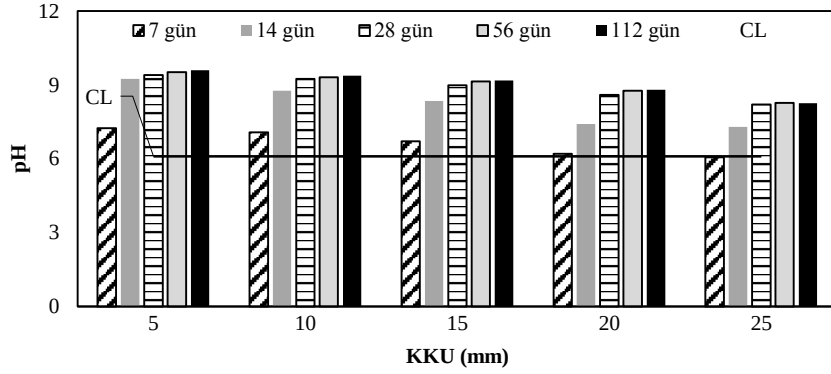
Çizelge 4.9. NaAL ile oluşturulan kolonların farklı K KU larda pH değeri

pH																											
KKU (mm)		5					10					15					20					25					
Kür	süresi	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	
(gün)																											
Yüzde (%)	0,25	6,12	6,14	6,21	6,34	6,39	6,04	6,09	6,18	6,27	6,3	6,06	6,07	6,05	6,11	6,13	6,05	6,02	6,03	6,07	6,1	6,05	6,02	6,03	6,08	6,07	
	0,5	6,17	6,21	6,49	6,67	6,69	6,11	6,14	6,21	6,35	6,37	6,07	6,09	6,11	6,21	6,25	6,06	6,04	6,06	6,15	6,17	6,04	6,05	6,05	6,1	6,12	
	0,75	6,39	6,48	7,1	7,29	7,37	6,18	6,21	7,06	7,21	7,29	6,1	6,11	6,96	7,16	7,25	6,07	6,07	6,8	7,04	7,13	6,06	6,03	6,12	6,83	6,91	
	1	6,55	7,1	7,37	7,46	7,58	6,34	6,84	7,36	7,41	7,51	6,23	6,33	7,24	7,3	7,38	6,1	6,1	7,09	7,15	7,2	6,06	6,08	6,88	7,06	7,11	

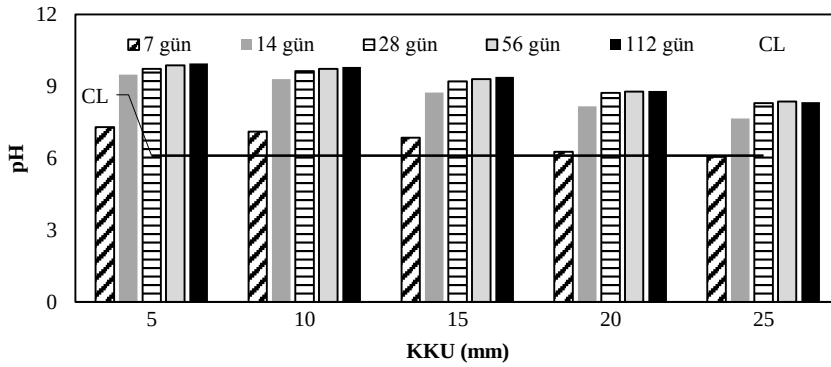
%1, %3, %5, %7, %10, %15 ve %20 NaOH katkı malzemesi ilave edilerek derin karıştırma yöntemi ile oluşturulan kolonlara ait pH-KKU ilişkisi sırasıyla Şekil 4.47, Şekil 4.48, Şekil 4.49, Şekil 4.50, Şekil 4.51, Şekil 4.52 ve Şekil 4.53’de verilmiştir.



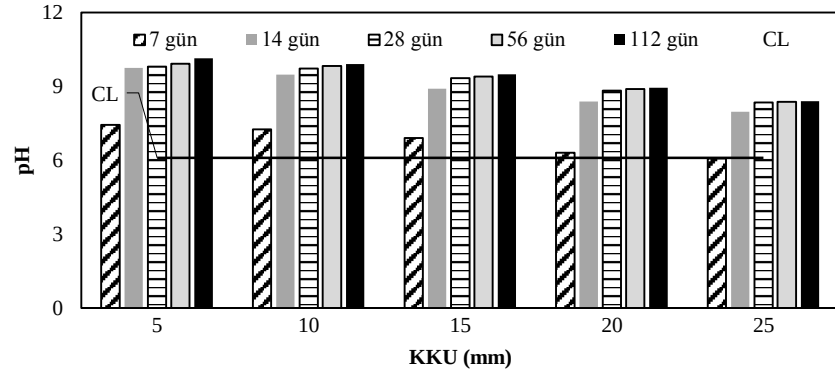
Şekil 4.47. pH-KKU ilişkisi (%1 NaOH)



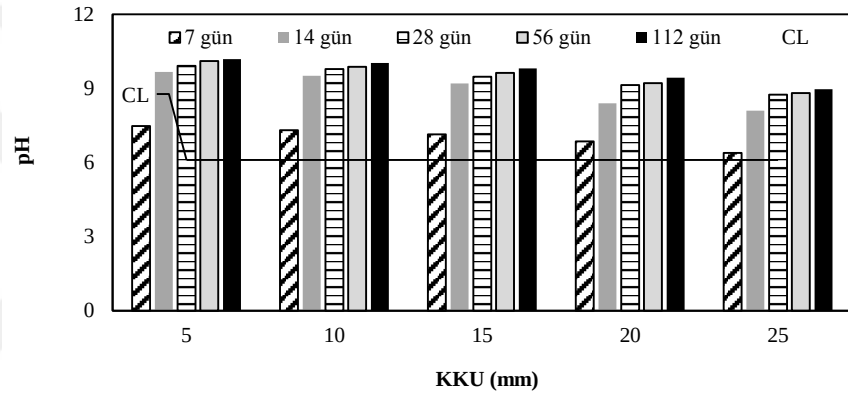
Şekil 4.48. pH-KKU ilişkisi (%3 NaOH)



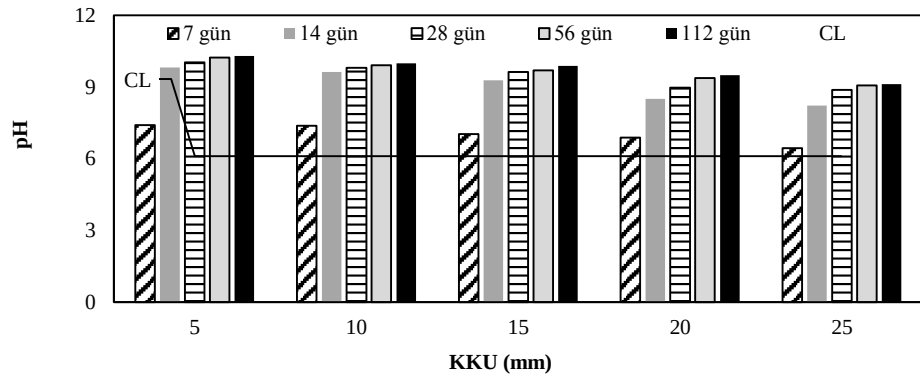
Şekil 4.49. pH-KKU ilişkisi (%5 NaOH)



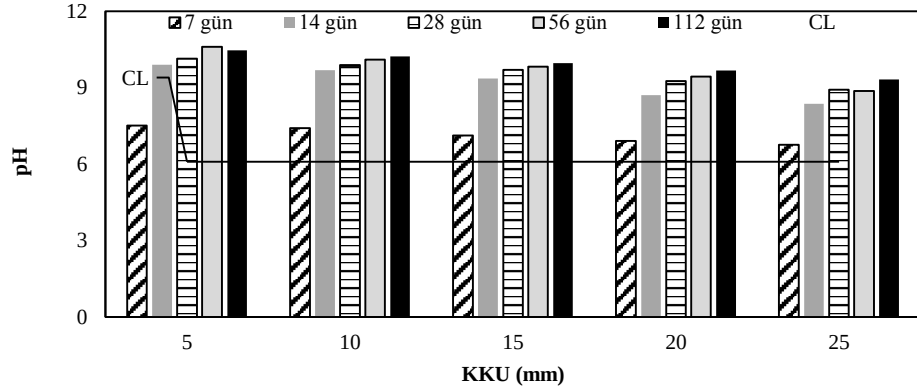
Şekil 4.50. pH-KKK ilişkisi (%7 NaOH)



Şekil 4.51. pH-KKK ilişkisi (%10 NaOH)



Şekil 4.52. pH-KKK ilişkisi (%15 NaOH)



Şekil 4.53. pH-KKU ilişkisi (%20 NaOH)

Şekil 4.47, Şekil 4.48, Şekil 4.49, Şekil 4.50 Şekil 4.51, Şekil 4.52 ve Şekil 4.53 incelendiğinde kür süresi arttıkça derin karıştırma yöntemi ile elde edilmiş her bir kolon kenar uzaklığı (KKU) için pH değerinde genel olarak artış olduğu görülmektedir. Yine aynı şekiller göz önüne alındığında KKU değeri arttıkça tüm kür sürelerinde pH değerinde genelde kısmi bir azalma olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuca NaOH'ın kolon kenarlarından uzaklaştıkça difizyonunun azalması sebep olmaktadır. Dolayısıyla burada katyon konsantrasyonunun azalması söz konusudur. Yukarıda da denildiği üzere Shen et al. 2003a ve Shen et al. 2003b'de yapmış oldukları çalışmada benzer sonuçları ifade etmişlerdir. Öte yandan NaOH katkı malzemesi oranının artmasıyla tüm KKU larda pH değerinin arttığı görülmektedir. Bu sonuca artan NaOH miktarı nedeni ile katyon konsantrasyonunun artmasının neden olduğu açıktır. Bunun sonucu olarak da daha sağlam bir zemin ortamı elde edilmiştir (Vural 2012).

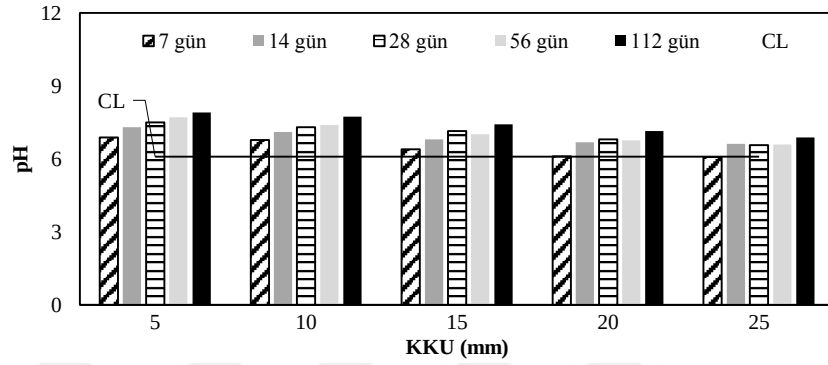
NaOH ile ilgili şekiller incelendiğinde maksimum pH değeri 112 gün kür süresi ve KKU 5 mm de olacak şekilde %1 NaOH, %3 NaOH, %5 NaOH, %7 NaOH, %10 NaOH, %15 NaOH ve %20 NaOH oranları için sırasıyla 9,31, 9,6, 9,95, 10,14, 10,19, 10,3 ve 10,47 olarak belirlenmiştir. Bu değerler CL kili ile kıyaslandığında yaklaşık olarak sırasıyla %52,5, %57,5, %63, %66, %67, %69 ve %72 artış olduğu belirlenmiştir.

Derin karıştırma yöntemi ile farklı oranlarda NaOH katkı maddesi ilave edilerek oluşturulan kolonların farklı KKU ve farklı kür sürelerinde elde edilen pH değerleri toplu olarak Çizelge 4.10'da verilmiştir.

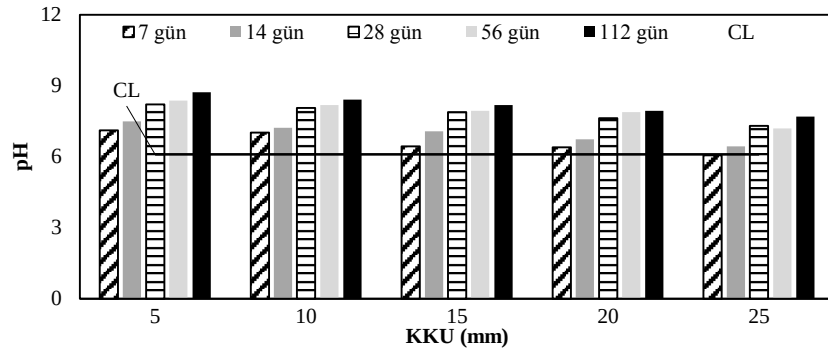
Çizelge 4.10. NaOH ile oluşturulan kolonların farklı K KU larda pH değeri

pH																											
KKU (mm)		5					10					15					20					25					
Kür süresi (gün)	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112		
Yüzde (%)	1	6,92	9,15	9,23	9,29	9,31	6,8	8,66	9,01	9,13	9,15	6,41	8,21	8,7	8,79	8,77	6,15	7,12	8,33	8,29	8,29	6,02	7,03	8	8,08	8,1	
	3	7,24	9,25	9,4	9,52	9,6	7,08	8,77	9,25	9,31	9,38	6,71	8,35	8,98	9,14	9,18	6,2	7,41	8,6	8,77	8,8	6,06	7,3	8,2	8,27	8,26	
	5	7,3	9,49	9,73	9,87	9,95	7,11	9,3	9,63	9,72	9,8	6,86	8,74	9,21	9,3	9,39	6,26	8,16	8,73	8,78	8,81	6,05	7,66	8,3	8,36	8,34	
	7	7,43	9,75	9,8	9,92	10,14	7,25	9,48	9,72	9,83	9,91	6,9	8,9	9,33	9,4	9,49	6,3	8,38	8,83	8,89	8,94	6,07	7,79	8,35	8,37	8,4	
	10	7,48	9,66	9,91	10,1	10,19	7,31	9,51	9,78	9,87	10,03	7,14	9,2	9,47	9,63	9,81	6,85	8,4	9,13	9,21	9,43	6,38	8,1	8,74	8,81	8,96	
	15	7,41	9,82	10,03	10,24	10,3	7,38	9,63	9,81	9,91	10	7,03	9,28	9,63	9,7	9,89	6,89	8,51	8,97	9,38	9,5	6,44	8,22	8,88	9,07	9,12	
20	7,51	9,9	10,14	10,61	10,47	7,41	9,69	9,89	10,11	10,23	7,13	9,37	9,71	9,83	9,97	6,91	8,71	9,27	9,44	9,68	6,76	8,37	8,93	8,87	9,33		

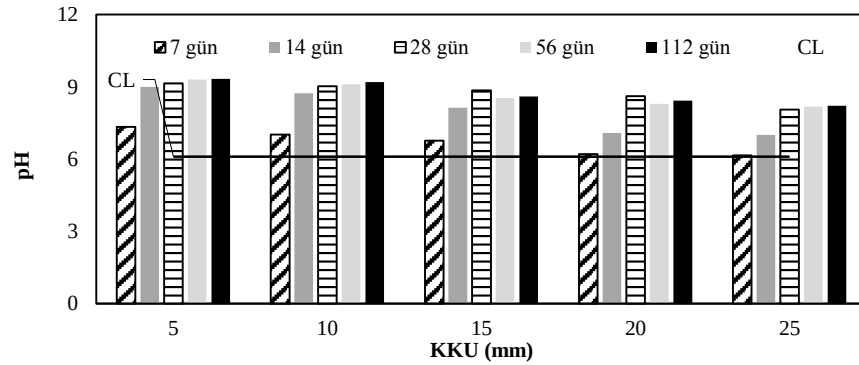
%1, %3, %5, %7, %10, %15 ve %20 KOH katkı malzemesi ilave edilerek derin karıştırma yöntemi ile oluşturulan kolonlara ait pH-KKU ilişkisi sırasıyla Şekil 4.54, Şekil 4.55, Şekil 4.56, Şekil 4.57, Şekil 4.58, Şekil 4.59 ve Şekil 4.60'da verilmiştir.



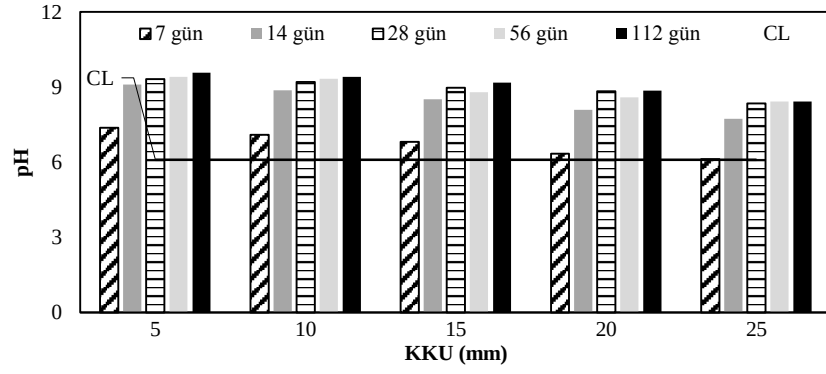
Şekil 4.54. pH-KKU ilişkisi (%1 KOH)



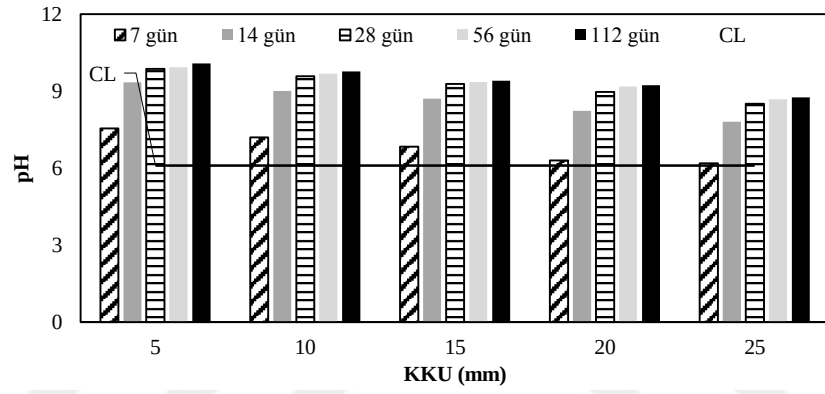
Şekil 4.55. pH-KKU ilişkisi (%3 KOH)



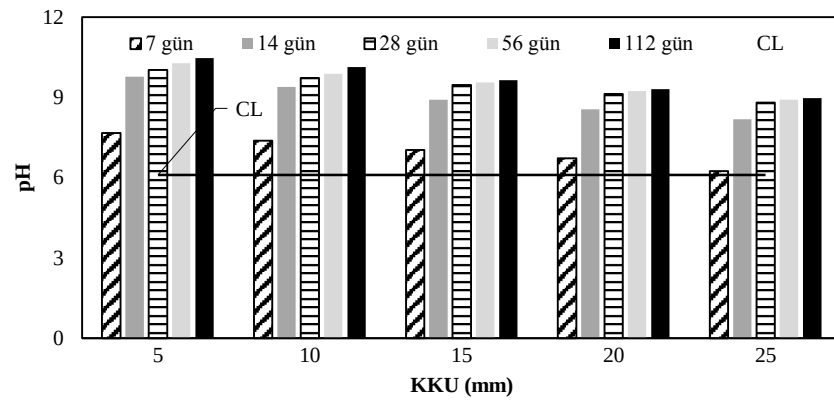
Şekil 4.56. pH-KKU ilişkisi (%5 KOH)



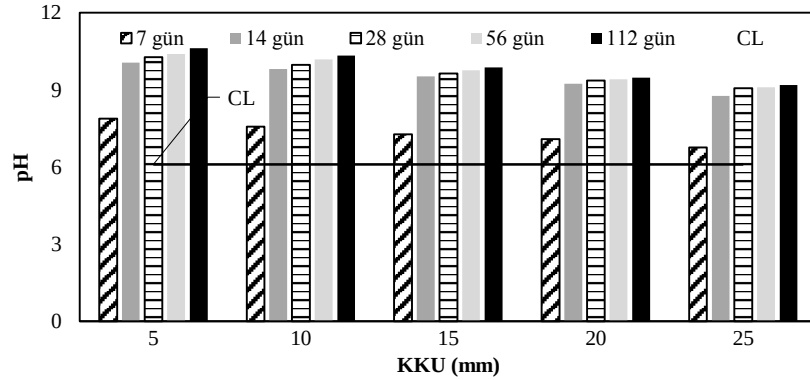
Şekil 4.57. pH-KKU ilişkisi (%7 KOH)



Şekil 4.58. pH-KKU ilişkisi (%10 KOH)



Şekil 4.59. pH-KKU ilişkisi (%15 KOH)



Şekil 4.60. pH-KKU ilişkisi (%20 KOH)

Şekil 4.54, Şekil 4.55, Şekil 4.56, Şekil 4.57 Şekil 4.58, Şekil 4.59 ve Şekil 4.60 incelendiğinde kür süresi arttıkça derin karıştırma yöntemi ile elde edilmiş her bir kolon kenar uzaklığı (KKU) için pH değerinde genel olarak artış olduğu görülmektedir. Yine aynı şekiller göz önüne alındığında KKU değeri arttıkça tüm kür sürelerinde pH değerinde genelde kısmi bir azalma olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuca KOH'ın kolon kenarlarından uzaklaştıkça difüzyonunun azalması sebep olmaktadır. Dolayısıyla burada kation konsantrasyonunun azalması söz konusudur. Yukarıda da denildiği üzere Shen et al. 2003a'da yapmış oldukları çalışmada benzer sonuçları ifade etmişlerdir. Öte yandan KOH katkı malzemesi oranının artmasıyla tüm KKU larda pH değerinin arttığı görülmektedir. Bu sonuca artan KOH miktarı nedeni ile kation konsantrasyonunun artmasının neden olduğu açıktır. Bunun sonucu olarak da daha sağlam bir zemin ortamı elde edilmiştir. Benzer sonucu Vural (2012) yapmış olduğu çalışmada vurgulamaktadır.

KOH ile ilgili şekiller incelendiğinde maksimum pH değeri 112 gün kür süresi ve KKU 5 mm de olacak şekilde %1 KOH, %3 KOH, %5 KOH, %7 KOH, %10 KOH, %15 KOH ve %20 KOH oranları için sırasıyla 7,91, 8,73, 9,33, 9,58, 10,07, 10,47 ve 10,63 olarak belirlenmiştir. Bu değerler CL kili ile kıyaslandığında yaklaşık olarak sırasıyla %30, %43, %53, %57, %65, %72 ve %74 artış olduğu belirlenmiştir.

Derin karıştırma yöntemi ile farklı oranlarda KOH katkı maddesi ilave edilerek oluşturulan kolonların farklı KKU ve farklı kür sürelerinde elde edilen pH değerleri toplu olarak Çizelge 4.11'de verilmiştir.

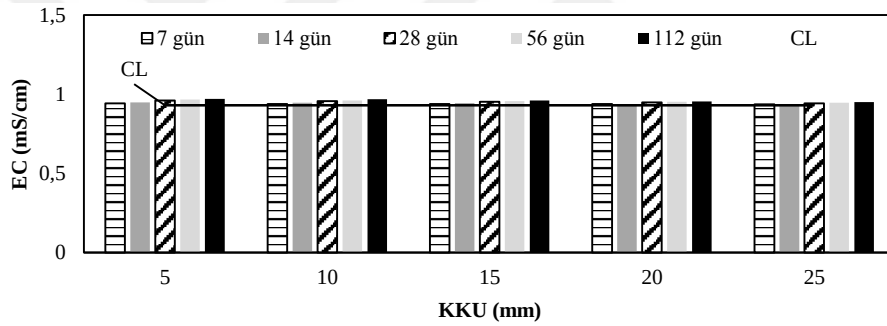
Çizelge 4.11. KOH ile oluşturulan kolonların farklı K KU larda pH değeri

pH																											
KKU (mm)		5					10					15					20					25					
Kür süresi (gün)		7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	
Yüzde (%)	1	6,88	7,31	7,5	7,71	7,91	6,78	7,11	7,31	7,4	7,74	6,4	6,8	7,14	7,02	7,42	6,11	6,68	6,8	6,77	7,14	6,08	6,62	6,57	6,6	6,88	
	3	7,11	7,49	8,21	8,37	8,73	7,02	7,22	8,06	8,18	8,41	6,44	7,08	7,88	7,94	8,18	6,4	6,74	7,63	7,89	7,94	6,06	6,44	7,3	7,2	7,7	
	5	7,33	9	9,14	9,3	9,33	7,02	8,73	9,02	9,1	9,2	6,77	8,14	8,85	8,53	8,6	6,21	7,09	8,61	8,3	8,43	6,15	7,01	8,06	8,18	8,22	
	7	7,38	9,1	9,32	9,41	9,58	7,09	8,87	9,2	9,33	9,41	6,81	8,51	8,97	8,8	9,18	6,34	8,09	8,83	8,59	8,86	6,12	7,73	8,35	8,43	8,43	
	10	7,54	9,34	9,86	9,93	10,07	7,2	9	9,58	9,68	9,76	6,83	8,7	9,28	9,35	9,4	6,29	8,23	8,96	9,18	9,23	6,18	7,8	8,5	8,68	8,75	
	15	7,76	9,78	10,03	10,28	10,47	7,38	9,39	9,73	9,88	10,14	7,04	8,92	9,46	9,56	9,65	6,73	8,55	9,13	9,24	9,31	6,25	8,19	8,81	8,92	8,97	
	20	7,89	10,06	10,27	10,4	10,63	7,58	9,81	9,98	10,19	10,34	7,28	9,53	9,64	9,77	9,88	7,09	9,24	9,37	9,42	9,48	6,77	8,77	9,07	9,1	9,19	

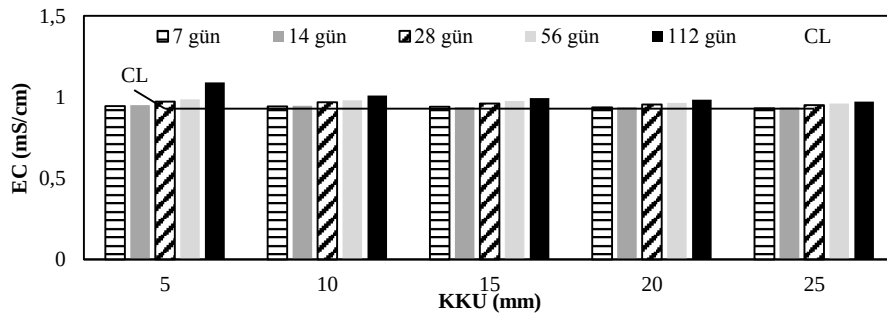
4.3.3. EC Deney Sonuçları

Biyopolimer (NaAL) ve kimyasal (NaOH, KOH) katkı maddeleri ile oluşturulan derin karıştırma kolonları kenarlarından farklı uzaklıklardaki EC değerlerinin belirlenmesi bölüm 3.2.2.c de anlatıldığı gibi yapılmıştır. Bölüm 3.2.2.c’de izah edilen yöntemle elde edilen EC deney sonuçları kullanılarak her bir katkı maddesi ve kür süreleri için EC-KKU ilişkisi çizilmiştir.

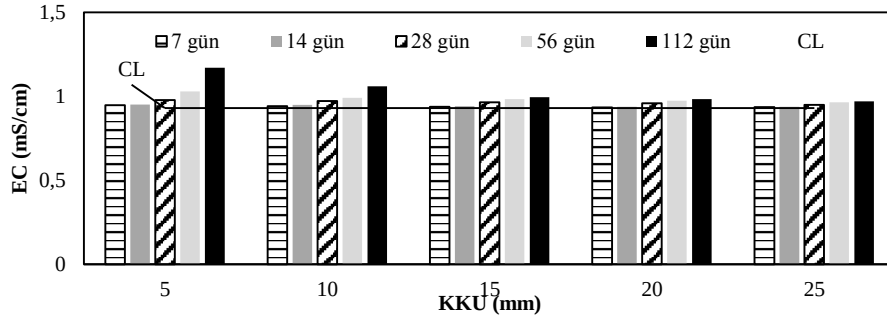
%0,25, %0,5, %0,75 ve %1 NaAL katkı malzemesi ilave edilerek derin karıştırma yöntemi ile oluşturulan kolonlara ait EC-KKU ilişkisi sırasıyla Şekil 4.61, Şekil 4.62, Şekil 4.63 ve Şekil 4.64’de gösterilmiştir.



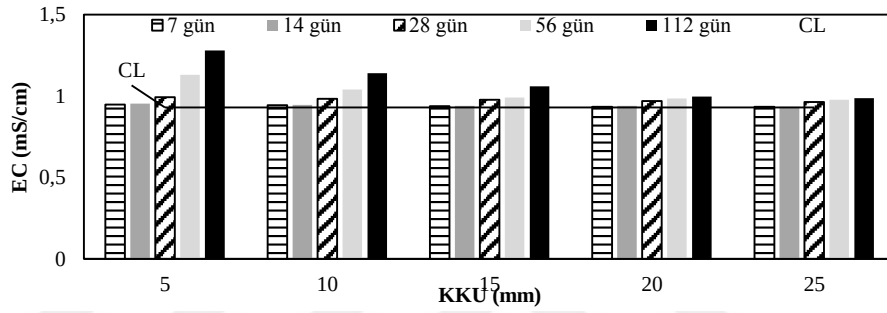
Şekil 4.61. EC-KKU ilişkisi (%0,25 NaAL)



Şekil 4.62. EC-KKU ilişkisi (%0,5 NaAL)



Şekil 4.63. EC-KKU ilişkisi (%0,75 NaAL)



Şekil 4.64. EC-KKU ilişkisi (%1 NaAL)

Kür süresi arttıkça derin karıştırma yöntemi ile elde edilmiş her bir kolon kenar uzaklığı (KKU) için EC değerinde önemli bir değişiklik olmadığı Şekil 4.61’de görülmektedir. Şeki 4.61’den KKU değeri arttıkça EC değeri tüm kür sürelerinde değişiklik göstermediği anlaşılmaktadır. Şekil 4.62 ve Şekil 4.63 incelendiğinde kür süresinin artmasıyla EC değerinde 56 günlük kür süresine kadar önemli bir değişiklik gözlenmezken 112 günlük kür süresinde tüm KKU lar için bir miktar artış olduğu görülmüştür. Aynı şekillerden KKU arttıkça 56 günlük kür süresine kadar EC değerinde önemli bir değişiklik olmazken 112 günlük kür süresinde kısmi bir azalmanın olduğu görülmektedir. Şekil 4.64 de kür süresinin artması EC değerinin tüm KKU larda artmasına neden olduğu görülmektedir. Bu artış 5 mm ve 10 mm KKU larda daha belirgindir. Ayrıca bu şekilden KKU arttıkça EC değerinde tüm kür sürelerinde azalma olmuştur. Bu duruma kolon kenarına yakın mesafelerde NaAL’ın CL ile daha fazla etkileşime girmesinin neden olduğu düşünülmektedir. Şekiller incelendiğinde NaAL katkı malzemesinin artmasıyla EC değerinin tüm KKU ve kür süreleri için artış gösterdiği anlaşılmaktadır.

Şekiller incelendiğinde maksimum EC değeri 112 gün kür süresi ve KCU 5 mm de olacak şekilde %0,25 NaAL, %0,5 NaAL, %0,75 NaAL ve %1 NaAL oranları için sırasıyla 0,97, 1,09, 1,17 ve 1,28 olarak belirlenmiştir. Bu değerler CL kili ile kıyaslandığında yaklaşık olarak sırasıyla %4, %17, %26 ve %38 artış olduğu belirlenmiştir.

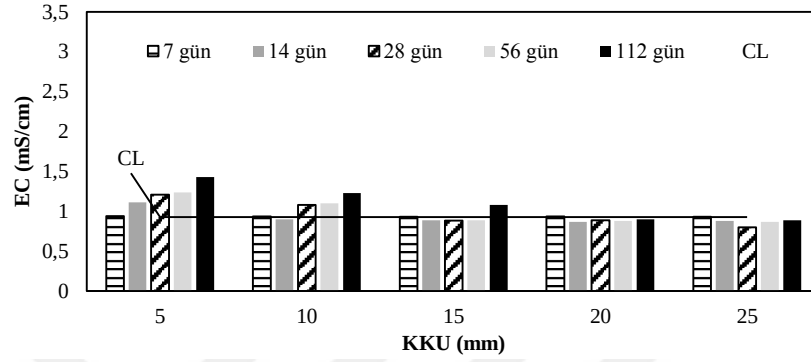
Derin karıştırma yöntemi ile farklı oranlarda NaAL katkı maddesi ilave edilerek oluşturulan kolonların farklı KCU ve farklı kür sürelerinde elde edilen EC değerleri toplu olarak Çizelge 4.12’de verilmiştir.



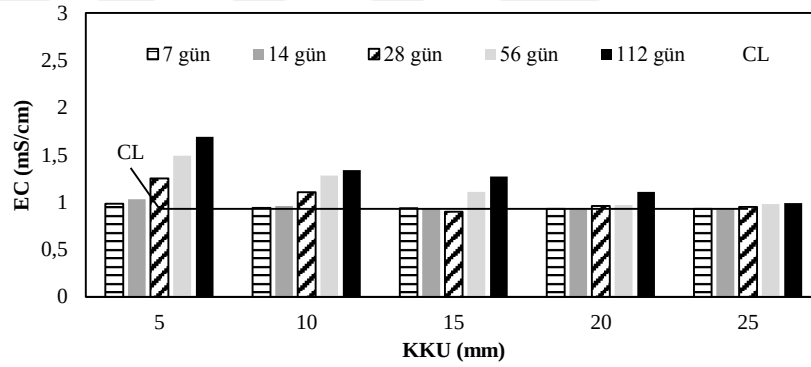
Çizelge 4.12. NaAL ile oluşturulan kolonların farklı K KU larda EC değeri

KKU (mm)		5					10					15					20					25				
Kür süresi (gün)		7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112
Yüzde (%)	0.25	0,941	0,948	0,96	0,966	0,97	0,937	0,946	0,957	0,961	0,968	0,938	0,944	0,951	0,957	0,961	0,937	0,938	0,947	0,951	0,955	0,935	0,934	0,941	0,946	0,95
	0.5	0,944	0,95	0,973	0,987	1,09	0,942	0,947	0,968	0,981	1,01	0,941	0,939	0,96	0,977	0,994	0,936	0,938	0,955	0,965	0,984	0,931	0,937	0,951	0,96	0,972
	0.75	0,948	0,951	0,977	1,03	1,17	0,941	0,949	0,971	0,991	1,06	0,937	0,941	0,965	0,983	0,994	0,933	0,938	0,958	0,974	0,983	0,935	0,937	0,95	0,965	0,97
	1	0,947	0,953	0,992	1,13	1,28	0,944	0,946	0,984	1,04	1,14	0,937	0,939	0,978	0,991	1,06	0,933	0,94	0,97	0,986	0,996	0,934	0,933	0,964	0,978	0,987

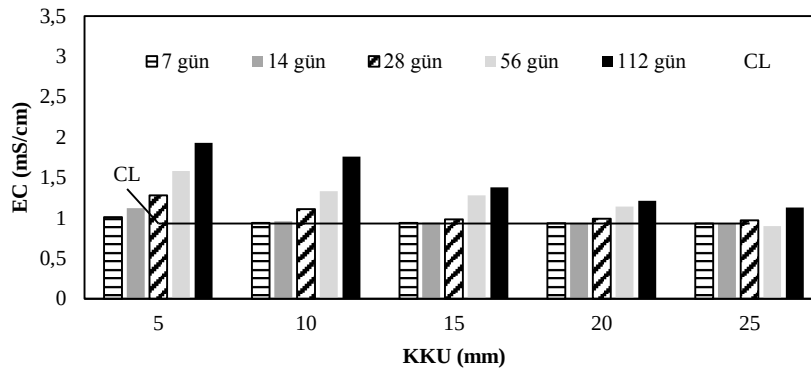
%1, %3, %5, %7, %10, %15 ve %20 NaOH katkı malzemesi ilave edilerek derin karıştırma yöntemi ile oluşturulan kolonlara ait EC-KKU ilişkisi sırasıyla Şekil 4.65, Şekil 4.66, Şekil 4.67, Şekil 4.68, Şekil 4.69, Şekil 4.70 ve Şekil 4.71’de gösterilmiştir.



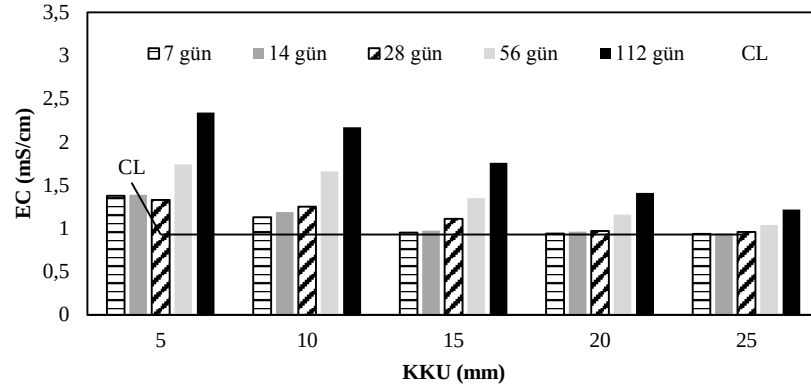
Şekil 4.65. EC-KKU ilişkisi (%1 NaOH)



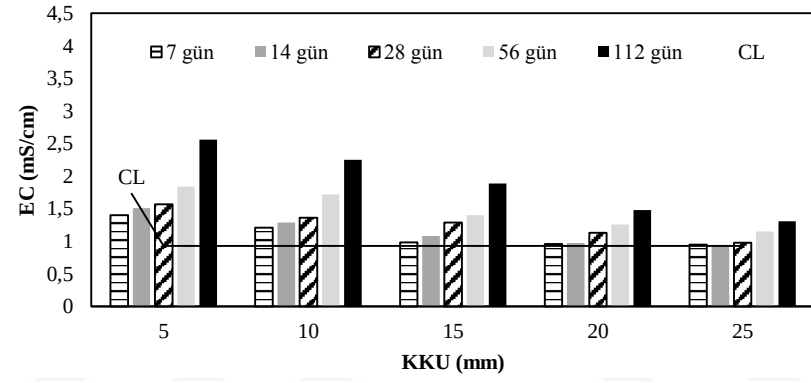
Şekil 4.66. EC-KKU ilişkisi (%3 NaOH)



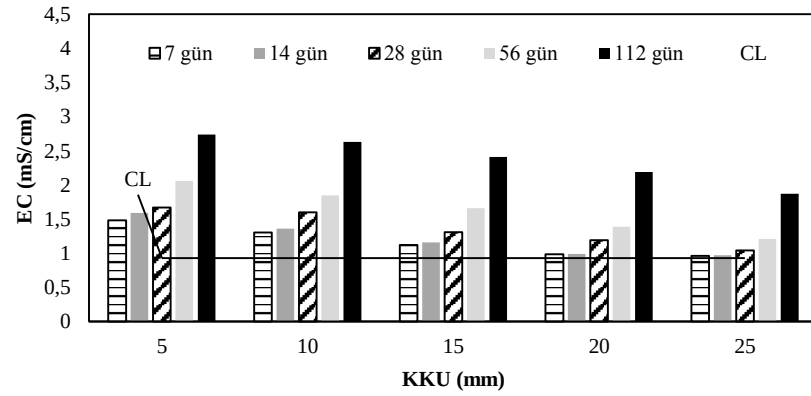
Şekil 4.67. EC-KKU ilişkisi (%5 NaOH)



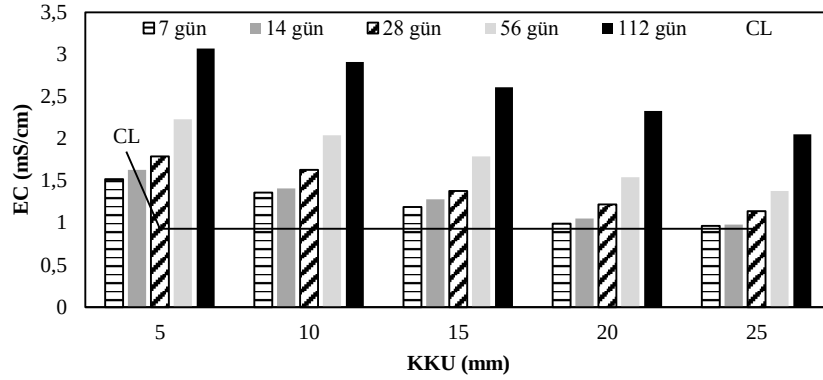
Şekil 4.68. EC-KKU ilişkisi (%7 NaOH)



Şekil 4.69. EC-KKU ilişkisi (%10 NaOH)



Şekil 4.70. EC-KKU ilişkisi (%15 NaOH)



Şekil 4.71. EC-KKU ilişkisi (%20 NaOH)

Şekil 4.65 de kür süresi arttıkça 5 mm ve 10 mm KKU da EC değerinde belirgin artışlar gözlenirken diğer KKU larda önemli bir değişiklik meydana gelmemiştir. KKU arttıkça EC değerinde genel olarak tüm kür sürelerinde azalma meydana gelmiştir. Şekil 4.66, Şekil 4.67, Şekil 4.68, Şekil 4.69, Şekil 4.70 ve Şekil 4.71 incelendiğinde kür süresinin artmasıyla EC değerinin genel olarak tüm KKU larda arttığı görülmektedir. Yine bu şekillerden KKU arttıkça EC değerinin tüm kür sürelerinde azalma meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bu duruma kolon kenarına yakın mesafelerde NaOH'ın CL ile daha fazla etkileşime girmesinin neden olduğu düşünülmektedir. Kil-su sisteminin elektriksel iletkenliği, karışımdaki iyonların tipi ve sayısı ile ilgilidir (Vural 2012). NaOH katkı maddesinin artmasıyla her bir kür süresi ve KKU da EC değerinin arttığı gözlemlenmiştir.

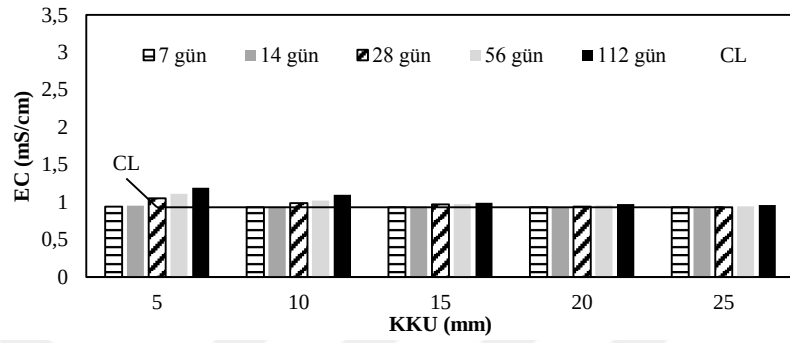
Şekiller incelendiğinde maksimum EC değeri 112 gün kür süresi ve KKU 5 mm de olacak şekilde %1 NaOH, %3 NaOH, %5 NaOH, %7 NaOH, %10 NaOH, %15 NaOH ve %20 NaOH oranları için sırasıyla 1,43, 1,69, 1,93, 2,34, 2,56, 2,74 ve 3,07 olarak belirlenmiştir. Bu değerler CL kili ile kıyaslandığında yaklaşık olarak sırasıyla %54, %82, %107,5, %152, %175, %195 ve %230 artış olduğu belirlenmiştir.

Derin karıştırma yöntemi ile farklı oranlarda NaOH katkı maddesi ilave edilerek oluşturulan kolonların farklı KKU ve farklı kür sürelerinde elde edilen Cu değerleri toplu olarak Çizelge 4.13'de verilmiştir.

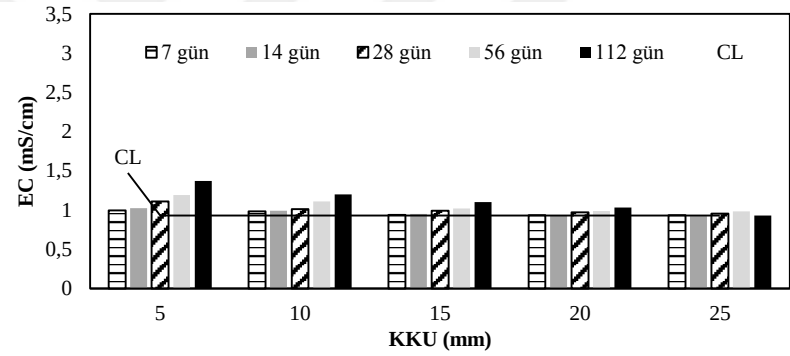
Çizelge 4.13. NaOH ile oluşturulan kolonların farklı K KU lar da EC değeri

EC (mS/cm)																										
KKU (mm)		5					10					15					20					25				
Kür süresi (gün)	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	
Yüzde (%)	1	0,941	1,11	1,21	1,237	1,43	0,937	0,9	1,08	1,1	1,23	0,934	0,89	0,88	0,889	1,08	0,936	0,87	0,89	0,88	0,9	0,934	0,88	0,8	0,87	0,89
	3	0,985	1,03	1,25	1,49	1,69	0,94	0,96	1,10	1,28	1,34	0,935	0,931	0,9	1,11	1,27	0,93	0,928	0,96	0,97	1,11	0,931	0,925	0,95	0,98	0,99
	5	1,01	1,12	1,28	1,58	1,93	0,938	0,957	1,11	1,33	1,76	0,937	0,944	0,98	1,28	1,38	0,935	0,937	0,99	1,14	1,21	0,93	0,927	0,97	0,9	1,13
	7	1,378	1,39	1,33	1,74	2,34	1,13	1,19	1,25	1,66	2,17	0,951	0,974	1,11	1,35	1,76	0,941	0,963	0,97	1,16	1,41	0,937	0,94	0,96	1,04	1,22
	10	1,4	1,51	1,57	1,84	2,56	1,21	1,29	1,36	1,72	2,25	0,984	1,08	1,29	1,4	1,89	0,96	0,974	1,13	1,26	1,48	0,951	0,944	0,98	1,15	1,31
	15	1,48	1,59	1,67	2,06	2,74	1,304	1,36	1,599	1,85	2,63	1,12	1,16	1,31	1,66	2,41	0,983	0,99	1,19	1,39	2,19	0,961	0,97	1,04	1,21	1,87
	20	1,52	1,63	1,79	2,23	3,07	1,36	1,41	1,63	2,04	2,91	1,19	1,28	1,38	1,79	2,61	0,99	1,05	1,22	1,54	2,33	0,965	0,978	1,14	1,38	2,05

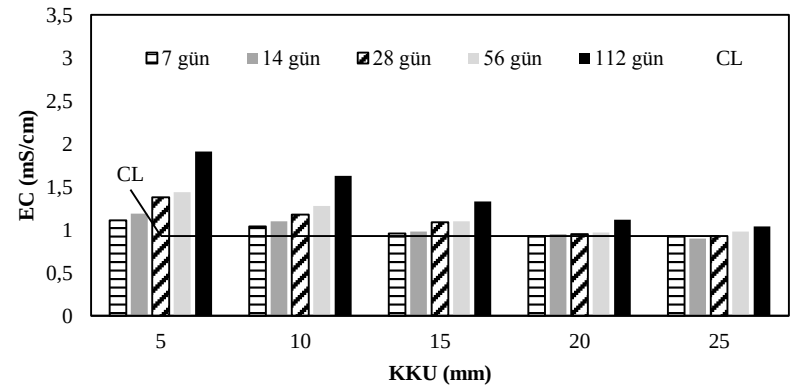
%1, %3, %5, %7, %10, %15 ve %20 KOH katkı malzemesi ilave edilerek derin karıştırma yöntemi ile oluşturulan kolonlara ait EC-KKU ilişkisi sırasıyla Şekil 4.72, Şekil 4.73, Şekil 4.74, Şekil 4.75, Şekil 4.76, Şekil 4.77 ve Şekil 4.78’de gösterilmiştir.



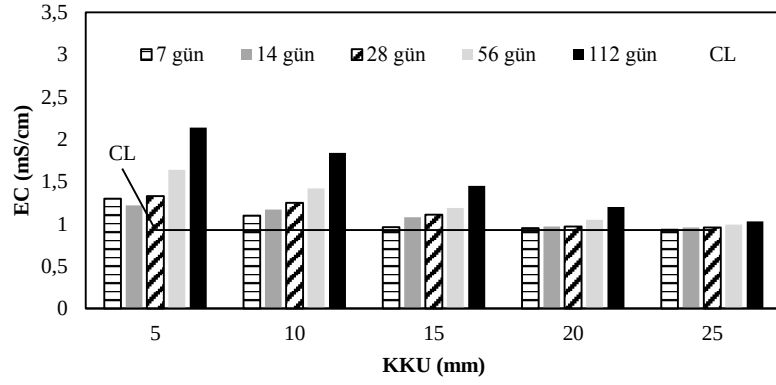
Şekil 4.72. EC-KKU ilişkisi (%1 KOH)



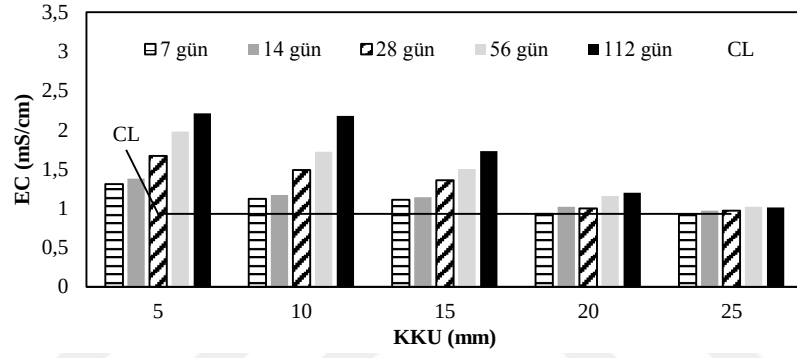
Şekil 4.73. EC-KKU ilişkisi (%3 KOH)



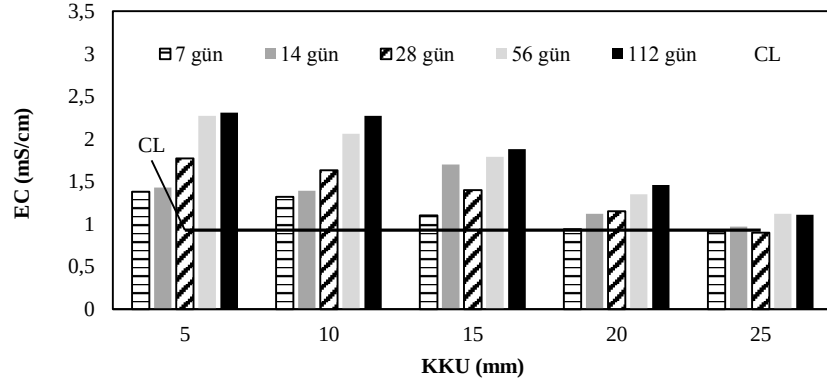
Şekil 4.74. EC-KKU ilişkisi (%5 KOH)



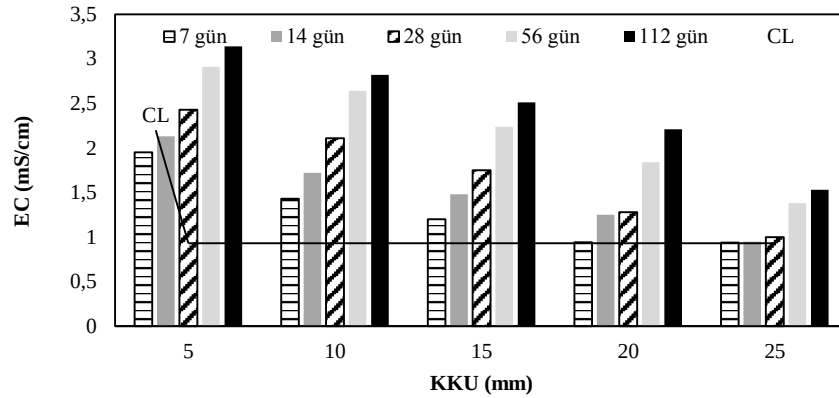
Şekil 4.75. EC-KKK ilişkisi (%7 KOH)



Şekil 4.76. EC-KKK ilişkisi (%10 KOH)



Şekil 4.77. EC-KKK ilişkisi (%15 KOH)



Şekil 4.78. EC-KKU ilişkisi (%20 KOH)

Şekil 4.72 ve Şekil 4.73 de kür süresi arttıkça 5 mm ve 10 mm KKU da EC değerinde belirgin artışlar gözlenirken diğer KKU larda önemli bir değişiklik meydana gelmemiştir. KKU arttıkça EC değerinde genel olarak tüm kür sürelerinde azalma meydana gelmiştir. Şekil 4.73, Şekil 4.74, Şekil 4.75, Şekil 4.76, Şekil 4.77 ve Şekil 4.78 incelendiğinde kür süresinin artmasıyla EC değerinin genel olarak tüm KKU larda arttığı görülmektedir. Yine bu şekillerden KKU arttıkça EC değerinin tüm kür sürelerinde azalma meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bu duruma kolon kenarına yakın mesafelerde KOH'ın CL ile daha fazla etkileşime girmesinin neden olduğu düşünülmektedir. KOH katkı maddesinin artmasıyla her bir kür süresi ve KKU da EC değerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Şekiller incelendiğinde maksimum EC değeri 112 gün kür süresi ve KKU 5 mm de olacak şekilde %1 KOH, %3 KOH, %5 KOH, %7 KOH, %10 KOH, %15 KOH ve %20 KOH oranları için sırasıyla 1,19, 1,37, 1,91, 2,14, 2,21, 2,31 ve 3,14 olarak belirlenmiştir. Bu değerler CL kili ile kıyaslandığında yaklaşık olarak sırasıyla %28, %47, %105, %130, %138, %148.5 ve %238 artış olduğu belirlenmiştir.

Derin karıştırma yöntemi ile farklı oranlarda NaOH katkı maddesi ilave edilerek oluşturulan kolonların farklı KKU ve farklı kür sürelerinde elde edilen Cu değerleri toplu olarak Çizelge 4.14'de verilmiştir.

Çizelge 4.14. KOH ile oluşturulan kolonların farklı K KU larda EC değeri

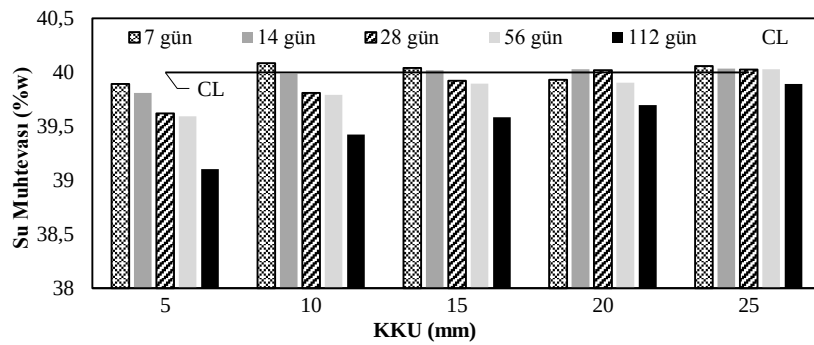
EC (mS/cm)																										
KKU (mm)		5					10					15					20					25				
Kür süresi (gün)	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	
Yüzde (%)	1	0,939	0,954	1,05	1,11	1,19	0,93	0,941	0,988	1,02	1,1	0,931	0,938	0,97	0,975	0,993	0,93	0,934	0,941	0,957	0,974	0,931	0,92	0,931	0,944	0,961
	3	0,955	1,02	1,11	1,19	1,37	0,98	0,99	1,01	1,11	1,2	0,93	0,95	0,99	1,02	1,1	0,93	0,934	0,971	0,987	1,03	0,932	0,92	0,955	0,981	0,93
	5	1,11	1,19	1,38	1,44	1,91	1,04	1,1	1,18	1,28	1,63	0,96	0,98	1,09	1,1	1,33	0,93	0,95	0,95	0,97	1,12	0,93	0,9	0,93	0,98	1,04
	7	1,3	1,22	1,33	1,64	2,14	1,097	1,17	1,25	1,42	1,84	0,963	1,08	1,11	1,19	1,45	0,951	0,97	0,97	1,05	1,2	0,931	0,96	0,96	0,991	1,03
	10	1,31	1,38	1,67	1,98	2,21	1,12	1,17	1,49	1,72	2,18	1,11	1,14	1,36	1,5	1,73	0,93	1,02	1,0	1,16	1,2	0,92	0,97	0,97	1,02	1,01
	15	1,38	1,43	1,77	2,27	2,31	1,32	1,39	1,63	2,06	2,27	1,1	1,2	1,4	1,79	1,88	0,94	1,12	1,15	1,35	1,46	0,91	0,97	0,9	1,12	1,11
20	1,95	2,13	2,43	2,91	3,14	1,43	1,72	2,11	2,64	2,82	1,2	1,48	1,75	2,24	2,51	0,94	1,25	1,28	1,84	2,21	0,938	0,95	1,0	1,38	1,53	

NaAL, NaOH ve KOH katkı malzemeleri ile hazırlanan numunelerin EC deney sonuçlarını literatürdeki çalışma sonuçlarının desteklediği görülmektedir. Bu bağlamda benzer sonuçlar Vural (2012) tarafından yapılan çalışmada kil-su sisteminin elektriksel iletkenliği, karışımdaki iyonların tipi ve sayısı ile ilgili olduğunu ve dane konsantrasyonu artarsa, kil yüzeyindeki iyonlar solüsyona karışacağı, elektriksel alan altındaki katyon iyonlarının iletkenliği ve kolloidal danelerin hareketi solüsyonun iletkenliğini artıracığı şeklinde izah etmiştir.

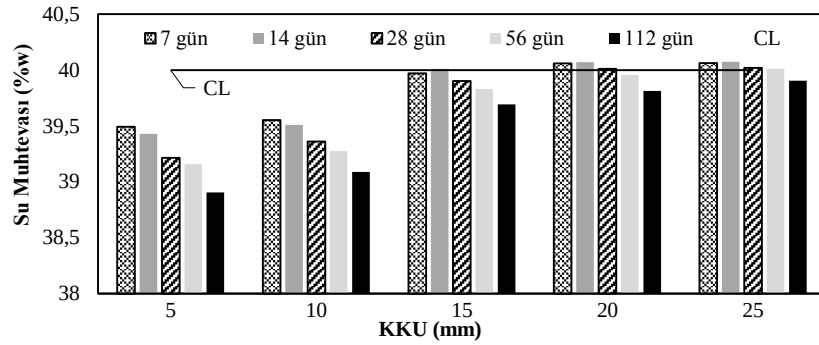
4.3.4. Su Muhtevası (%W) Deney Sonuçları

Biyopolimer (NaAL) ve kimyasal (NaOH, KOH) katkı maddeleri ile oluşturulan derin karıştırma kolonları kenarlarından farklı uzaklıklardaki w değerlerinin belirlenmesi bölüm 3.2.2.d de anlatıldığı gibi yapılmıştır. Bölüm 3.2.2.d’de izah edilen yöntemle elde edilen w deney sonuçları kullanılarak her bir katkı maddesi ve kür süreleri için w-KKU ilişkisi çizilmiştir.

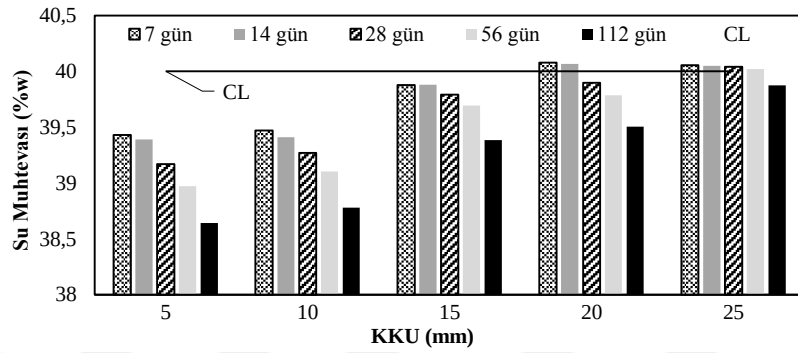
%0,25, %0,5, %0,75 ve %1 NaAL katkı malzemesi ilave edilerek derin karıştırma yöntemi ile oluşturulan kolonlara ait w-KKU ilişkisi sırasıyla Şekil 4.79, Şekil 4.80, Şekil 4.81 ve Şekil 4.82’de gösterilmiştir.



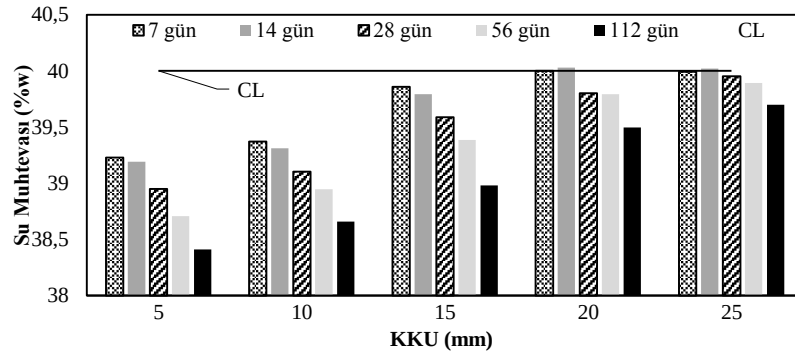
Şekil 4.79. w-KKU ilişkisi (%0,25 NaAL)



Şekil 4.80. w-KKU ilişkisi (%0,5 NaAL)



Şekil 4.81. w-KKU ilişkisi (%0,75 NaAL)



Şekil 4.82. w-KKU ilişkisi (%1 NaAL)

Şekil 4.79, Şekil 4.80 ve Şekil 4.81 incelendiğinde kür süresi arttıkça su muhtevası 25 mm KKK hariç diğer KKK larda genel olarak azalma göstermiştir. Yine bu şekillerde KKK arttıkça su muhtevasının tüm kür sürelerinde arttığı anlaşılmaktadır. Yani kolon kenarından uzaklaştıkça etki yarıçapının dışına çıkılmakta burada NaAL difüzyonunun azalması nedeni ile suya ihtiyaç duyulmadığı anlaşılmaktadır. %1 NaAL katkı maddesi kullanılarak oluşturulan kolonlarda kür süresinin artmasıyla su muhtevasının genel olarak tüm KKK larda azaldığı Şekil 4.82 de görülmektedir. Yine bu kolonlarda KKK arttıkça

su muhtevasının tüm kür sürelerinde artış gösterdiği belirlenmiştir. Tüm şekiller birlikte değerlendirildiğinde NaAL biyopolimer oranının artmasıyla her bir kür süresi ve K KU da w değerinin kısmen azaldığı gözlemlenmiştir.

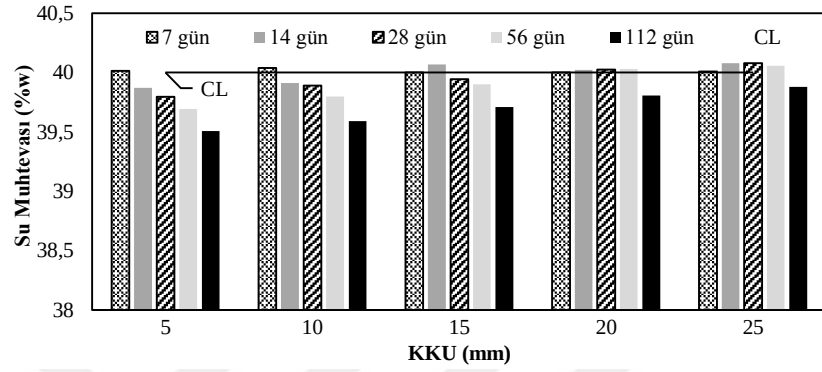
Şekiller incelendiğinde minimum w değeri 112 gün kür süresi ve K KU 5 mm de olacak şekilde %0,25 NaAL, %0,5 NaAL, %0,75 NaAL ve %1 NaAL oranları için sırasıyla 39.103, 38.906, 38.643 ve 38.409 olarak belirlenmiştir. Bu değerler CL kili ile kıyaslandığında yaklaşık olarak sırasıyla %2,25, %2,75, %3,5 ve %4 artış olduğu belirlenmiştir.

Derin karıştırma yöntemi ile farklı oranlarda NaAL katkı maddesi ilave edilerek oluşturulan kolonların farklı K KU ve farklı kür sürelerinde elde edilen w değerleri toplu olarak Çizelge 4.15’de verilmiştir.

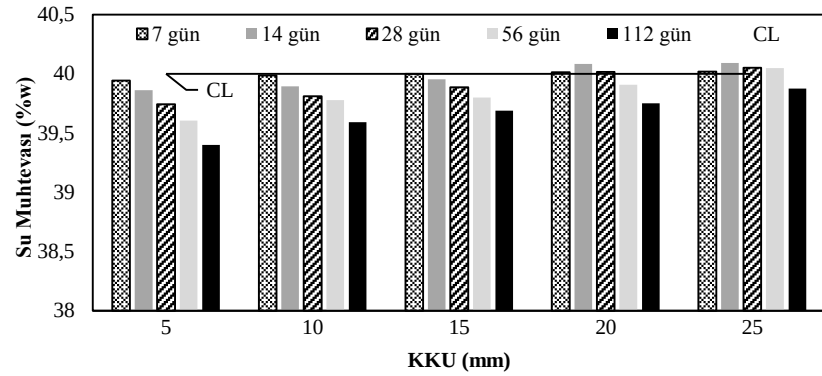
Çizelge 4.15. NaAL ile oluşturulan kolonların farklı K KU larda w değeri

w (%)																										
KKU (mm)		5					10					15					20					25				
Kür süresi (gün)		7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112
Yüzde (%)	0,25	39,89	39,81	39,62	39,59	39,10	40,08	39,98	39,81	39,79	39,42	40,04	40,02	39,92	39,89	39,58	39,93	40,028	40,02	39,90	39,69	40,05	40,03	40,02	40,03	39,89
	0,5	39,49	39,43	39,21	39,15	38,9	39,5	39,5	39,36	39,27	39,08	39,97	40,01	39,9	39,83	39,69	40,05	40,07	40,01	39,95	39,81	40,06	40,07	40,02	40,01	39,90
	0,75	39,43	39,39	39,17	38,97	38,64	39,47	39,41	39,27	39,10	38,77	39,87	39,88	39,79	39,69	39,38	40,07	40,06	39,89	39,78	39,5	40,05	40,05	40,04	40,02	39,87
	1	39,22	39,19	38,95	38,70	38,40	39,37	39,31	39,10	38,94	38,65	39,85	39,79	39,58	39,38	38,98	40	40,03	39,80	39,79	39,49	39,99	40,02	39,95	39,89	39,69

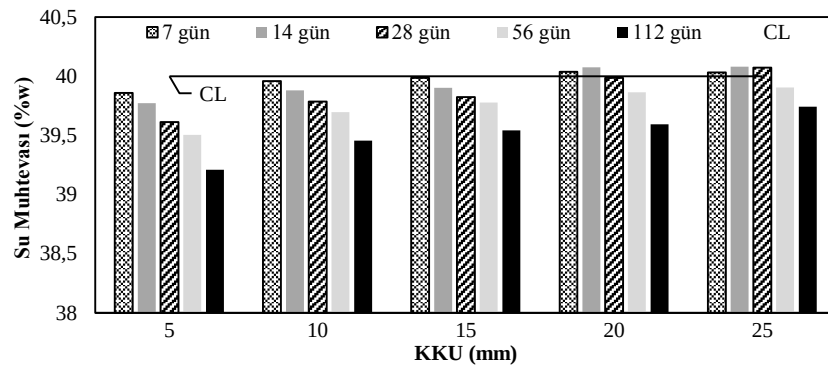
%1, %3, %5, %7, %10, %15 ve %20 NaOH katkı malzemesi ilave edilerek derin karıştırma yöntemi ile oluşturulan kolonlara ait w-KKU ilişkisi sırasıyla Şekil 4.83, Şekil 4.84, Şekil 4.85, Şekil 4.86, Şekil 4.87, Şekil 4.88 ve Şekil 4.89’da gösterilmiştir.



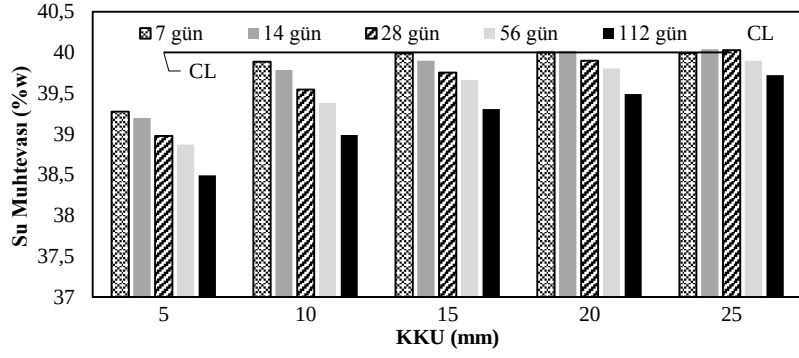
Şekil 4.83. w-KKU ilişkisi (%1 NaOH)



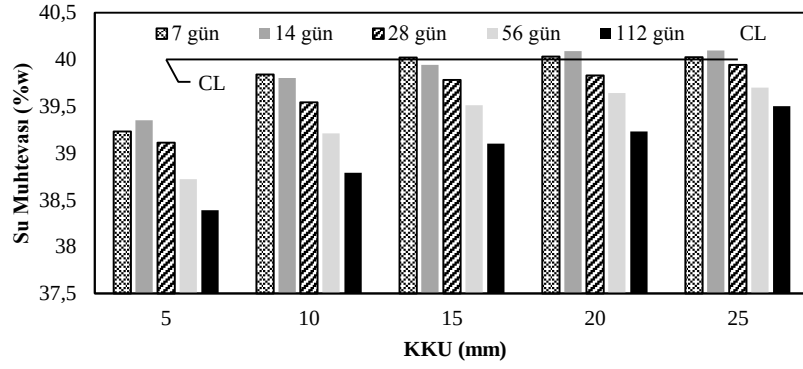
Şekil 4.84. w-KKU ilişkisi (%3 NaOH)



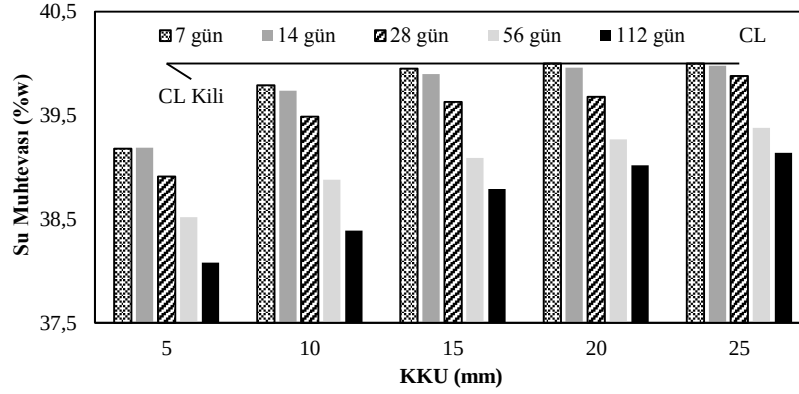
Şekil 4.85. w-KKU ilişkisi (%5 NaOH)



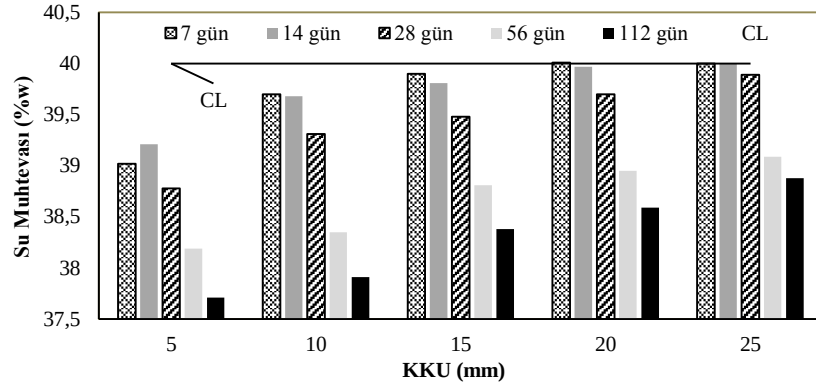
Şekil 4.86. w-KKU ilişkisi (%7 NaOH)



Şekil 4.87. w-KKU ilişkisi (%10 NaOH)



Şekil 4.88. w-KKU ilişkisi (%15 NaOH)



Şekil 4.89. w-KKU ilişkisi (%20 NaOH)

Şekil 4.83, Şekil 4.84, Şekil 4.85, Şekil 4.86, Şekil 4.87, Şekil 4.88 ve Şekil 4.89 incelendiğinde kür süresi arttıkça su muhtevası tüm KKU larda genel olarak azalma göstermiştir. Yine bu şekillerde KKU arttıkça su muhtevasının tüm kür sürelerinde arttığı anlaşılmaktadır. Yani kolon kenarından uzaklaştıkça etki yarıçapının dışına çıkılmakta burada NaOH difüzyonunun azalması nedeni ile suya ihtiyaç duyulmadığı anlaşılmaktadır. Tüm şekiller birlikte ele alındığında değerlendirildiğinde NaOH katkı madde oranının artmasıyla her bir kür süresi ve KKU da w değerinin kısmen azaldığı gözlemlenmiştir.

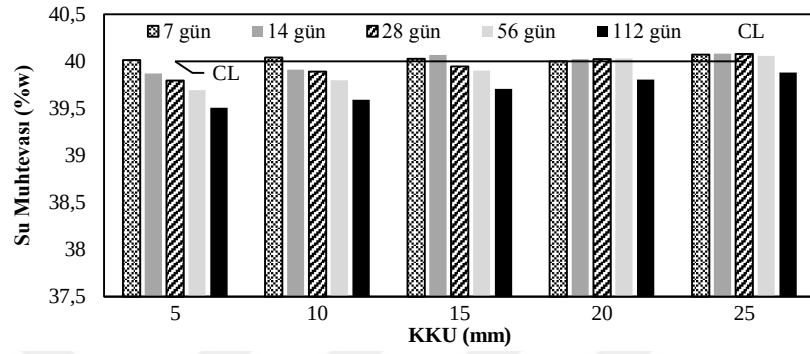
Şekiller incelendiğinde minimum w değeri 112 gün kür süresi ve KKU 5 mm de olacak şekilde %1 NaOH, %3 NaOH, %5 NaOH, %7 NaOH, %10 NaOH, %15 NaOH ve %20 NaOH oranları için sırasıyla 39,507, 39,401, 39,21, 38,491, 38,39, 38,08 ve 37,71 olarak belirlenmiştir. Bu değerler CL kili ile kıyaslandığında yaklaşık olarak sırasıyla %1.2, 1.5, 2, 3.7, 4, 4.8 ve 5.7 artış olduğu belirlenmiştir.

Derin karıştırma yöntemi ile farklı oranlarda NaOH katkı maddesi ilave edilerek oluşturulan kolonların farklı KKU ve farklı kür sürelerinde elde edilen w değerleri toplu olarak Çizelge 4.16'da verilmiştir.

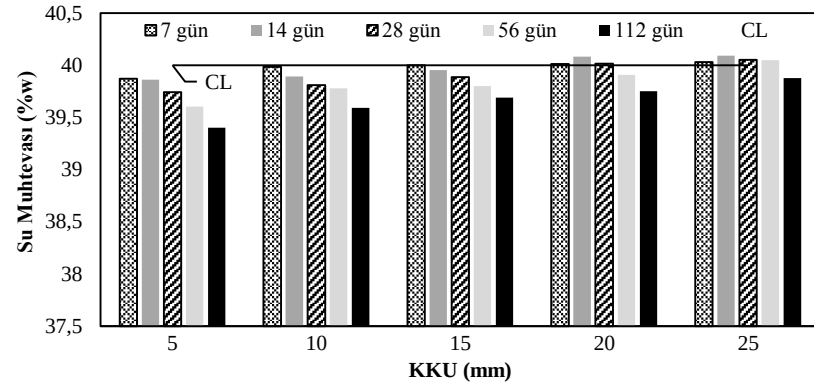
Çizelge 4.16. NaOH ile oluşturulan kolonların farklı K KU larda w değeri

w (%)																										
KKU (mm)		5					10					15					20					25				
Kür süresi (gün)	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	
Yüzde (%)	1	40,01	39,87	39,79	39,69	39,5	40,03	39,91	39,89	39,79	39,59	40,0	40,0	39,94	39,9	39,7	40,0	40,0	40,0	40,0	39,8	40,01	40,0	40,0	40,0	39,88
	3	39,94	39,86	39,74	39,6	39,4	39,98	39,89	39,81	39,77	39,59	40,0	39,95	39,88	39,8	39,68	40,0	40,0	40,0	39,9	39,75	40,01	40,02	40,05	40,04	39,87
	5	39,85	39,77	39,61	39,5	39,21	39,95	39,88	39,78	39,69	39,45	39,98	39,90	39,82	39,77	39,54	40,0	40,02	39,98	39,86	39,59	40,03	40,03	40,0	39,9	39,74
	7	39,27	39,19	38,97	38,87	38,49	39,88	39,78	39,54	39,37	38,98	39,98	39,89	39,75	39,66	39,3	40,0	40,02	39,90	39,80	39,49	39,99	40,04	40,03	39,90	39,72
	10	39,23	39,04	38,85	38,72	38,39	39,84	39,67	38,97	38,90	38,79	40,02	39,73	39,53	39,47	39,10	40,03	40,01	39,78	39,64	39,23	40,02	40,01	39,94	39,88	39,50
	15	39,18	38,95	38,68	38,52	38,08	39,79	39,50	38,88	38,72	38,39	39,95	39,71	39,41	39,09	38,79	40,0	39,86	39,61	39,27	39,02	40,0	39,98	39,8	39,48	39,14
20	39,02	38,76	38,53	38,19	37,71	39,7	39,38	38,78	38,35	37,91	39,9	39,61	39,27	38,81	38,38	40,01	39,7	39,34	38,95	38,59	40,0	39,9	39,73	39,09	38,88	

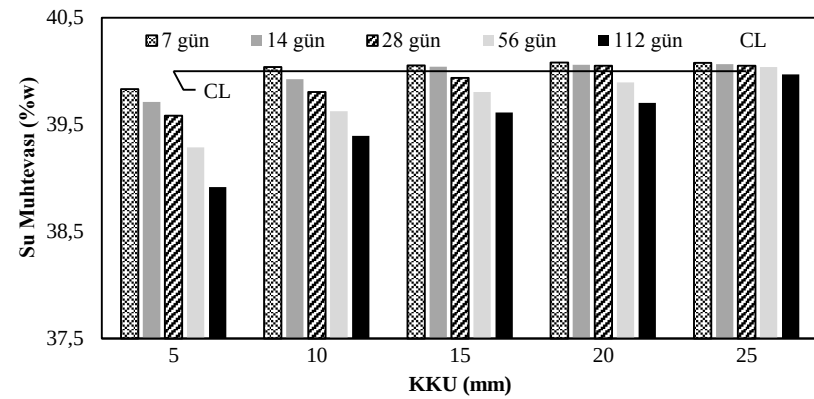
%1, %3, %5, %7, %10, %15 ve %20 KOH katkı malzemesi ilave edilerek derin karıştırma yöntemi ile oluşturulan kolonlara ait EC-KKU ilişkisi sırasıyla Şekil 4.90, Şekil 4.91, Şekil 4.92, Şekil 4.93, Şekil 4.94, Şekil 4.95 ve Şekil 4.96’da gösterilmiştir.



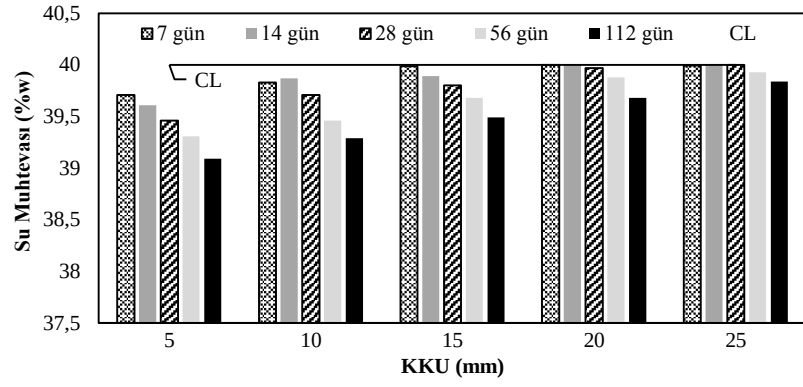
Şekil 4.90. w-KKU ilişkisi (%1 KOH)



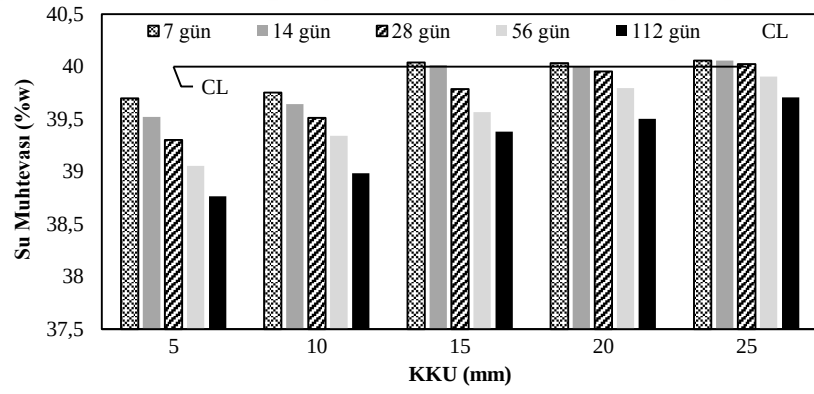
Şekil 4.91. w-KKU ilişkisi (%3 KOH)



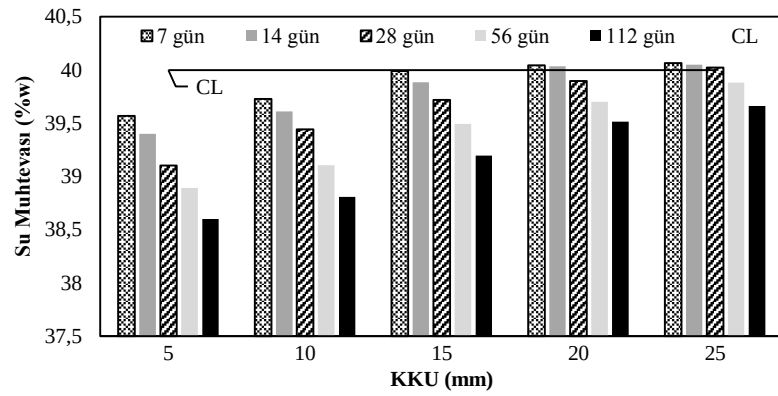
Şekil 4.92. w-KKU ilişkisi (%5 KOH)



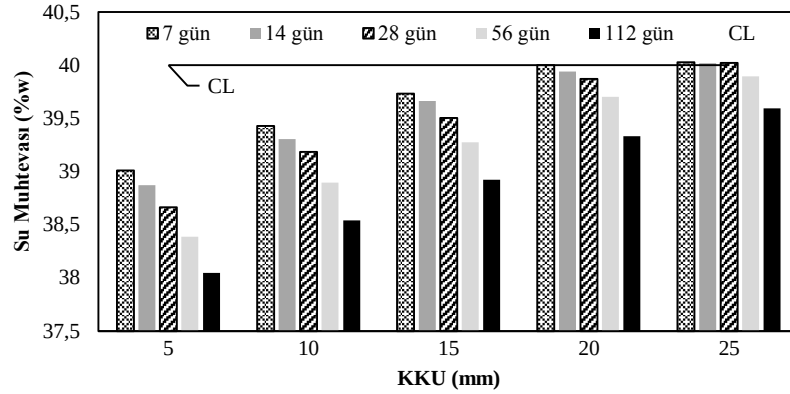
Şekil 4.93. w-KKU ilişkisi (%7 KOH)



Şekil 4.94. w-KKU ilişkisi (%10 KOH)



Şekil 4.95. w-KKU ilişkisi (%15 KOH)



Şekil 4.96. w-KKU ilişkisi (%20 KOH)

Şekil 4.90, Şekil 4.91, Şekil 4.92, Şekil 4.93, Şekil 4.94, Şekil 4.95 ve Şekil 4.96 incelendiğinde kür süresi arttıkça su muhtevası tüm KKK larda genel olarak azalma göstermiştir. Yine bu şekillerde KKK arttıkça su muhtevasının tüm kür sürelerinde arttığı anlaşılmaktadır. Yani kolon kenarından uzaklaştıkça etki yarıçapının dışına çıkılmakta burada KOH difüzyonunun azalması nedeni ile suya ihtiyaç duyulmadığı anlaşılmaktadır. Tüm şekiller birlikte ele alındığında değerlendirildiğinde KOH katkı madde oranının artmasıyla her bir kür süresi ve KKK da w değerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Şekiller incelendiğinde minimum w değeri 112 gün kür süresi ve KKK 5 mm de olacak şekilde %1 KOH, %3 KOH, %5 KOH, %7 KOH, %10 KOH, %15 ve %20 KOH oranları için sırasıyla 39,507, 39,401, 38,915, 39,09, 38,764, 38,601 ve 38,046 olarak belirlenmiştir. Bu değerler CL kili ile kıyaslandığında yaklaşık olarak sırasıyla %1,23, %1,5, %2,7, %2,27, %3,09, %3,5 ve %4,9 artış olduğu belirlenmiştir.

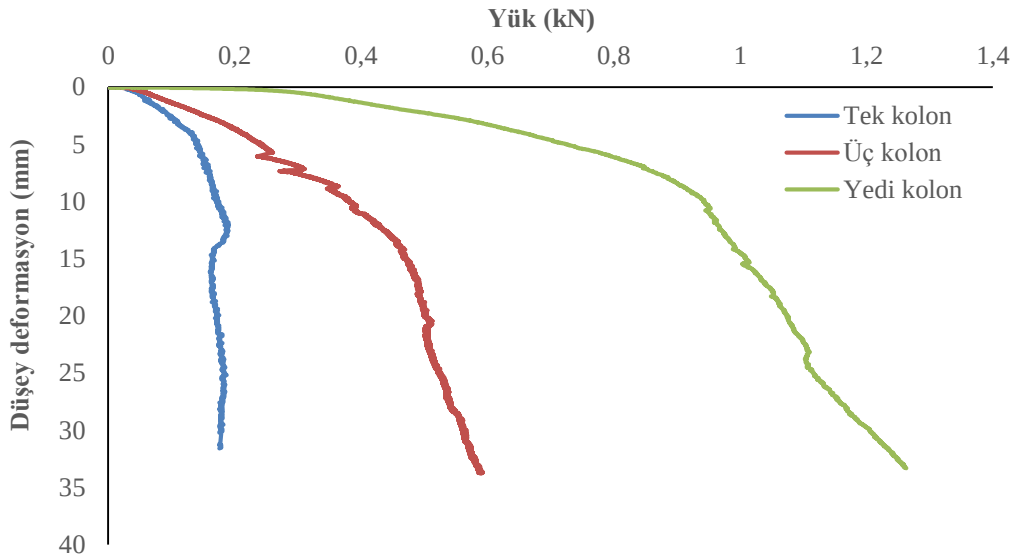
Derin karıştırma yöntemi ile farklı oranlarda KOH katkı maddesi ilave edilerek oluşturulan kolonların farklı KKK ve farklı kür sürelerinde elde edilen w değerleri toplu olarak Çizelge 4.17’de verilmiştir.

Çizelge 4.17. KOH ile oluşturulan kolonların farklı K KU larda w değeri

		w (%)																								
KKU (mm)		5					10					15					20					25				
Kür süresi (gün)		7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112	7	14	28	56	112
Yüzde (%)	1	40,01	39,87	39,79	39,69	39,5	40,03	39,91	39,89	39,79	39,59	40,02	40,0	39,94	39,9	39,7	40,0	40,0	40,01	40,03	39,80	40,07	40,0	40,01	40,05	39,88
	3	39,87	39,86	39,74	39,6	39,4	39,98	39,89	39,81	39,77	39,59	40,0	39,95	39,88	39,8	39,68	40,01	40,02	40,01	39,90	39,75	40,03	40,02	40,05	40,04	39,87
	5	39,83	39,71	39,58	39,28	38,91	40,03	39,92	39,8	39,62	39,39	40,05	40,04	39,93	39,8	39,61	40,07	40,05	40,0	39,89	39,7	40,07	40,06	40,05	40,06	39,96
	7	39,71	39,61	39,46	39,31	39,09	39,83	39,87	39,71	39,46	39,29	39,98	39,89	39,8	39,68	39,49	40,0	40,0	39,97	39,88	39,68	39,99	40,0	40,0	39,93	39,87
	10	39,69	39,52	39,30	39,05	38,76	39,75	39,64	39,51	39,34	38,98	40,03	40,01	39,78	39,56	39,38	40,03	40,0	39,95	39,79	39,5	40,05	40,05	40,02	39,9	39,7
	15	39,56	39,40	39,10	38,89	38,60	39,72	39,61	39,44	39,10	38,80	39,98	39,88	39,72	39,49	39,19	40,04	40,03	39,89	39,7	39,51	40,06	40,05	40,2	39,88	39,66
	20	39,01	38,87	38,66	38,38	38,04	39,42	39,30	39,18	38,89	38,54	39,73	39,66	39,5	39,27	38,92	40,0	39,94	39,87	39,7	39,33	40,02	40,0	40,02	39,89	39,59

4.4. Derin Karıştırma Uygulanmış Büyük Model Deney (BMD) Sonuçları

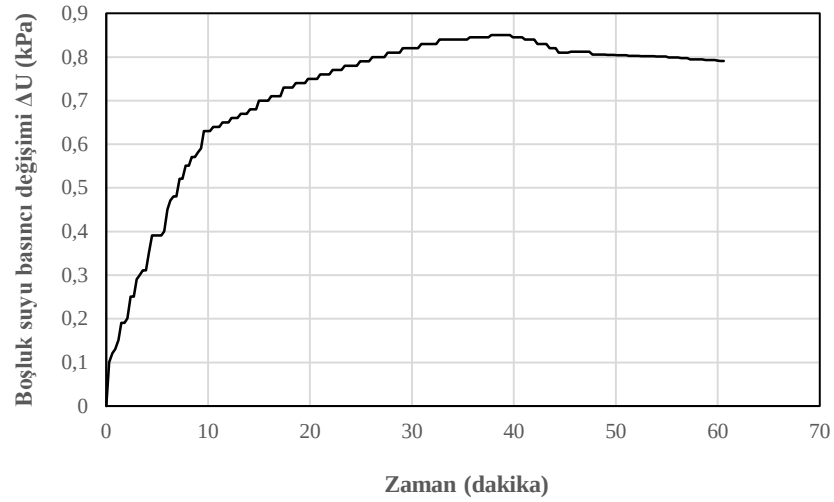
Deneylerin üçüncü aşamasında çapı 1000 mm yüksekliği 400 mm olan silindirik tank içerisine 200 mm yüksekliğinde yerleştirilen kil zeminde deneyler yürütülmüştür. Bu deneylerde ikinci aşamada belirlenen %20 NaOH kullanılmıştır. Tankın içerisine yerleştirilen suya doymuş kil zemin içerisine çapı 30 mm ve yüksekliği 200 mm olan kolon imal edilmiştir. Belirtilen boyutlardaki kolon tankın içerisinde tekli, üçlü ve yedili olacak şekilde hazırlanmıştır. 28 günlük kür süresince deney sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak her bir kolon grubu için yük-düşey deformasyon ilişkisi Şekil 4.97'de gösterilmiştir.



Şekil 4.97. Yük-düşey deformasyon ilişkisi

Yük taşıma kapasitesi olmayan yumuşak kil zeminde %20 NaOH kullanılarak derin karıştırma yöntemiyle imal edilen kolonlar ile yük taşıma kapasitesinin elde edildiği Şekil 4.97 görülmektedir. Şekil incelendiğinde beklenildiği üzere yedili kolon grubunun aynı düşey deformasyonda en fazla yük taşıdığı açıkça görülmektedir. Bu sonuç bize tez kapsamında kullanılan biyopolimer ve kimyasalların yumuşak kil zeminlerde taşıma gücünü artırmada kullanılabileceğini göstermektedir.

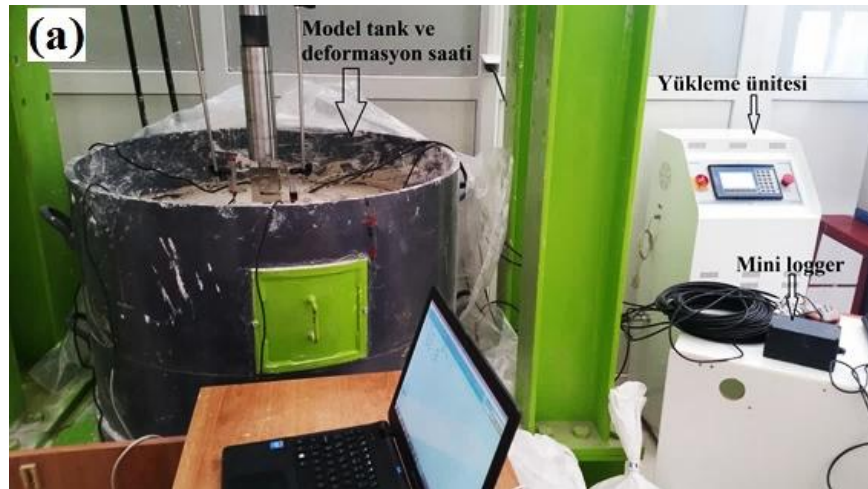
Yedili kolon grubunun yüklemesi sırasında 200 mm derinliğe yatay konumda yerleştirilen piyezometre deney aletinden veriler kullanılarak boşluk suyu basıncı değişimi (ΔU)-zaman ilişkisi Şekil 4.98 de gösterilmiştir.



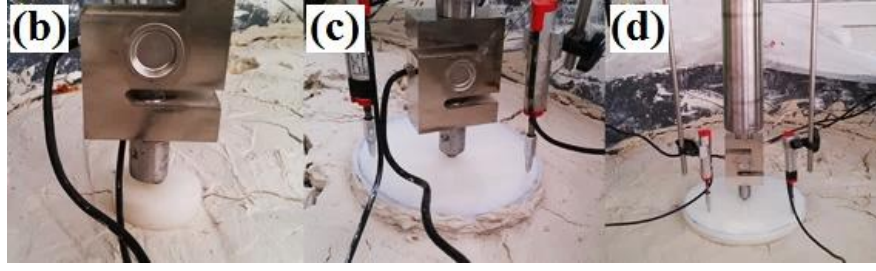
Şekil 4.98. Boşluk suyu basıncı değişimi-zaman ilişkisi (200 mm derinlik)

Şekil 4.98 de görüldüğü üzere yedili kolonlardaki yükleme değerinin artmasıyla boşluk suyu basıncı değişimininde artmaktadır. Boşluk suyu basıncı değişiminindeki artış kolonların yenilmesine kadar devam etmiş daha sonra azalma eğilimine başlamıştır.

Kolonların yükleme sırasındaki bazı görüntüleri Şekil 4.100a-b-c-d’de gösterilmiştir.



Şekil 4.99. Yükleme görüntüleri (a- Model tank)



Şekil 4.99. Yükleme görüntüleri (b- Tekli kolon yüklemesi, c- Üçlü kolon yüklemesi, d- Yedili kolon kolon yüklemesi) (Devam)

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, suya doygun düşük plastisiteli kil (CL) zemininin iyileştirilmesinde biyopolimer (NaAL) ve kimyasallar (NaOH ve KOH) kullanılmıştır. Bu amaçla derin karıştırma yöntemiyle imal edilen numuneler üzerinde, serbest basınç deneyleri (UCS), küçük model deneyleri ve büyük tank deneyi yapılmıştır. Maksimum q_u değerlerini veren numunelerin XRD ve SEM / EDX analizleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir:

NaAL'ın maksimum q_u değeri %1 oranı ve 28 günlük kür süresinde yaklaşık 5347 kPa (5,347 MPa) olarak elde edilmiştir. Bu değer katkısız CL kilin aynı kür süresi ile karşılaştırıldığında yaklaşık %1227 arttığı görülmektedir.

NaOH'ın maksimum q_u değeri %10 oranı ve 56 günlük kür süresinde yaklaşık 2178 kPa (2,178 MPa) olarak elde edilmiştir. Bu değer katkısız CL kilinin maksimum q_u değeri ile kıyaslandığında yaklaşık olarak %540,5 artış göstermiştir.

KOH'ın maksimum q_u değeri %15 oranı ve 28 günlük kür süresinde yaklaşık 1173 kPa (1,173 MPa) olarak elde edilmiştir. Bu değer katkısız CL kilinin maksimum q_u değeri ile kıyaslandığında yaklaşık olarak %291 arttığı görülmüştür.

XRD analiz sonuçlarına göre biyopolimer ve kimyasal kullanarak, CL kilinde oluşan reaksiyonlar sonucunda kristal fazların yoğunluğu azalmış ve yeni maddeler ortaya çıkmıştır.

SEM / EDX analizlerinden biyopolimer ve kimyasallar kullanılması ile CL kilinin boşlukların azaldığı görülmüştür.

Küçük model deneylerinde, biyopolimer ve kimyasallar ile imal edilen derin karıştırma kolonlarının etrafında etkili alan olduğu belirlenmiştir.

Tüm katkı maddeleri ile imal edilen kolonların çevresinde yumuşak CL kilinin Cu, pH ve EC değeri artarken w değerinin azaldığı görülmüştür.

Büyük model deneylerinde, %20 NaOH ile imal edilen tekli, üçlü ve yedili grup kolonlarının sırasıyla 0,18 kN, 0,59 kN ve 1,26 kN basınç taşıdığı belirlenmiştir.

Büyük model deney sonuçlarına göre, yedili kolonlarda yükleme sırasında boşluk suyu basıncının arttığı görülmüştür.

Yapılan Doktora tezi kapsamında derin karıştırma yöntemiyle biyopolimer ve kimyasallar ile oluşturulacak kolonların imalatında sıcaklık, nem, karıştırma süresi ve hız gibi faktörlerin etkili olacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Benzer bir çalışma arazide uygun şartlar sağlanması halinde yapılması tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

- Alshaaer, M., 2000. Stabilization of kaolinitic soil from Jordan for construction purposes. M.sc Thesis, Vrije Universiteit Brussels, Belgium.
- Anonymous, 2018. <http://www.cdm-gr.com>.
- Ahnberg, H., 2006. Strength of stabilized soils-a laboratory study on clays and organic soils stabilized with different types of binder. Docotral Thesis, Lund University, Sweden.
- Arasan, S., Bagherinia, M., Akbulut, R.K., Zaimoglu, A.S., 2017. Utilization of polymers to improve soft clayey soils using the deep mixing method. *Environmental and Engineering Geoscience*, 23(1), pp. 1-12, DOI: 10.2113/gseegeosci.23.1.1.
- ASTM, (American Society for Testing and Materials). 2017. Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils. ASTM D4318, West Conshohocken, PA.
- ASTM, (American Society for Testing and Materials). 2000. Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible-wall permeameter. ASTM D5084, West Conshohocken, PA.
- ASTM, (American Society for Testing and Materials). 2012. Standard test method for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort.” ASTM D1557, West Conshohocken, PA.
- ASTM, (American Society for Testing and Materials). 2016. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. ASTM D2166 / D2166M.
- ASTM, (American Society for Testing and Materials). 2013. Standard test method for pH of soils. ASTM D4972.
- ASTM, (American Society for Testing and Materials). 2010. Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass. ASTM D2216.
- Bagherinia, M., 2013. Utilization of unsaturated polyester in improvement of clays with deep mixing method. M.sc Thesis, Ataturk University, Erzurum, Turkey (in Turkish with an English summary).
- Barikosky, M., Precis Ste, 1999. Dressing product with a calcium alginate matrix and method of production of the same. U.S. Patent 5,981,821.
- Baysal, B., 1981. Polimer Kimyası, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Baysal, B., 1981. Polimer Kimyası, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Baysal, G., 2010. İyonik sıvılarla modifiye edilmiş montmorillonitle polimer nanokompozitlerin hazırlanması. Doktora tezi. Dicle üniversitesi, Diyarbakır.
- Bell, F.G., Walker, D.J., 2000. A further examination of the nature of dispersive soils in Natal. South Africa, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, V.33, p.187-1999.
- BeMiller, J.N., 2008. Gums and related polysaccharides. In: Fraser-Reid, B.O., Tatsuta, K., Theim, J. (Eds.), *Glycoscience*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 1513e1533.
- Bergado, D.T., Lorenzo, G.A., 2005. Economical mixing method for cement deep mixing. GSP 136 Innovations in Grouting and Soil Improvement.
- Boyle, J.L., 1959. The stabilization of ice-cream and ice lollies. *Food Technol.*, Australia, 11, 543.

- Bruce, D., Bruce, M., 2003. The Practitioner's guide to deep mixing. Grouting and Ground Treatment, 474-488.
- Bruce, D.A., Bruce, M.E.C., Dimileo, A., 1998. Deep mixing method: A global perspective. ASCE Geotechnical Special Publication, No,81, 1-15.
- Cottrell, I.W. and Kovacs, P., 1980. Alginates in handbook of water-soluble gums and resins, Ch. 2(ed. R. L. Davidson), McGraw-Hill, New York, pp. 1-43.
- Craig, R.F., Soil Mechanics, 7th edition, Spon Press, London, 2004
- Cristelo, N., Glendinning, S., Teixeira Pinto, A., 2011. Deep soft soil improvement by alkaline activation. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 164(2), pp.73-82.
- Cristelo, N., Glendinning, S., Fernandes, L. and Pinto, A.T., 2013. Effects of alkaline-activated fly ash and Portland cement on soft soil stabilisation. Acta Geotechnica, 8(4), pp.395-405.
- Çankaya N., 2011. Selüloz üzerinde aşılama çalışmaları. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Çetin, M., 2003. Değişik Çevresel Koşullar Altında, Şişen Zeminlerin Özelliklerinin Belirlenmesi, Yüksek lisans tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- EN 14679, 2005. Execution of special geotechnical works – deep mixing. CEN, English version, April of 2005, p. 52.
- Erat, S., 2007. kimyasal depolama yöntemiyle elde edilen cdse ince filmlerinin optik özellikleri ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Mersin, 104s.
- Etemadi, O., Petrisor, I. G., Kim, D., Wan, M.W., Yen, T.F.J.S., Contamination, S., 2003. Stabilization of metals in subsurface by biopolymers: laboratory drainage flow studies. 12(5), 647-661.
- Federal Highway Administration, (FHWA), 2000. Highway statistics, 1999. US Department of Transportation, Washington, DC. Available at: <http://www.fhwa.dot.gov/ohim/1999/index.html>. Accessed: 14 August 2001.
- Fenton, J.C., Keys, A.F. and Mahoney, P.M.J., ER Squibb and Sons LLC, 1998. Alginate fabric, its use in wound dressings and surgical haemostats and a process for its manufacture. U.S. Patent 5,714,232. 19.
- Galan-Marín, C., Rivera-Gomez, C., Petric, J., 2010. Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre. Construction and Building Materials 24, 1462e1468. [http:// dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.008](http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.008).
- Gomes, M., Azevedo, H., Malafaya, P., Silva, S., Oliveira, J., Silva, G., Joao Mano, R.S., Reis, R., 2012. Natural polymers in tissue engineering applications. In: Ebnesajjad, S. (Ed.), Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics- Properties, Processing and Applications. William Andrew Publishing, Boston, pp. 385e425.
- Hardmen, R.C., 1993. Biopolymers: Making Materials Nature's Way. In US Congress, Office of technology.
- Hari, P.R., Chandy, T. and Sharma, C.P., 1996. Chitosan/calcium–alginate beads for oral delivery of insulin. Journal of Applied Polymer Science, 59(11), pp.1795-1801.
- Holm, G., 2002. Nordic dry deep mixing method execution procedure. Paper presented at the Proceedings of Deep Mixing Workshop.

- Holtz, R.D., Kovacs, W.D., 1981. An introduction to geotechnical engineering. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 733 p.
- Ji, S., Wan, L., Fan, Z., 2001. The toxic compounds and leaching characteristics of spent foundry sands. *Water, Air, and Soil Pollution*, 132(3-4), 347-364.
- John J. M., Thomas S., 2012. Natural polymers. *RSC Green Chemistry*, 17, RSC Publishing.
- Kazemian, S., Huat, B. B., Arun, P., Barghchi, M., 2010. A review of stabilization of soft soils by injection of chemical grouting. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(12), 5862-5868.
- Kershaw, D. and Mahoney, P.M.J., 1999. Bristol-Myers Squibb Co, Alginate wound dressings. U.S. Patent 5,986,164.
- Kirsch, K. and Bell, A. 2012. Ground improvement: CRC Press.
- Knill, C.J., Kennedy, J.F., Mistry, J., Miraftab, M., Smart, G., Grocock, M.R., Williams, H.J., 2004. Alginate fibres modified with unhydrolysed and hydrolysed chitosans for wound dressings. *Carbohydrate Polymers*, 55(1), pp.65-76.17.
- Konta, J.I., 1995. Clay and man: clay raw materials in the service of man. *Applied Clay Science*, 10(4), pp.275-335.
- Kosche, M., 2004. A laboratory model study on the transition zone and the boundary layer around lime-cement columns in kaolin clay. Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm.
- Kuo, C.K. and Ma, P.X., 2001. Ionically crosslinked alginate hydrogels as scaffolds for tissue engineering: Part 1. Structure, gelation rate and mechanical properties. *Biomaterials*, 22(6), pp.511-521.
- Larsson, S., 1999. Shear box apparatus for modelling chemical stabilised soil – Introductory tests Proceedings of the International Dry Jet Mixing Conference in Stockholm, Sweden, 13-15 october 1999, pp. 115-121. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Larsson, S., Rothhämel, M., and Jacks, G., 2009. A laboratory study on strength loss in kaolin surrounding lime–cement columns. *Applied Clay Science*, 44(1-2), pp.116-126.
- Leon-Martínez, F.M., Cano-Barrita, P.F.J., Lagunez-Rivera, L., Medina-Torres, L., 2014. Study of nopal mucilage and marine brown algae extract as viscosity-enhancing admixtures for cement based materials. *Construction and Building Materials* 53, 190e202. [http:// dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.068](http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.068).
- Lewsley, G., 2008. On the strength of saturated cement-treated soil reconstituted by wet-mixing (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
- Li, Z., Ramay, H.R., Hauch, K.D., Xiao, D., Zhang, M., 2005. Chitosan–alginate hybrid scaffolds for bone tissue engineering. *Biomaterials*, 26(18), pp.3919-3928.
- Lin, D.F., Lin, K.L. and Luo, H.L., 2007. A comparison between sludge ash and fly ash on the improvement in soft soil. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 57(1), pp.59-64.
- Lloyd, L.L., Kennedy, J.F., Methacanon, P., Paterson, M. and Knill, C.J., 1998. Carbohydrate polymers as wound management aids. *Carbohydrate Polymers*, 37(3), pp.315-322.
- Lorenzo, G.A., Bergado, D.T., 2006. Fundamental Characteristics of Cement-Admixed CLay in Deep Mixing. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18, 2, 161-174.

- Madhyannapu, R.S., Puppala, A.J., Nazarian, S., Yuan, D., 2010. Quality Assessment and Quality Control of Deep Soil Mixing Construction for Stabilizing Expansive Subsoils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*.
- Miao, S., Shen, Z., Wang, X., Luo, F., Huang, X. and Wei, C., 2017. Stabilization of Highly Expansive Black Cotton Soils by Means of Geopolymerization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(10), p.04017170.
- Mitchell, J.K., 1993. *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley and Sons Inc., 422 pages.
- Miura, N., Shen, S.L., Koga, K., Nakamura, R., 1998. Strength change of clay in the vicinity of soil-cement column. *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 1998(596), pp.209-221.
- Moseley, M.P. and Kirsch, K., 2004. *Ground improvement*. British Library Cataloguing in Publication British Library, ISBN 0-203-50254-X Master e-book ISBN, 431.
- Muntohar, A.S., 2010. A laboratory test on the strength and load-settlement characteristic of improved soft soil using lime-column.
- Murray, H.H., 2006. Structure and composition of the clay minerals and their physical and chemical properties. *Developments in clay science*, vol. 2, p. 7-31.
- Nazir, R.B., Amiri, S.T., Kssim, K.A., 2013. The Effect of soda ash (Na_2CO_3) on pH and compaction characteristics of malaysian laterite soil. *EJGE*, Vol. 18 [2013], Bund. N, 2963-2968.
- Nishide, E., Mishima, A., Anzai, H. 1992. Properties of alginic acid from sulfated polysaccharides extracted from residual algae by the hot water method. *Bull. Colleg Agric. Vet. Met., Nihon university*, No. 49, 140-142.
- Nussinovitch, A., 1993. Gum-Based Texturized Products, In *Yearbook Of Science And Techonology*, McGraw-Hill, New York, pp.138-140.
- Olaniyan, O.S., Olaoye, R.A., Okeyinka, O.M., Olaniyan, D.B., 2011. Soil stabilization techniques using sodium hydroxide additives. *International Journal of Civil and Environmental Engineering IJCEE-IJENS*, 11(6), 9-22.
- Olaniyan, O. S., 2008. Stabilization of kaolinitc soil from Nigeria for construction purposes. Unpublished Soil Stabilization Practical Exercise, Vrije Universiteit Brussels.
- Oluyemi-Ayibiowu, B.D. and Ola, S.A., 2015. Stabilization of Black Cotton soils from North-estern Nigeria with Sodium Silicate. *International Journal of Scientific Research and Innovation Technology*, 2(6), 189-203.
- Önalp, A., 1983. İnşaat Mühendisleri Geoteknik Bilgisi. cilt 1,2 KTÜ yayını, Trabzon.
- Özaydın, K., 2000. *Zemin Mekaniği*. Birsen Yayınevi Ltd. Şti., İstanbul, 261s.
- Pakbaz, M.S., Alipour, R., 2012. Influence of cement addition on the geotechnical properties of an Iranian clay. Department of Civil Engineering, Shahid Chamran Univ., Ahvaz, Iran. *Geotechnical Engineering*, Sazabpardazan Consulting Engineers Co., Ahvaz, Iran.
- Pye, N., O'Brien, A., Essler, R., Adams, D., 2012. Laboratory and field trials for deep dry soil mixing to stabilize a live railway embankment across thrandeston bog", Associate Geotechnical Engineer, Mott MacDonald Limited, 8 – 10 Sydenham Road, Croydon, CR0 2EE, United Kingdom.
- Rayment, G.E. and Higginson, F.R., 1992. *Australian laboratory handbook of soil and water chemical methods*. Inkata Press Pty Ltd, Melbourne, Australia.
- Saçak, M., 2002. *Polimer Kimyası*, Ankara Üniversitesi, Ankara.

- Sargent, P., Hughes, P.N., Rouainia, M., White, M.L., 2013. The use of alkali activated waste binders in enhancing the mechanical properties and durability of soft alluvial soils. *Engineering geology*, 152(1), pp.96-108.
- Shen, S.L., 1998. Behavior of Deep Mixing Columns in Composite Clay Ground, Ph.D. Dissertation, Saga University, Japan.
- Shen, S.L., Huang, X.C., Du, S.J., Han, J. 2003a. Laboratory studies on property changes in surrounding clays due to installation of deep mixing columns. *Marine Georesources and Geotechnology*, 21(1), 15-35.
- Shen, S.L., Miura, N., Han, J., Koga, H., 2003b. Evaluation of property changes in surrounding clays due to installation of deep mixing columns. In *Grouting and ground treatment* (pp. 634-645).
- Shen, S.L., Miura, N., Koga, H., 2003c. Interaction mechanism between deep mixing column and surrounding clay during installation. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(2), pp.293-307.
- Shen, S.L., Jiang, Y.Q., Cai, F.X., Xu, Y.S., 2005. Mechanisms of property changes of soft clays around deep mixing column. *岩石力学与工程学报*, 24(23).
- Shen, S.L., Han, J., Du, Y.J. 2008. Deep mixing induced property changes in surrounding sensitive marine clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(6), pp.845-854.
- Siva, P.P., 2005. Effects of water-cement ratio on deep mixing treated expansive clay characteristics. Master of science in civil engineering, The university of texas at arlington.
- Stab (Euro Soil), 2002. Development of design and construction methods to stabilize soft organic soils: Design guide for soft soil stabilization. CT97-0351, European Commission, Industrial and Materials Technologies Programme (Rite-EuRam III) Bryssel.
- Sukontasukkul, P. and Jamsawang, P., 2012. Use of steel and polypropylene fibers to improve flexural performance of deep soil–cement column. Department of Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology-North Bangkok, 1518 Pibulsongkarm Road, Bangsue, Bangkok 10800, Thailand.
- Şengör, M.Y., 2011. The deformation characteristics of deep mixed columns in soft CLayey soils: a model study. Doctoral Thesis, METU, Turkey.
- Şengül T., 2003. Ağır metal ve tuzlarla kirlenmiş killi zeminlerin geoteknik özelliklerinin belirlenmesi, Yüksek lisans tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 85s.
- Tang, B.L., Bakar, I., Chan, C.M., 2011. Reutilization of Organic and Peat Soils by Deep Cement Mixing. *World Academy of Science, Engineering & Technology*, Vol. 74, 680.
- Tonoz, M., Gokceoglu, C. and Ulusay, R., 2003. A laboratory-scale experimental investigation on the performance of lime columns in expansive Ankara (Turkey) Clay. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62(2), pp.91-106.
- Tumluer, G., 2006. Çimento katkılı kumlu zeminlerin mukavemeti. Y.Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi.
- Tunç, A., 2001. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları. Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul, 840s.
- TSytovich, Aleksandrovich, N., 1975. The mechanics of frozen ground. Scripta Book Co. pp. 78–79. ISBN 978-0-07-065410-5.

- Vural, P., 2012. Şişme ve dispersif karakteristikteki kil zeminlerin mühendislik özelliklerine çimento ve zeolitin (doğal puzolan) etkisi, Yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 139s.
- Wardani, S.P.R. and Muntohar, A.S., 2011. May. Laboratory Model Test On Improved Soil Using Lime-Column. In Proceedings of the 3rd International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation 2011: Combined With, the 5th International Conference on Geotechnical and Highway Engineering: Practical Applications, Challenges and Opportunities (p. 271). World Scientific.
- Wu, D.Q., Xu, W.Y., Zhu, D.P. 2013. The chemical-physical combined method for improving clay slurry in land reclamation. In IACGE 2013: Challenges and Recent Advances in Geotechnical and Seismic Research and Practices (pp. 308-315).
- Yadu, L. and Tripathi, R.K., 2013. Effects of granulated blast furnace slag in the engineering behaviour of stabilized soft soil. *Procedia Engineering*, 51, pp.125-131.
- Yalçın, M., 1997. Çevresel kirlilik şartlarının bentonit kilinin şişme/büzülme özelliklerine etkisi, Yüksek lisans tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 97 s.
- Yi, Y., Liska, M., Al-Tabbaa, A., 2013. Properties of two model soils stabilized with different blends and contents of GGBS, MgO, lime, and PC. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(2), pp.267-274.
- Yuk, S.H., Cho, S.H., Lee, H.B., 1995. pH-sensitive drug delivery system using OW emulsion. *Journal of controlled release*, 37(1-2), pp.69-74.
- Zhang, Z.G. and Xu, Z.S., 1996. Application of DJM method to soft soil improvement. In Proc. of the Second International Conference on Soft Soil Engineering (Vol. 985). Nanjing: Hohai University Press.
- Zhu, Y., 2016. Mechanisms of property changes of soft clays around deep mixing column. *International Forum on Energy, Environment and Sustainable Development (IFEESD)*. Volume. 75 pp. 436-442. Shenzhen, PEOPLES R CHINA.

ÖZGEÇMİŞ

MAJID BAGHERINIA, 1984 yılında Doğu Azerbaycan eyaletinin Tebriz şehrinde doğdu. İlkokul, ortaokul ve liseyi Tebrizde tamamladı. Lisans eğitimini 2008 yılında Reşt Üniversitesinden bitirerek, 2008-2011 yılları arasında iş hayatını sürdürmüştür. 2011 yılında Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Gotechnik bölümünü kazanarak Yüksek Lisans eğitimine başlamış ve 2013’de mezun olmuştur. Ana dili hariç (Azerbaycan Türkçesi), Türkçe, İngilizce ve Farsçayı iyi derecede bilmektedir. İnşaat ve Geoteknik mühendisliğinde yaygın olan bazı bilgisayar programlarını kullanabilmektedir.