

**KUM ZEMİNLERİN SERBEST BASINÇ  
MUKAVEMETİ VE DONMA-ÇÖZÜLME  
ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE  
POLİMERLERİN KULLANILABİLİRLİĞİ**

**Omid NASİRPUR**

**Yüksek Lisans Tezi  
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı  
Yrd. Doç. Dr. Seracettin ARASAN**

**2014**

**Her Hakkı Saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KUM ZEMİNLERİN SERBEST BASINÇ MUKAVEMETİ  
VE DONMA-ÇÖZÜLME ÖZELLİKLERİNİN  
İYİLEŞTİRİLMESİNDE  
POLİMERLERİN KULLANILABİLİRLİĞİ**

**Omid NASİRPUR**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**ERZURUM  
2014**

**Her hakkı saklıdır**



T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

KUM ZEMİNLERİN SERBEST BASINÇ MUKAVEMETİ VE DONMA-ÇÖZÜLME  
ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE POLİMERLERİN  
KULLANILABİLİRLİĞİ

Yrd. Doç. Dr. Seracettin ARASAN danışmanlığında, Omid NASİRPUR tarafından hazırlanan bu çalışma 21/01/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak ~~oybirliği/oy çokluğu (.../...)~~ ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Suat AKBULUT

İmza :

Üye : Prof. Dr. Sabri ÇOLAK

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Seracettin ARASAN

İmza :

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU  
Enstitü Müdürü

**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

Yüksek Lisans Tezi

### **KUM ZEMİNLERİN SERBEST BASINÇ MUKAVEMETİ VE DONMA- ÇÖZÜLME ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE POLİMERLERİN KULLANILABİLİRLİĞİ**

Omid NASİRPUR

Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Seracettin ARASAN

Derin karıştırma, kireç veya portland çimentosunun arazide özel ekipmanlarla (ortası delik burgular veya kanatlı karıştırıcılar) zeminle karıştırılıp kolonlar oluşturulması şeklinde uygulanan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Bu çalışma kapsamında, kum zeminlerin derin karıştırma yöntemi ile iyileştirmesinde polimerlerin kullanılabilirliği araştırmak amacıyla laboratuvarda polimerler ile güçlendirilmiş suya doymuş kum üzerinde serbest basınç mukavemeti ve donma-çözülme deneyleri yapılmıştır. Polimer olarak, Stiren Akrilik Kopolimer (SACP) ve Polivinil Asetat (PVA) farklı oranlarda karıştırılarak hazırlanan polimer karışımları suya doymuş kumun toplam ağırlığının %5, %10 ve %20'si miktarlarında kullanılmıştır. Ayrıca, farklı yüzdelerde biyopolimer (zantam gum) ve uçucu kül deneylerde kullanılmıştır. Yapılan laboratuvar deney sonuçlarından polimer yüzdesinin ve kür süresinin artmasıyla serbest basınç mukavemetinin arttığı belirlenmiştir. Bunun yanında, donma-çözülme çevrim sayısının artması ile serbest basınç mukavemetlerinde önemli değişiklikler olmamıştır.

**2014, 83 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** kum, derin karıştırma, polimer, serbest basınç mukavemeti, donma-çözülme.

## **ABSTRACT**

MS Thesis

### **UTILIZATION OF POLYMERS IN IMPROVEMENT OF UNCONFINED COMPRESSION STRENGTH AND FREEZING-THAWING PROPERTIES OF SAND SOILS**

Omid NASIRPUR

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

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Seracettin ARASAN

The Deep Mixing is a ground modification wherein, mixing lime or portland cement with the soil by using special equipment (hollow augers in the middle or blade mixers) and construction columns in situ. In this study, utilization of polymers in improvement of sands with deep mixing method was investigated. For this purpose, unconfined compression strength test and freezing-thawing tests were performed on sand modified with polymers at laboratory. Styrene Acrylic Copolymer (SACP) and Polyvinil Acetate (PVA) were used at percentage of 5%, 10% ve 20% of total saturated sand mass. Additionally, the different percentages of biopolymer (Xantam gum) and fly ash were used. The laboratory test results concluded that the unconfined compressive strength increased with the increase of polymer ratio and curing time. Whereas, the changes on unconfined compression strength with increasement of freeze-thaw cycles were insignificant.

**2014, 83 pages**

**Keywords:** Sand, deep mixing, polymer, freezing-thawing, unconfined compression strength.

## TEŞEKKÜR

Çalışmam süresince her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Seracettin ARASAN'a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Polimerler konusunda bilgisine başvurduğum Sayın Prof. Dr. Sabri ÇOLAK'a ve Sayın Prof. Dr. Suat AKBULUT 'a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma kapsamındaki deneyler, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarı ile Erzurum Meslek Yüksekokulu İnşaat Programı Laboratuvarı'nda yürütülmüştür. Bu kapsamda, Erzurum Meslek Yüksekokulu İnşaat Program Başkanlığı'na ve yüksek lisans çalışmalarım süresince emeği geçen Sayın Doç. Dr. Şahin ZAIMOĞLU'na ve Sayın Arş. Gör. R. Kağan AKBULUT'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, çalışmada kullanılan polimerlerin temininde yardımcı olan KEMPRO firması ve çalışanlarına sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

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

Omid NASİRPUR

Ocak 2014

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	ix
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1. Amaç ve Kapsam.....	3
1.2. Kaynak Özetleri.....	3
<b>2. KURAMSAL TEMELLER.....</b>	<b>9</b>
2.1. Derin Karıştırma Yöntemi.....	9
2.1.1. Derin Karıştırma Yönteminin Tarihi Gelişimi .....	13
2.1.2. Derin Karıştırma Uygulamaları ve Avantajları .....	14
2.1.3. Derin Karıştırma Yönteminin Sınıflandırması.....	15
2.1.4. Derin Karıştırmada Uygulanan Islak ve Kuru Yöntem.....	16
2.2. Derin Karıştırma Yönteminde Kullanılan Bağlayıcılar.....	18
2.3. Donma-Çözülme Davranışı.....	20
2.4. Polimerler ve Yapıştırıcılar .....	21
2.4.1. Termoplastikler .....	23
2.4.2. Termosetler.....	23
2.5. Biyopolimerler.....	24
2.5.1. Zantam Gum .....	25
2.6. Uçucu Küller .....	26
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>	<b>32</b>
3.1. Materyal.....	32
3.1.1. Kum .....	32
3.1.2. Polimerler .....	33
3.1.3. Biyopolimerler.....	34
3.1.4. Uçucu Kül.....	35

3.2. Yöntem .....	35
3.2.1. Polimer Karışım Oranlarının Belirlenmesi.....	35
3.2.2. Derin Karıştırma Uygulanmış Suyu Doygun Kum Numunelerin Hazırlanması .....	37
3.2.3. Biyopolimer-Polimer-Uçucu Kül Karışım Oranlarının Belirlenmesi .....	39
3.2.4. Serbest Basınç Mukavemeti Deneyleri .....	42
3.2.5. Donma-Çözülme Deneyleri.....	43
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI .....</b>	<b>45</b>
4.1. Polimer-Uçucu Kül Karışımlarının Suyu Doygun Kumun Serbest Basınç Mukavemetine Etkisi.....	45
4.2. Numunelerinin Serbest Basınç Mukavemetlerine Kür Süresinin Etkisi .....	50
4.3 Numunelerinin Donma-Çözülme Davranışı.....	51
<b>5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....</b>	<b>58</b>
KAYNAKLAR .....	61
EKLER .....	66
EK 1 .....	66
EK 2 .....	75
ÖZGEÇMİŞ .....	84



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

c	Kohezyon
CDM	Derin Islak Karıştırma
CMC	Kontrol Modüllü Kolonlar (Controlled Modulus Columns)
DCM	Derin Çimento Karışımı
DJE	Kuru Jet Karıştırma (burgunun boyunda)
DJM	Kuru Jet Karıştırma
DJS	Kuru Jet Karıştırma (burgunun ucunda)
DRS	Kuru Rotary Karıştırma (burgunun ucunda)
FHWA	Federal Karayolları İdaresi
POL 1	Polimer 1
POL 2	Polimer 2
POL 3	Polimer 3
PVA	Polivinil Asetat
PVAc	Polivinil Asetat
$q_u$	Serbest Basınç Mukavemeti
SACP	Stiren Akrilik Kopolimer
TEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
UCS	Serbest Basınç Mukavemeti
UK	Uçucu Kül
W/C	Su/Çimento Oranı
WJS	Islak Jet Karıştırma (burgunun ucunda)

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Zemin iyileştirmesinde farklı yöntemler.....	9
Şekil 2.2. Derin karıştırma yönteminin kullandığı zemin iyileştirme alanları .....	10
Şekil 2.3. Derin karıştırma yönteminin uygulama alanlarının yüzdesel dağılımı.....	10
Şekil 2.4. Derin karıştırma yönteminin tipik şeması .....	11
Şekil 2.5. Derin karıştırma yönteminin uygulanması .....	11
Şekil 2.6. Derin karıştırma uygulama şekilleri .....	12
Şekil 2.7. Derin karıştırma kolonlarının farklı uygulamalarda ki çapları .....	13
Şekil 2.8. Derin karıştırmada önerilen farklı yöntemler .....	15
Şekil 2.9. Derin ıslak ve kuru karıştırma yöntemlerin şeması .....	16
Şekil 2.10. Derin ıslak karıştırmaya örnekler .....	17
Şekil 2.11. Derin kuru karıştırma.....	18
Şekil 2.12. Kireç içeriğinin çeşitli zeminlerdeki etkisi .....	19
Şekil 2.13. Aynı kireç içeriğindeki farklı zemin cinslerinin zamana bağlı mukavemet artışı.....	20
Şekil 2.14. Monomer molekülleri polimerizasyon reaksiyonu ile birbirine bağlanarak büyük polimer moleküllerini oluştururlar .....	21
Şekil 2.15. Zantham gum formülü .....	26
Şekil 2.16. Çeşitli renkteki uçucu küller.....	27
Şekil 3.1. Deneysel kullanımların kuma ait dane dağılım eğrisi .....	32
Şekil 3.2. Deneysel kullanımların SACP ve PVA .....	33
Şekil 3.3. Deneysel kullanımların biyopolimer (Zantam gum).....	34
Şekil 3.4. Deneysel kullanımların %100 SACP (POL 1).....	36
Şekil 3.5. Deneysel kullanımların %75 SACP + %25 PVA (POL 2).....	36
Şekil 3.6. Deneysel kullanımların %50 SACP + %50 PVA (POL 3).....	36
Şekil 3.7. Şematik suya doymuş kum-biyopolimer-polimer-uçucu kül karışımının şematik görünüşü .....	37
Şekil 3.8. Deneysel kullanımların mikser .....	38
Şekil 3.9. Laboratuvar ortamında hazırlanan numuneler .....	39
Şekil 3.10. Kür odasında bekletilen numuneler .....	39

<b>Şekil 3.11.</b> Serbest basınç mukavemeti deneylerinde kullanılan SoilTest cihazı .....	42
<b>Şekil 3.12.</b> Donma-çözülme cihazında bekleyilen aümininyom folyo içerisindeki numuneler.....	43
<b>Şekil 3.13.</b> Donma-çözülme cihazı .....	44
<b>Şekil 4.1.</b> POL1 yüzdesinin serbest basınç mukavemetine etkisi .....	46
<b>Şekil 4.2.</b> POL 2 yüzdesinin serbest basınç mukavemetine etkisi .....	47
<b>Şekil 4.3.</b> Uçucu kül yüzdesinin serbest basınç mukavemetine etkisi (POL 1) .....	48
<b>Şekil 4.4.</b> Uçucu kül yüzdesinin serbest basınç mukavemetine etkisi (POL 2) .....	48
<b>Şekil 4.5.</b> POL 1 numunelerinin kırılması ait iki örnek .....	49
<b>Şekil 4.6.</b> POL 2 numunelerinin kırılması ait iki örnek .....	49
<b>Şekil 4.7.</b> POL 1 kür süresinin serbest basınç mukavemetine etkisi .....	50
<b>Şekil 4.8.</b> POL 2 için kür süresinin serbest basınç mukavemeti etkisi .....	51
<b>Şekil 4.9.</b> 7 günlük POL 1 numunelerinin serbest basınç mukavemetine donma-çözülmenin etkisi .....	53
<b>Şekil 4.10.</b> 7 günlük POL 2 numunelerinin serbest basınç mukavemetine donma-çözülmenin etkisi .....	53
<b>Şekil 4.11.</b> 14 günlük POL 1 numunelerinin serbest basınç mukavemetine donma-çözülmenin etkisi .....	54
<b>Şekil 4.12.</b> 14 günlük POL 2 numunelerinin serbest basınç mukavemetine donma-çözülmenin etkisi .....	55
<b>Şekil 4.13.</b> 28 günlük POL 1 numunelerinin serbest basınç mukavemetine donma-çözülmenin etkisi .....	56
<b>Şekil 4.14.</b> 28 günlük POL 2 numunelerinin serbest basınç mukavemetine donma-çözülmenin etkisi .....	57

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 1.1.</b> Derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmiş zeminin mühendislik özellikleri .....	4
<b>Çizelge 2.1.</b> Türkiye’deki bazı uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları .....	29
<b>Çizelge 2.2.</b> Uçucu Kül İçindeki Elementler .....	30
<b>Çizelge 3.1.</b> Deneylerde kullanılan kumun özellikleri.....	33
<b>Çizelge 3.2.</b> SACP ve PVA ait özellikler .....	34
<b>Çizelge 3.3.</b> Ön deneylerde kullanılan SACP ve PVA oranları.....	35
<b>Çizelge 3.4.</b> Değişik çalışmalarda laboratuvar derin karıştırma numunelerinin hatırlama yöntemleri.....	38
<b>Çizelge 3.5.</b> Biyopolimer-polimer-uçucu kül karışım oranlarının belirlenmesinde kullanılan numuneler .....	40
<b>Çizelge 4.1.</b> Numunelerin serbest basınç mukavemeti değerleri .....	45

## 1. GİRİŞ

Zeminlerin gerek üzerlerine inşa olunan yapıların temelleri altında taşıyıcı tabaka olarak, gerekse birçok durumlarda inşaat malzemesi olarak, bütün inşaat projelerinde karşımıza çıktığı bilinmektedir. Değişik zeminler birbirinden farklı özelliklere sahiptir ve zeminin mühendislik özellikleri de zeminin cinsi yanında arazi koşullarına bağlı olarak (sıklık derecesi, su muhtevası, konsolidasyon basıncı, yükleme ve drenaj koşulları gibi) geniş bir aralık içinde değişebilmektedir. Buna bağlı olarak, inşaat sahasında karşılaşılan zeminler her zaman istenilen özelliklere sahip olmayabilirler. İnşaat yerinin değiştirilmesi veya istenilen özelliklere sahip olmayan zeminlerin değiştirilerek yerine elverişli zeminlerin kullanılması ise, teknolojik ve ekonomik nedenlerle çoğu kere uygun çözümler olarak kabul edilmemektedir (Tumluer 2006).

Mühendis, arazideki zemin özelliklerinin getirdiği kısıtlamaları kabullenmek veya bu özellikleri “zemin iyileştirme yöntemleri” ile güçlendirmek durumundadır. Zemin iyileştirmesi denildiğinde, zeminin kayma direncinin artırılması, geçirimsizliğin azaltılması, iri daneli zeminlerde sıklığın ve ince daneli zeminlerde sertliğin artırılması anlaşılır. Uygulanabilecek yöntem zeminin dane çapı ile yakından ilgilidir. Zemin iyileştirme yöntemleri, ince daneli (kil-silt) zeminlerde uygulanabilen yöntemler ve iri daneli (kum-çakıl) zeminlerde uygulanabilen yöntemler olarak iki ana gruba ayrılabilir. Ayrıca zemin iyileştirme yöntemleri “yüzeysel iyileştirme yöntemleri” ve “derin iyileştirme yöntemleri” olarakta iki grupta toplanabilir (Ayan 2009).

Bu çalışmada zeminlerin iyileştirme yöntemlerinden biri olan derin karıştırma kullanılmıştır. Bu yöntemde kireç veya çimento bağlayıcı madde olarak arazide içi boş burgu ekipmanı ile zeminle karıştırılıp kolonların oluşturulmasıyla iyileştirme sağlanır. Bu yöntem ilk olarak 1954 yılında ABD’li Prepackt Co. tarafından uygulanmıştır. 1967 yılından sonra ise Japon’ya ve İskandinav ülkelerinde özellikle İsveç’te derin karıştırma üzerinde büyük çapta araştırmalar ve uygulamalar yapılmıştır. İsveç’te ki uygulamalarda özellikle yumuşak killerin sönmemiş kireç ile oluşturulan kireç kolonları ile iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Benzer şekilde, Japonya Ulaştırma Bakanlığı 1967

yılında yumuşak deniz zemininin daneli kireç kullanarak iyileştirilmesi üzerinde çalışmalar yapmıştır. 1970’te Okumura and Terashi (1975) tarafından kireç-deniz kili reaksiyonu üzerinde ve karıştırma ekipmanlarının geliştirilmesi için araştırmalar yapılmıştır. Son yıllarda ise ABD’de derin karıştırma metodu, özellikle altyapı, sismik problemler ve çevre iyileştirmelerinde sıklıkla kullanılmaktadır (Bruce *et al.* 1998; Bruce and Bruce 2003).

Su çimento kireç veya su çimento oranı, kür süresinin etkisi vb. derin karıştırmaya etki eden faktörler olarak birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır (Okumura and Terashi 1975; Terashi and Tanka 1981; Hartlen and Holm 1995; Ahnberg 1996; Porbaha 1998; Bahner and Naguib 2000; Jacobson 2002; Miura *et al.* 2002; Andromalos and Bahner 2003; Lorenzo and Bergado 2004; Ratherford 2004; Horpibulsuk *et al.* 2005; Pathivada 2005; Lorenzo and Bergado 2006; Lewsley 2006; Maher *et al.* 2007; Shrestha 2008; Şengör 2011; Tang *et al.* 2011; Dias *et al.* 2012). Bu araştırmalar sonucunda genellikle kür süresinin artması ve su çimento oranının azalması ile zeminin mukavemetinin arttığı ifade edilmiştir. Buna karşın, derin karıştırmada çimentoya alternatif katkıların kullanılabilirliği konusunda literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır (Ahnberg *et al.* 1996; Ahnberg 2006; Ajorloo 2010). Bu çalışmalarda, çimentonun belirli yüzdelerinde silis dumanı, uçucu kül ve cüruf katkılarının derin karıştırmada kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Polimerler sağlıktan savunma sanayisine hayatın tüm alanlarında kullanımı her geçen gün artan çağımızın malzemeleridir. Polimerlerin zemin iyileştirilmesinde kullanımı ise halen araştırılan bir konudur. Literatürde polimerler kullanılarak yapılan zemin iyileştirme çalışmaları; kimyasal enjeksiyon (Durmuşoğlu ve Çorapçioğlu 2000; Karol 2003; Yıldız 2006) ve yüzeysel stabilizasyon ile ilgili yapılmış sınırlı sayıda çalışmalardır (Ahmed 1995; Bishop *et al.* 1998; Santoni *et al.* 2003; Newman and Tingle 2004; Gupta *et al.* 2009; Naeini and Ghorbanalizadeh 2010). Tüm bunlar dikkate alındığında, derin karıştırma uygulamalarında çeşitli polimerlerin kullanılabilirliğinin araştırmaya açık bir alan olduğu anlaşılmaktadır.

## 1.1. Amaç ve Kapsam

Bu çalışmanın amaçları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- Kumların derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmesinde polimerlerin kullanılabilirliğini araştırmak.
- Polimerlerle derin karıştırma uygulanmış kumların serbest basınç mukavemetine kür süresinin etkisini araştırmak.
- Polimerlerle derin karıştırma uygulanmış kumların donma-çözülme davranışını araştırmak.

Çalışma kapsamında Altunkent-Erzincan'dan temin edilen kum ile Afşin Elbistan'dan temin edilen C sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Kum 0,3-0,6 mm çaplı elekten elenerek kullanılmıştır. Arazi şartlarında suya doygun kum zemin özelliklerini deneylerde uygulayabilmek için %30 rölatif sıklığa sahip suya doygun kum laboratuvarında hazırlanmıştır. Polimer olarak %5, %10 ve %20 oranlarında SACP ve PVA karışımı ve %1, %0,5 ve %0,25 oranlarında biyopolimer (zantam gum) ve %10, %20 ve %30 oranlarında uçucu kül (U.K) kullanılmıştır. 7, 14 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetleri belirlenen numunelerin ayrıca her üç kür süresi için 5 ve 10 donma-çözülme çevrimine tabi tutulduktan sonra da serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir.

## 1.2. Kaynak Özetleri

Literatürde derin karıştırma yöntemini konu yapan birçok çalışma mevcuttur. Özellikle arazide yapılan derin karıştırma yöntemi, bağlayıcı madde çimento-kireç-uçucu kül vb. kum, kil, silt ve organik zeminler üzerinde uygulanmıştır. Ancak literatürde kum-polimer karışımlarının derin karıştırma metodunda kullanımı konusunda sınırlı sayıda araştırma bulunmaktadır. Bu bölümde araştırma konusu ile ilgili olarak araştırmacılar tarafından yapılmış çalışmalar özetlenerek sonuçları verilmiştir.

Bruce *et al.* (1998) ve Bruce and Bruce (2003) yayınlarında, derin karıştırma yönteminin tarihi gelişimi, uygulama esasları, kullanılan ekipmanlarını ve ticari yönlerini geniş bir şekilde özetlemişlerdir. Yayında sertleştirilen maddenin özellikleri, zemin özellikleri ve koşulları, karıştırma koşulları ve kür koşulları zeminin mukavemetini artıran etkili faktörler olarak belirtilmiştir. Aynı zamanda derin karıştırma yöntemiyle iyileştirilmiş zeminin mühendislik özelliklerini Çizelge 1.1’de görüldüğü gibi vermişlerdir.

**Çizelge 1.1.** Derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmiş zeminin mühendislik özellikleri (Bruce 2003)

<b>Islak Yöntemler</b>	
<b>Serbest basınç mukavemeti (UCS)</b>	0,2 - 5 MPa (granüler zeminde 0,5 - 5 MPa ) (kohezyonlu zeminde 0,2 - 2MPa )
<b>Permabilite, k</b>	$10^{-6} - 10^{-9}$ m/s (bentonit kullanıldığında bu değer düşük olur)
<b>E<sub>50</sub></b>	Laboratuvar numuneleri için serbest basınç mukavemetinin 350 ile 1000 kat Arazi numuneleri için serbest basınç mukavemetinin 150 ile 500 kat.
<b>Kayma mukavemeti</b>	Serbest basınç mukavemetinin %40 - %50’si kadar eğer UCS < 1 MPa, ama bu değer serbest basınç deneyi artıkça artar
<b>Çekme mukavemeti</b>	Genellikle serbest basınç mukavemetinin %8 - %14’si kadar
<b>28 günlük serbest basınç mukavemeti</b>	Siltler ve killer için 7 günlük dayanımın 1,4 ile 1,5 kat ve kumlar için 7 günlük dayanımın 2 kat.
<b>60 günlük serbest basınç mukavemeti</b>	28 günlük serbest basınç mukavemetinin 1,5 kat
<b>Kuru Yöntemler</b>	
<b>Drenajsız kayma mukavemeti, C<sub>u</sub></b>	Zeminin C <sub>u</sub> ’nun 10 – 15 katı
<b>Young modulu</b>	C <sub>u</sub> 50 – 200 katı İşlenmiş zeminin q <sub>u</sub> ’nun 50 – 200 katı
<b>Göçme anındaki deformasyon</b>	< % 2
<b>Permabilite (kireç çimento) Permabilite (kireç)</b>	Takriben arazideki zeminin aynısı 100 – 1000 kadar artar



Kaniraj and Havanagi (1999) ise çimento ve uçucu külün kum zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabilirliği hakkında bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada Hindistan Delhi'deki Raghat uçucu külü ve Almanya Bochum yakınlarındaki Baumineral uçucu külü zeminlerle karıştırılmıştır. Yamuna kumu ve silt, Rajghat uçucu külü ile ve Rhine kumu Baumineral uçucu külüyle karıştırılmıştır. Zemin-uçucu kül karışımına %3-%9 oranlarında değişen çimento eklenmiştir. Silindirik numuneler optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkta hazırlanıp kür edilmiştir. Sonuçta, serbest basınç mukavemeti ve sekant modülünün çimento miktarının artmasıyla arttığı ama uçucu kül miktarının artmasıyla azaldığı bulunmuştur. Ayrıca çimento miktarının kür süresinden daha etkili olduğu ifade edilmiştir.

Çokça ve Toktaş (2002), dispersif bir zeminin C tipi uçucu kül ile stabilizasyonunu araştırmışlardır. Değişik oranlarda (%0, %3, %5, %7, %10 ve %13) C tipi uçucu kül dispersif zemin numunesine katılarak uçucu kül ilavesinin indeks, mukavemet ve konsolidasyon özelliklerine etkisine bakmışlardır. Deney sonuçları uçucu kül ilavesinin genellikle numunenin mukavemetini arttırdığını ve sıkışabilirliğini azalttığını göstermiştir. Ayrıca uçucu kül ilavesi ile zemin dispersif durumdan dispersif olmayan duruma geçmiştir. Soma uçucu külünün düşük özgül ağırlığından dolayı numunelerdeki uçucu kül miktarı arttıkça numunelerin özgül ağırlığı düşmüştür. Numunelerdeki uçucu kül miktarı arttıkça numunelerin sıkışabilirliği azalmakta ve optimum su içeriği artıp maksimum kuru birim hacim ağırlık azalmıştır. Numunenin içindeki uçucu kül miktarı %7'ye arttıkça numunenin serbest basınç dayanımı artmakta, daha fazla uçucu kül katkısı ise serbest basınç dayanımında düşüşe yol açmaktadır. Sonuç olarak uçucu külün nakliye masraflarında göz önüne aldığımızda, uçucu küllerin elde edildiği termik santrallerin yakınında görülen dispersif killerin stabilize edilmesinde kullanımının mümkün olabileceği düşünülmektedir.

Asghari *et al.* (2003), çimento ile kumlu çakıl alüvyon zeminlerin stabilizasyonu hakkında bir çalışma yapmışlardır. Farklı dane dağılımı ve sıklıktaki zeminler %1,5, %3, %4,5, %6, ve %9 çimento oranında hazırlanmış ve konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda çimentosuz numunelerde plastik, çimentolu numunelerde ise gevşek kırılma meydana geldiği bulunmuştur.

Ayrıca, çimento miktarı ve sıklık arttıkça mukavemetin de arttığı görülmüştür. Düşük portland çimentosu içeriğinde kireçle doğal olarak çimentolanmış zemin ile portland çimentosu ile çimentolandırılmış zemin arasında fazla mukavemet farkı görülmemiş fakat oran arttıkça fark da artmıştır. Çimento arttıkça daha fazla dayanım görülmüştür.

Hui (2006), yaptığı çalışmada derin karıştırma işlemlerinin santrifüj modelleme ile uygulanabilirliğini incelemiştir. Derin karıştırma modellenmesi ile ilgili ölçekleme ilişkileri elde etmiştir. Sonuçta, derin karıştırmada önemli kuvvetlerinin arasındaki ilişkileri Reynolds sayısı dışında santrifüj modelleme kullanılarak tahmin edilebildiği bulunmuştur.

Lewsley (2006) yaptığı çalışmada, kesicili derin karıştırma yöntemi (cutter soil mixing) ile iyileştirilmiş zemin numunelerine; kum-silt oranı, çimento içeriği, su muhtevası ve kür süresinin etkisini serbest basınç mukavemeti deneyleri ile araştırılmıştır. Toplam su-çimento oranının azalmasıyla, dayanımın doğrusal olmayan bir şekilde arttığı ve kum-silt oranından bağımsız olduğu sonucuna varmıştır.

Shrestha (2008), kum zemin üzerinde Portland çimentosu klinkeri ile yüksek fırın cürufunun bağlayıcı madde olarak kullanıldığı bir çalışma yapmıştır. Bağlayıcı miktarı  $200 \text{ kg/m}^3$ ,  $300 \text{ kg/m}^3$ ,  $400 \text{ kg/m}^3$ ,  $500 \text{ kg/m}^3$ ,  $600 \text{ kg/m}^3$  ve  $700 \text{ kg/m}^3$  olarak kum zemin ile laboratuvarda derin karıştırma kolonları üretilerek deneyler yapılmıştır. Kolonların dayanımı 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri için belirlenmiştir. 7 günlük kür süresi için belirlenmiş dayanımlar, bağlayıcı maddenin artmasıyla numunenin mukavemeti lineer olarak artmıştır. Serbest basınç mukavemeti deneyinden elde edilen en yüksek değer, bağlayıcının  $600 \text{ kg/m}^3$  olduğu halde elde etmiştir. Bu değer 10 MPa olduğu zaman su muhtevasının artması ile mukavemeti azalmıştır.

Ayan (2009) yaptığı çalışmada, yüzeysel zeminlerin iyileştirilmesi olarak drenaj, kompaksiyon, bitüm ile stabilizasyon, çimento ile stabilizasyon, kireç ile stabilizasyon, kireç-uçucu kül ile stabilizasyon ve derin zeminlerin iyileştirilmesinde patlatma, dinamik konsolidasyon, vibro kompaksiyon, kompaksiyon kazıkları, ön yükleme, kum

drenleri, plastik drenler, vakumla su emme, kireç kazıkları, elektro-osmoz, taş kolon, termal işlemler, enjeksiyon, jet grout ve derin karıştırma yöntemlerini incelemiştir. Bu çalışmada zeminlerin iyileştirme yöntemleri ve yeni gelişmeler ele alınarak, özellikle derin iyileştirme yöntemlerini incelemiştir. Türkiyede yaygın şekilde uygulanan derin iyileştirme yöntemlerinin uygulanmasına ait örnekler verilmiştir.

Madhyannapu *et al.* (2010) yaptıkları çalışmada derin karıştırmadan hemen sonra ve yapım süresinde kalite yönetimi programı kullanarak sonuçları ve süreç üzerinde araştırma yapmışlardır. Kalite yönetimi programı laboratuvarında, arazide ve mineralojik testlerden iyileştirme etkisini gidermek için yapım süresinde ve sonrasında oluşmaktadır. Arazi çalışmalarında sismik kuyuları ve yüzey dalga spektral analiz metodu iyileştirme derecesini elde etmek için uygulanmıştır. Arazi numuneleri üzerinde yapılan laboratuvar testleri sonucunda dayanım ve rijitlik açısından laboratuvarında hazırlanan numunelerden %20 ile %40 daha düşük sonuçlar elde edilmiştir. Sismik kuyuları ve yüzey dalga spektral analiz metodu testleri sonucunda ise yapılan derin karıştırma kolonlarının rijitliğinde önemli derecede iyileşme olduğu belirlenmiştir.

Ajorloo (2010) yaptığı çalışmada, laboratuvarında derin çimento karıştırma yöntemi kullanarak gevşek silisli kumun kayma mukavemetini iyileştirmiştir. Bağlayıcı madde olarak, Portland çimentosunu tek başına veya kireç ve silis dumanı kombinasyonları kullanılmıştır. Çimentolaşmanın etkisini araştırmak için 180 günlük numuneler üzerinde serbest basınç mukavemeti, çekme dayanımı, kesme kutusu ve drenajlı üç eksenli basınç deneyleri uygulamıştır. Sonuçta dayanımının arttığı bulunmuştur.

Sukontasukkul and Jamsawang (2011) yaptıkları çalışmada, derin çimento karıştırma yöntemi ile hazırlanan numunelerin eğilme performansını iyileştirmek amacıyla çelik ve polipropilen liflerinin etkisini araştırmışlardır. Polipropilen ve çelik lifler üç farklı hacim oranında (%0,5, %0,75 ve %1,0) kullanılmıştır. Sonuçta çelik ve polipropilen liflerin kullanımıyla eğilme performansının iyileştiği ve polipropilen lifin uygulanmasının çelik life göre daha iyi sonuç verdiği ifade edilmiştir.

Tang *et al.* (2011), çimento ile organik ve turba zeminlerin geoteknik özelliklerini iyileştirmek amacıyla derin karıştırma yöntemi uygulamışlardır. Bağlayıcı madde olarak çimento kuru halde zemin ile karıştırılmış ve su-çimento oranları, turba zemin için 3.5, 7, 14 ve 140 ve organik zemin için 5, 10 ve 30 olacak şekilde uygulanmıştır. Hazırlanan numuneler PVC kalıplara konularak kür odasında 25°C sıcaklıkta 7, 14 ve 28 gün bekletilmiş ve serbest basınç mukavemetleri bulunmuştur.

Shrestha and Al-Tabbaa (2012) yaptıkları çalışmada; çimento ile stabilize edilmiş zeminlerin mühendislik özelliklerini etkileyen faktörler üzerinde araştırma yapmışlardır. Bu faktörler uluslararası derin karıştırma yöntemi ile yapılmış projelerden seçilmiş şu faktörlerdir; ilk zeminin doğal su muhtevası, dane boyu dağılımı, organik madde içeriği, bağlayıcı dozu, yaş ve kür sıcaklığı. Ayrıca, yapay sinir ağları kullanılarak tahminler yapılmıştır.

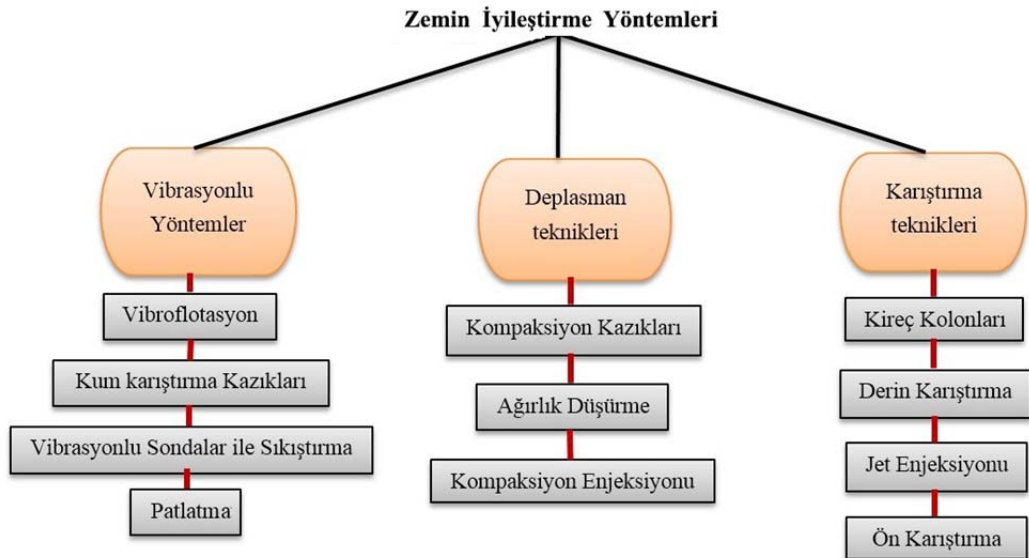
Sargent *et al.* (2012) yaptıkları çalışmada; alkali aktif edilmiş atıkların derin karıştırma yöntemi ile sürdürülebilir bağlayıcı olarak yumuşak zeminlerin geoteknik özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada geoteknik ve mineralojik testlerden bağlayıcı maddenin performansını siltli kum zeminde incelenmiştir. İyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş zeminlerin dayanımı ve durabilitesi karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada alkali aktif edilmiş yüksek fırın cürufunun, zeminin dayanımı ve durabilitesinin iyileştirmesinde yüksek performans gösterdiğini ispatlanmıştır.

Dias *et al.* (2012) yaptıkları çalışmada, laboratuvarında yumuşak zemin ile yüksek fırın cüruf çimentosunu plastik kıvamda karıştırmış ve serbest basınç mukavemeti deneyine tabi tutmuşlardır. Çalışmanın amacı kuru karıştırma yönteminde, çimentonun hangi oranda daha yüksek dayanım sağladığının belirlenmesidir. Çimento oranı zeminin her metre küpünde 100 ve 200 kg olduğunda, kuru kütlede ise %4 ve %8 olarak kullanılmıştır. Serbest basınç mukavemet deneyleri 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri için uygulanmış ve çimento oranı ile kür süresinin artmasıyla serbest basınç mukavemetinin arttığı bulunmuştur.

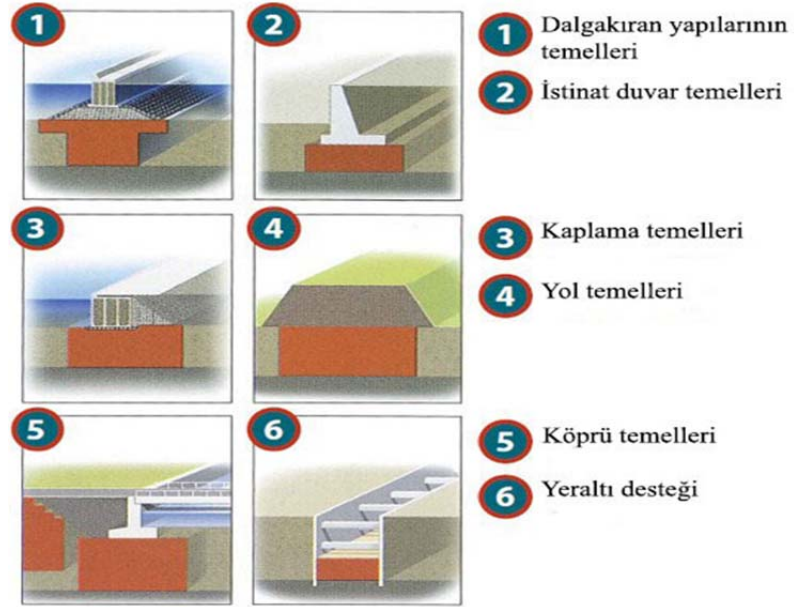
## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Derin Karıştırma Yöntemi

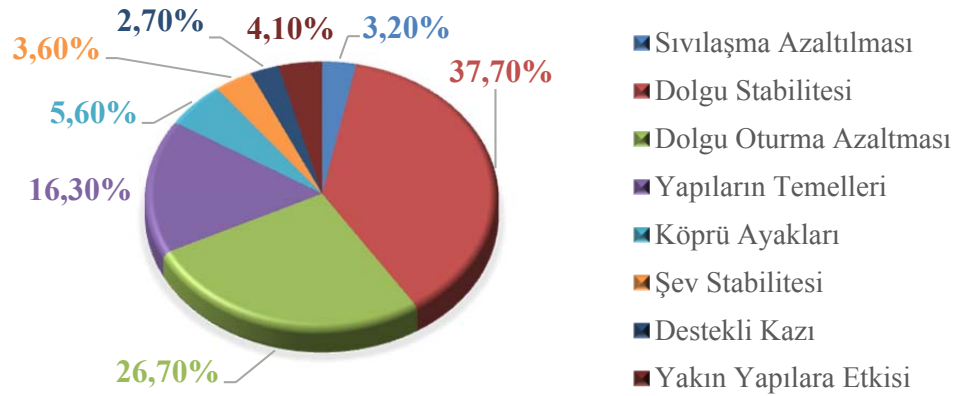
Derin karıştırma yöntemi, zemin iyileştirme yöntemlerinden birisidir (Şekil 2.1). Bu yöntem, sıvılaştırmanın azaltılması, dolgu stabilitesi, yapı temelleri, şev stabilitesi ve destekli kazı gibi geoteknik mühendisliğin birçok alanında kullanılmaktadır. Yöntemin en genel kullanım alanları Şekil 2.2’de şematik olarak Şekil 2.3’de ise yüzdesel olarak verilmektedir. Bu yöntemde, üzerinde enjeksiyon nozulları bulunan özel şekilde imal edilmiş ekipman kullanılmaktadır. Yukarıdan aşağıya doğru delgi ve kesme işlemi esnasında enjeksiyon zemine verilir, yukarı çekme esnasında da enjeksiyon vermeye devam edilebileceği gibi sadece karıştırma da yapılabilir. Bu yöntemde mekanik karıştırma, kesici bıçaklar ile yapılmaktadır ve bu nedenle kesintisiz enjeksiyon akışı temin edilmesi yeterlidir (Şekil 2.4 ve Şekil 2.5).



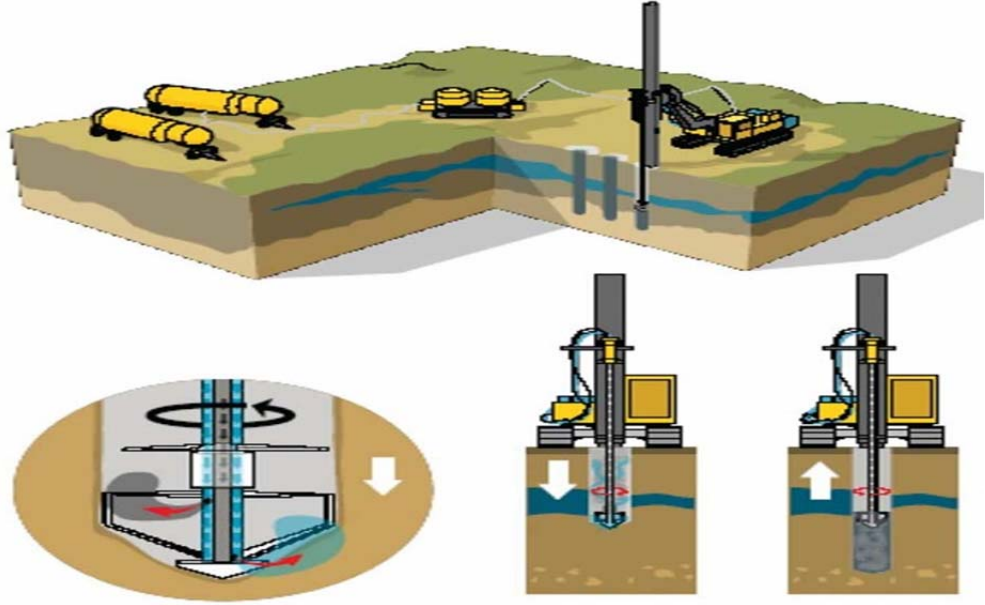
**Şekil 2.1.** Zemin iyileştirmesinde farklı yöntemler (Altun 2010)



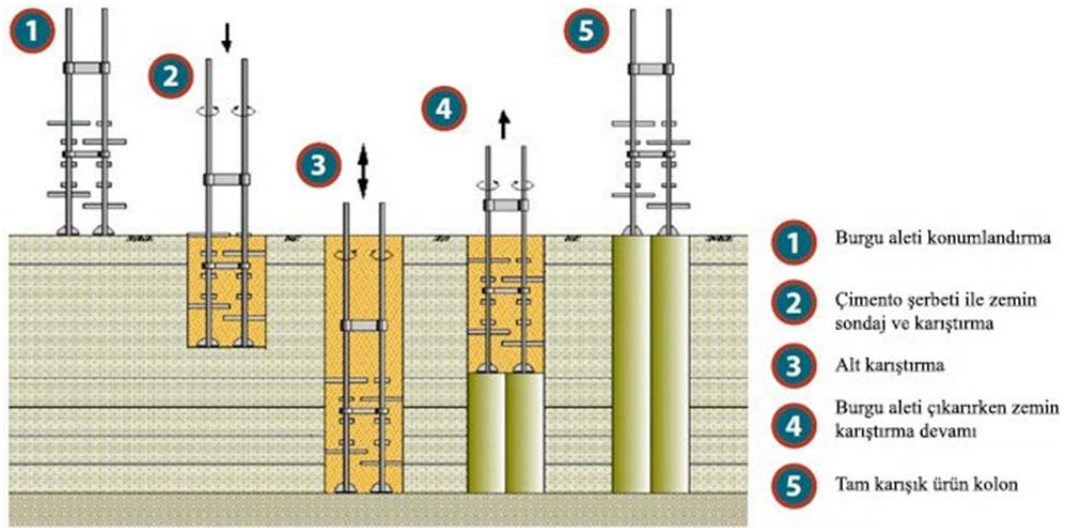
Şekil 2.2. Derin karıştırma yönteminin kullanıldığı zemin iyileştirme alanları (Anonymous 2010a)



Şekil 2.3. Derin karıştırma yönteminin uygulama alanlarının yüzdesel dağılımı (Terashi 2009)

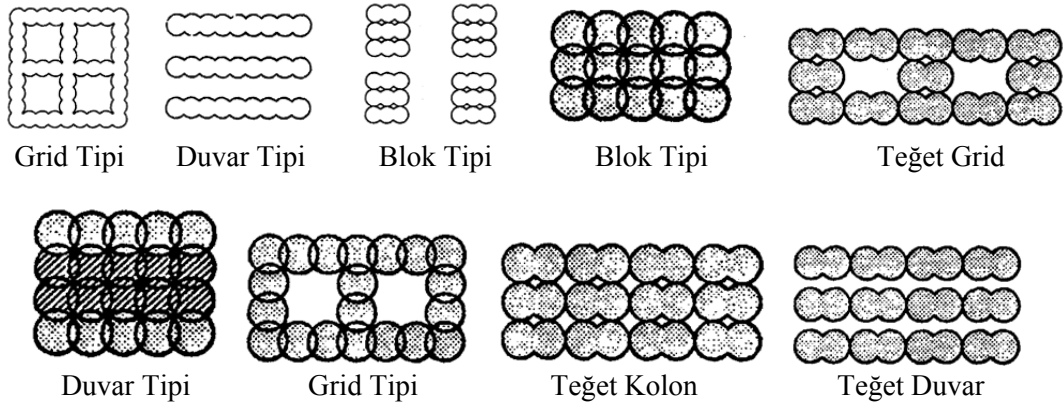


Şekil 2.4. Derin karıştırma yönteminin tipik şeması (Anonymous 2010b)



Şekil 2.5. Derin karıştırma yönteminin uygulanması (Anonymous 2010c)

Bu iyileştirme ile zeminin dayanımı artar, sıkışabilirliği ve geçirimsizliği ise düşer. Tipik katkıları çimento ve kireçtir ancak curuf veya diğer katkıları da kullanılabilir. Derin karıştırma kolonları tek başına, ayakları oluşturmak için gruplar halinde, duvarları için tek sıra halinde veya hücreleri oluşturmak için belirli kalıplarda uygulanabilirler. Bu işlem kaba-daneli zeminlerde sızdırmaz perde duvarı oluşturmak için, kazı destek duvarları inşa etmek için ve sıvılaştırılabilir zeminleri stabilize etmek için kullanılabilir. Kolonların uygulama alanı ve şekline göre grid, duvar, teğet ve blok tipi olarak farklı şekillerde uygulanabilir (Şekil 2.6). Derin karıştırma kolonlarının çapı genellikle 0,6 m ile 1,5 m ve derinliği ise 40 m'ye kadar olabilir (Şekil 2.7)



**Şekil 2.6.** Derin karıştırma uygulama şekilleri (Yang 1997)

Derin karıştırma yönteminde, çimento, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kireç, çeşitli katkıları veya bunların kombinasyonları bağlayıcı madde olarak kullanılmaktadır. Kullanılan bağlayıcı, zemin cinsine bağlı olarak iyileştirilecek zemin hacminin %20-30'u kadar olmalıdır. İçi boş auger borusu istenilen derinliğe indirildikten sonra boru içinden bağlayıcı madde pompalanarak boru ucundaki paletler yardımıyla zemin ile karıştırılır. Karıştırma enerjisi (geri çekme ve dönme hızı) ve çimento oranı ayarlanarak iyileştirilen zeminin özellikleri belirlenir.





**Şekil 2.7.** Derin karıştırma kolonlarının farklı uygulamalarda ki çapları (Anonymous 2010d)

### 2.1.1. Derin karıştırma yönteminin tarihi gelişimi

İlk olarak ABD’de 1954 yılında Federal Karayolları İdaresinde (FHWA), yapılan 82 adet çalışma neticesinde uygulanan derin karıştırma, asıl gelişimini 1967’de Japonya ve İskandinav ülkelerinde yapmıştır. Son yıllarda derin karıştırma yöntemi Japonya, Çin, Fransa, İsveç ve Finlandiya’da giderek daha çok kullanılan bir yöntem olmuştur (Bruce and Bruce 2003).

### 2.1.2. Derin karıştırma uygulamaları ve avantajları

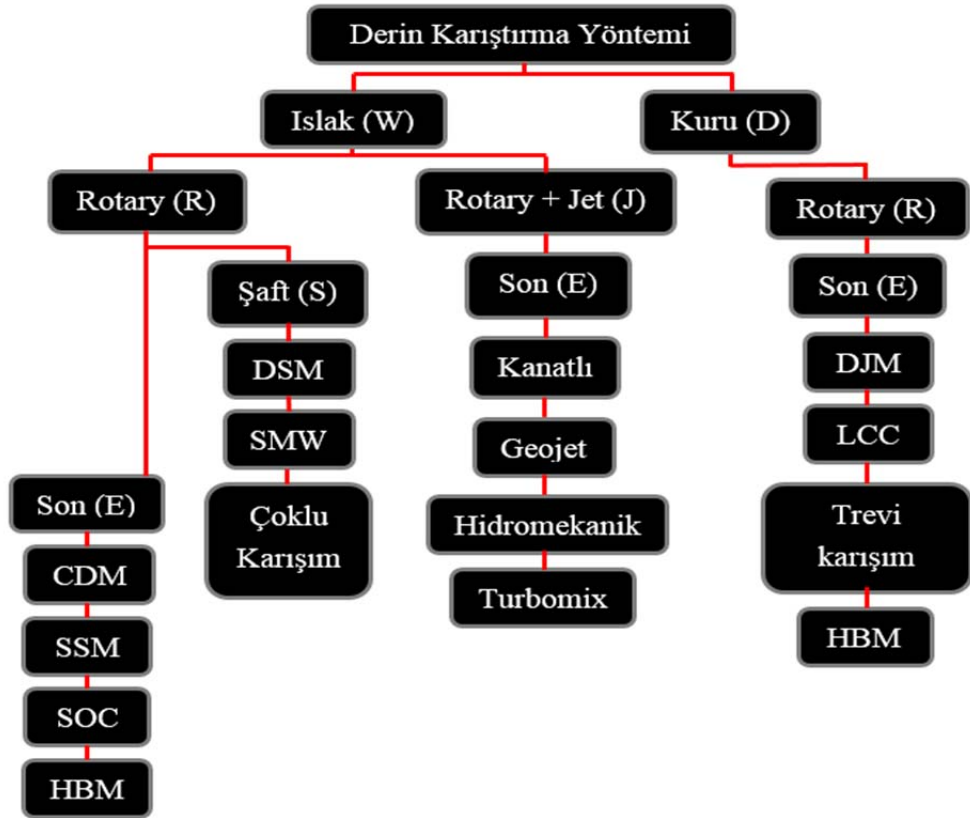
Genel olarak, derin karıştırma yöntemi çok sert, sıkı ve kayalık olmayan zeminlerde alternatif bir yöntem olarak yaklaşık 40 m'ye varan derinlikte uygulanabilir. Ayrıca, üst tabakanın boşluklu ve zeminin iyileştirme hacminin büyük oranda olduğu durumlar ile titreşimsiz ekipmanların gerekli görüldüğü durumlarda ya da zeminden istenilen dayanımın 0,1-5 MPa arasında olması durumlarında uygulanabilir (Bruce and Bruce 2003).

Derin karıştırma yöntemi bazı geoteknik problemlerinin çözümünde yeterli olmadığı da söylenebilir. Derin karıştırma yönteminin başlıca uygulama alanları şunlardır:

- Hidrolik kesme özelliği, derin karıştırma duvarları suyun bir taraftan diğer tarafa geçmesini veya su tutucu yapıların altında suyun hareketini engelleyebilir, barajlarda veya su tablası altında yapılan derin kazılar için uygulanabilir.
- Perde duvar olarak, çelikle beraber uygulanan derin karıştırma yöntemi, derin kazı yapılarında yanıl yüklerden gelen basıncı tutabilmek için uygulanabilir.
- Zemin ıslahında uygulanabilir.
- Zemin iyileştirmesinde, derin karıştırma yöntemi donatılı bir eleman gibi, zemin hacmini nispeten hafif yüklü yapılarda sıkıştırabilmesinde kullanılabilir.
- Sıvılaşmanın azaltılmasında, derin karıştırma yöntemi ızgara şeklinde uygulandığında sismik durumlarda sıvılaşmayı azaltır.
- Tehlikeli maddelerin doğada yayılmasının engellemesinde kullanılabilir (Bruce and Bruce 2003).

### 2.1.3. Derin karıştırma yönteminin sınıflandırması

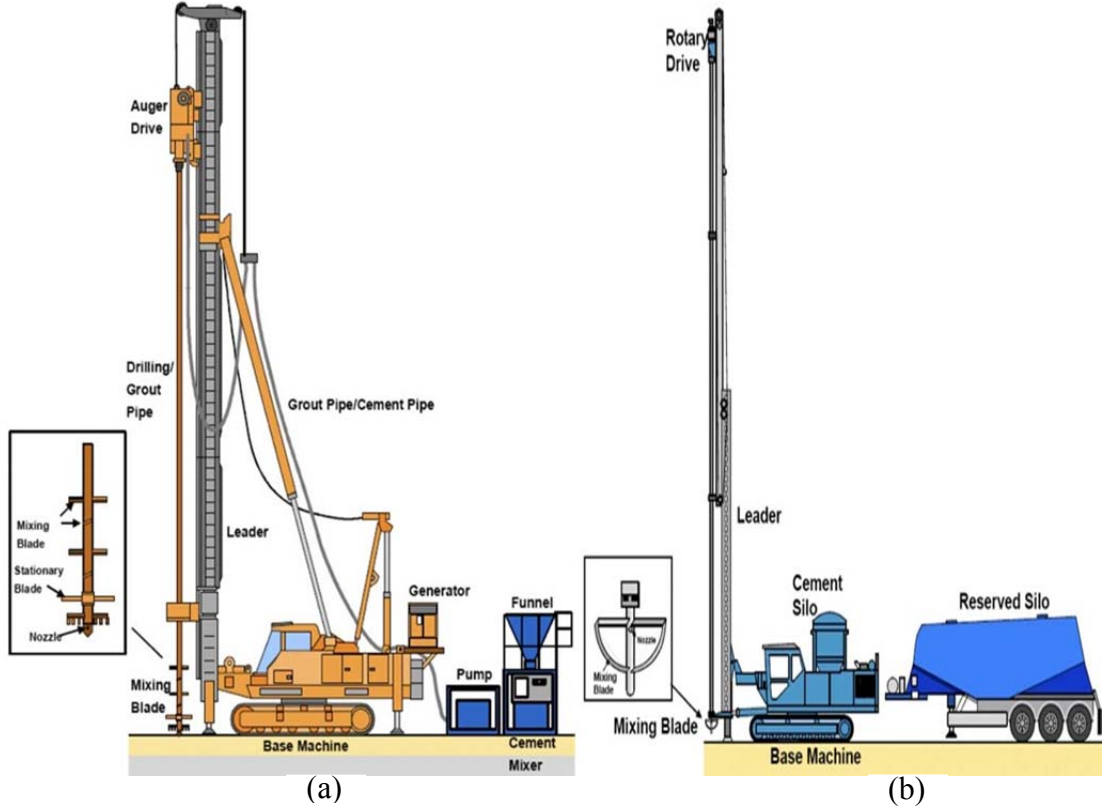
Derin karıştırmada uygulanabilen yöntemler Şekil 2.8’de verilmiştir. Bu yöntemde, Bağlayıcı madde ıslak (W) veya kuru (D) olarak iki farklı yöntemle zeminle karıştırılabilir (Şekil 2.9). Bağlayıcı madde düşük basınç ile rotary (R) yardımıyla zemine aktarılır veya jet (J) ile yüksek basınç kullanarak zemine enjekte edilir. Bazı sistemlere göre zeminle bağlayıcı madde burgunun sonunda (S) yerleştiği karıştırıcılarla karıştırılmaktadır. Halbuki bazılarında ise burgunun boyunda yerleşen palet bıçakları veya buna benzer bir parça ile (E) karıştırılır.



Şekil 2.8. Derin karıştırmada önerilen farklı yöntemler (Porbaha 1998)

Teorik olarak 8 farklı uygulaması olmasına rağmen, arazide Islak Jet Karıştırma (WJS), Kuru Rotary Karıştırma (DRS) ve Kuru Jet Karıştırma (DJS, burgunun ucunda) veya

Kuru Jet Karıştırma (DJE, burgunun boyunda) yöntemleri de uygulanmaktadır (Bruce and Bruce 2003).



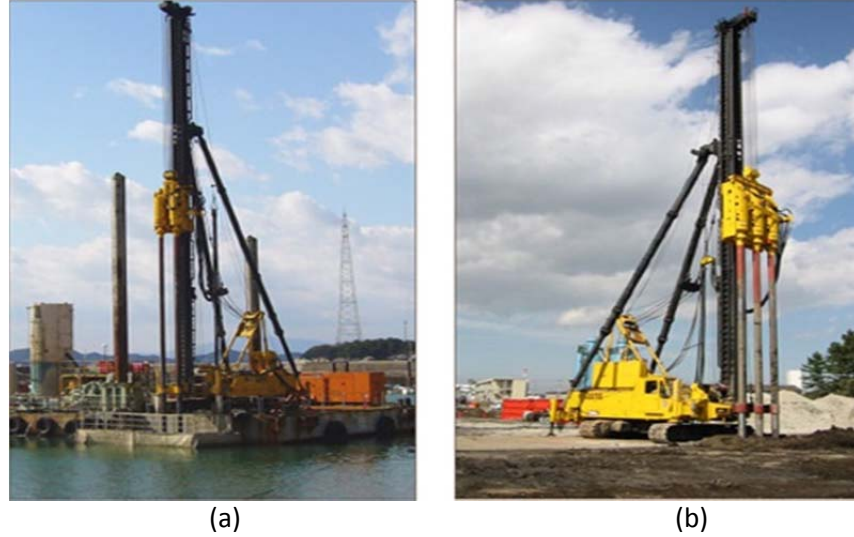
Şekil 2.9. Derin ıslak ve kuru karıştırma yöntemlerinin şeması (Anonymous 2010d)

- (a) Derin ıslak karıştırma şeması
- (b) Derin kuru karıştırma şeması

#### 2.1.4. Derin karıştırmada uygulanan ıslak ve kuru yöntem

Uygulamada çimento veya kireç, su ile bir çamur oluşturacak şekilde önceden karıştırılır ve bağlayıcı sıvı halde zemin içerisine dağıtılır. Bu teknik “ıslak derin karıştırma” olarak bilinir. Bu yöntem 1970’de Kawasaki Steel, Fudo ve Takenaka grubu tarafından çimento harcı ve çimento-su çamurunu bağlayıcı madde olarak derin çimento karışımı (DCM) ve kontrol modüllü kolonlar (Controlled Modulus Columns-CMC) yöntemlerinin geliştirmesinde kullanılmıştır. Daikoku Pier 1977’den itibaren 10 yıl boyunca derin karıştırmanın ıslak yönteminin geliştirilmesi üzerinde araştırma yapmıştır (Terashi 2002a). Derin karıştırmanın ıslak yöntemi genel olarak derin çimento

karıştırma yöntemi (CDM) olarak adlandırılır (Terashi 2002). Derin ıslak karıştırma yöntemi deniz uygulamalarında özellikle kaplama duvarlarının temelini güçlendirmek amacıyla hemde iskele duvarı ve dalgakıran temellerinde kullanılır (Terashi 2002). Karıştırma bıçaklarının çapı 1,0-1,6 m arasında ve maksimum uygulama derinliği suyun altında 70 m dir. Arazide ise şev kaymasını ve sıvılaşmayı, oturmanın azatmasını ve temellerin taşıma gücünü artırmak amacıyla kullanılmaktadır. CDM'nin standart ekipmanı iki şafttan, çapı 1 m olan karıştırıcı bıçağı ve uygulama derinliği yaklaşık 50 m'den oluşmaktadır. Islak karıştırma yönteminin denizde ve arazide uygulanması Şekil 2.10 verilmiştir.



**Şekil 2.10.** Derin ıslak karıştırmaya örnekler (Anonymous 2010e)

- (a) Denizde uygulanan
- (b) Arazide uygulanan

Zeminlerin suya doymuş ve yeraltı suyu seviyesi altında olduğu durumlarda katkı malzemesi karıştırıcının ucundan kompresörler yardımıyla kuru olarak enjekte edilir. Bu teknik kuru derin karıştırma olarak tanımlanır. Karıştırma işleminin amacı, bağlayıcıyı zemin içerisinde, kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi için en uygun ortamı hazırlayacak şekilde dağıtmaktır.

Bu yöntem ilk olarak 1978'de Japonyada arazi uygulamasında bağlayıcı pnomatik besleme sistemi ile uygulanmış ve kuru jet karıştırma (DJM) adı verilmiştir. Mevcut standarta göre derin kuru karıştırma ekipmanı iki şafttan, karıştırıcı bıçağının çapı 1.0 m



ve maksimum nüfuz 33 m'den oluşmaktadır. Şekil 2.11'de derin kuru karıştırma ekipmanı gösterilmiştir. Derin kuru karıştırma yönteminde 21 yıllık bir süre içinde kullanılmış bağlayıcı maddelere göre şöyle sıralanabilir: portland çimentosu %28, cüruf çimentosu B tipi %30, çimento %33, sönmemiş kireç %8 ve diğerleri %1 (Aoi 2002).



**Şekil 2.11.** Derin kuru karıştırma (Day *et al.* 2005)

## 2.2. Derin Karıştırma Yönteminde Kullanılan Bağlayıcılar

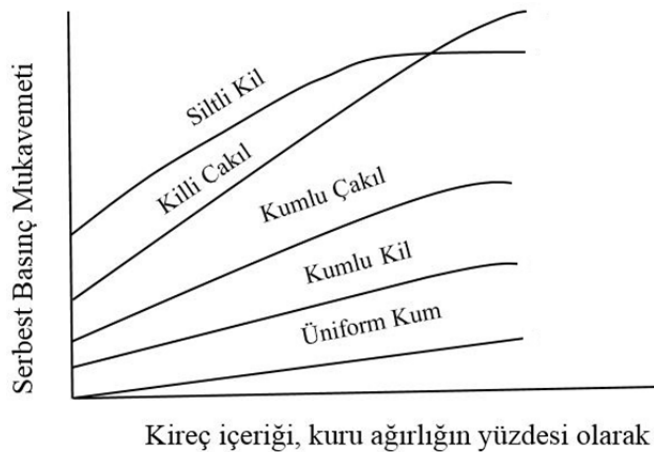
Zeminlerin iyileştirilmesinde katkı seçimi için, zemin cinsi, iyileştirme amacı (stabilite artışı, kaplama kalınlığının azalması, vb.), zeminin hangi özelliğinin iyileştirileceği, maliyet ve elde edilme kolaylığı gibi hususlar daima göz önünde tutulmalıdır. Kireç bilinen en eski stabilizasyon malzemesidir. Çin'deki uygulamaları yanında, Romalılar tarafından da yol yapımında kullanılmıştır. Roma yakınında Pozzuolini'de çıkarılan volkanik külün kireçle karıştırıldığında reaksiyona girerek büyük dayanım kazandığı anlaşılmıştır (Tumluer 2006).

Çimento ve kireç en önemli bağlayıcı maddelerden ikisi olarak derin karıştırma yönteminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, yüksek fırın cürufu, alçı,

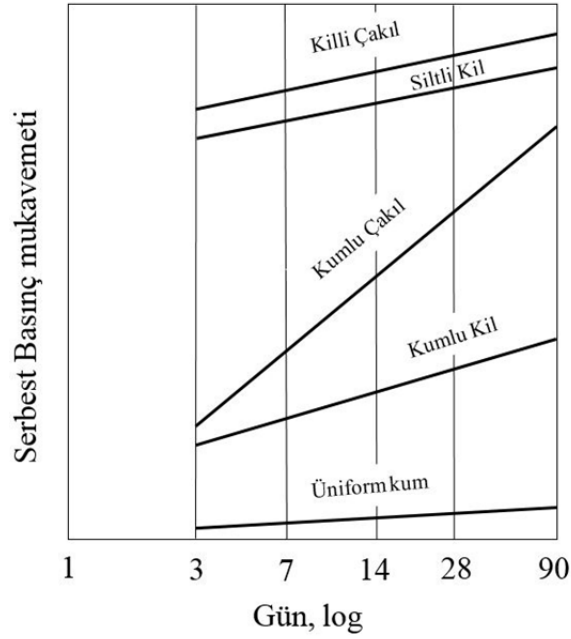
kül ve bunların diğer yan ürünleriyle birlikte, kombinasyonları da kullanılmaktadır (Moseley and Kirsch 1993).

İnce daneli zeminlere kireç karıştırılması, zeminin plastisitesinin azalmasına, ayrıca kil mineralleri ile kireç arasında ortaya çıkan puzolanik reaksiyon sonucu meydana gelen bir çeşit çimentolanma nedeni ile zeminin mukavemetinin artmasına yol açmaktadır. Söz konusu kimyasal reaksiyonlar nemlilik ve ısı gibi çevre koşullarının etkisi altında zamana bağlı olarak geliştiği için zeminin mukavemeti de zamanla artmaktadır (Tumluer 2006).

Zeminde kireç kullanıldığında, zeminin mukavemetinin ve şekil değiştirme modülünün artmasını, kabarma potansiyelinin ve şişme basınçlarının azalmasını ve çevre koşulları etkisi altında zeminin özelliklerinin bozulmasının daha sınırlı kalmasını 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 2.12’de görülmektedir (Tunç 2001). Ayrıca Şekil 2.13’te aynı kireç içeriğine sahip farklı zeminlerdeki zamana bağlı mukavemet artışı görülmektedir.



**Şekil 2.12.** Kireç içeriğinin çeşitli zeminlerdeki etkisi (Tunç 2001)



**Şekil 2.13.** Aynı kireç içeriğindeki farklı zemin cinslerinin zamana bağlı mukavemet artışı (Tunç 2001)

### 2.3. Donma-Çözülme Davranışı

Su donduğu zaman hacminde %9 artış olur.  $-22^{\circ}\text{C}$ 'de, buzun hacminde artışlar nedeniyle 207 MPa'a kadar basınçlar oluşturabilir, daha fazlası kayaların dağılmasında yeterli olabilir (Matsuoka and Murton 2008; Tsytoovich 1975). Su kılcal kanallar yolu ile zemin veya kaya içine sızması nedeniyle ve sıcaklık sıfırın altına düştüğü halde buz kristalleri oluşup ve genişlemeye neden olur, sıcaklık sıfırın üstüne ulaştığı zaman buz suya dönüşür, bu durumun tekrarlanmasına donma-çözülme işlemi denilir. Zemin-su içeriğinin değişmesiyle meydana gelen ıslanma-kuruma ve hava sıcaklığının değişmesiyle meydana gelen donma-çözülme olayları zeminin şekillenmesi ve/veya bozulmasında etkilidir. Zeminler mevsimsel değişimlere bağlı olarak farklı sıcaklık ve nem rejimlerine maruz kalmaktadırlar. Bu değişimler zeminlerin fiziksel durumlarını ve

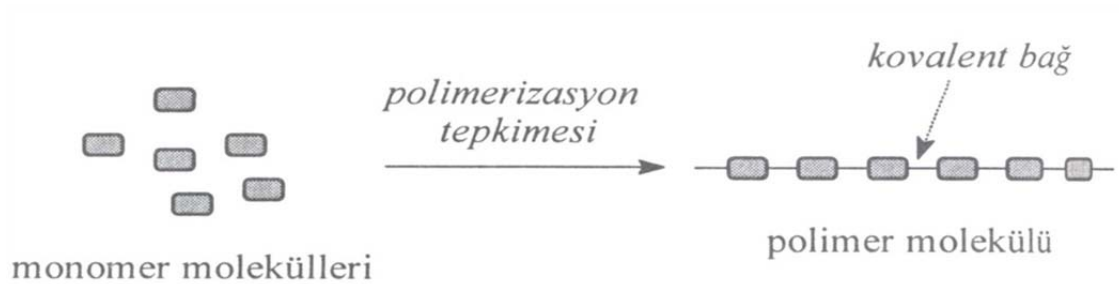


birçok özelliğini etkilemektedir. Zeminin nem durumundaki değişimler; yağış, sulama, kapiler yükselme, güneşlenme rüzgâra bağlı olarak ıslanma ve kuruma ile sonuçlanmaktadır. Tüm bu süreçlerde sıcaklıkla beraber donma-çözülme olayları da etkili olmaktadır. Zemin için iklim koşullarına bağlı olarak meydana gelen ve zeminin dinamik yapısı üzerinde etkili olan en önemli olaylardan biri de donma-çözülmedir. Yapılan araştırmalar donma-çözülme süreçlerinin zeminin fiziksel durumunu, özellikle zeminin ve agreganın yapısını etkilediğini göstermektedir (Özgan *et al.* 2012).

İnce daneli bir zemin donduğunda, oluşan buz mercikleri ilk önce su potansiyeli ve donma noktasının en yüksek olduğu en büyük gözeneklerde meydana gelir. Daha sonra küçük gözeneklerdeki suyun donması şeklinde oluşur. Bu durum zemin içinde çatlakların oluşmasına neden olur. Bununla ilgili Chamberlain *et al.* (1990) donmuş zemin numuneleri üzerinde yaptıkları çalışmada zeminden alınan ince kesitler üzerinde çatlakları açıkça görmüşler ve TEM (taramalı elektron mikroskobu) yaptıkları incelemede donmadan sonra zemin dokusunda önemli değişimlerin olduğunu ortaya koymuşlardır.

#### 2.4. Polimerler ve Yapıştırıcılar

Polimerler, çok sayıda aynı veya farklı atomik grupların kimyasal bağlarla az veya çok düzenli bir biçimde bağlanarak oluşturduğu uzun zincirli yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerdir. Polimerler ‘monomer’ denilen birimlerin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır (Şekil 2.14).



**Şekil 2.14.** Monomer molekülleri polimerizasyon reaksiyonu ile birbirine bağlanarak büyük polimer moleküllerini oluştururlar (Anonim 2008)

Tabii polimerler hayati önem taşıyan proteinleri ve nükleik asitleri, bitkilerde bulunan selüloz ve kauçuğu; silis, feldispat ve yeryüzü kabuğunda bulunan diğer mineralleri yapısında bulundurur. Suni polimerler, plastik ve suni kauçuk olarak; naylon gibi sentetik lifler olarak; cila ve boya gibi yüzey cilalanmasında ve kaplanmasında kullanılan maddeler olarak karşımıza çıkar (Anonim 2013). Çoğu polimerler karbona dayanır ve bu nedenle organik kimyasal madde olarak kabul edilir.

Polimerlerin genel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir (Saçak 2005):

- Hafif olmaları.
- Kolay şekillendirilebilir ve kolay dizayn edilebilirler.
- Kimyasal etkilere karşı dayanıklı olmaları.
- Atmosferik koşullara karşı dayanıklıdırlar.
- Mekanik dayanımları yüksektir.
- Yalıtıkcıdır, elektrik, ısı ve sesi iletmezler.
- Hijyeniktirler.
- Özellikleri istekler doğrultusunda değiştirilebilir.
- Optik özellikler (şeffaflık, matlık).
- Düşük maliyetlidirler (hammadde ve imalat)

Polimerler, plastik ve lastikler olarak ayrılabilirler (Kaya 2004). Yine yapıştırıcılar ise mühendisliğin değişik alanlarında sıklıkla kullanılan çoğunluğu polimerik malzemelerdir. Yapıştırıcı formülasyonlarında kullanılan organik polimerik maddelerin çeşitliliği, değişik özelliği bulunan yapıştırıcıların yapılmasını sağlamaktadır. Yapıştırıcı tek bir polimerden meydana geldiği gibi birden fazla polimerin karışımıyla da meydana gelmektedir. Yapıştırıcı formülasyonlarının temelini teşkil eden organik polimerik maddeler ise şunlardır:

- Organik esaslı (bitkisel veya hayvansal) esaslı maddelerde
- Termoplastikler (ısıl yumuşur)
- Sentetik ve termoplastik yapıda buluna elastomerler
- Termosetler (ısıl sertleşir)
- Polimer karışımları

#### 2.4.1. Termoplastikler

Normal sıcaklıkta katı halde bulunan ısıtıldığında yumuşayan ve eriyen ve bu süreç içerisinde herhangi bir kimyasal değişikliğe uğramayan, soğutulduğunda tekrar katı hale gelen ve ilk özelliklerini koruyan plastik maddelerdir. Termoplastikler defalarca ısıtılarak eritilebilir ve işleme metotlarıyla çeşitli şekil verilerek kullanılabilirler. Yapıştırıcı olarak, termoplastikler, solüsyon, dispersiyon ve katı halde kullanılırlar. Solüsyon ve dispersiyon halindeki termoplastik yapıştırıcılarda sıvı fazın sistemi terketmesi sonucu, termoplastik madde yapıştırıcı film olarak kalır ve yüzeyleri yapıştırır. Katı olanları eritilerek sıvı hale getirilirler, soğumaya bırakılan termoplastik madde yapışmayı sağlamaktadır. Selüloz türevleri, polivinil asetat, polivinil klorür, polietilen, polipropilen, polivinil alkol, poliakrilatlar, polieterler ve birçok termoplastik madde yapıştırıcı olarak kullanılmaktadır. Bu maddelerin büyük bir çoğunluğu organik çözücülerde çözünürler. Bu sebeple daha çok çözücü bazlı yapıştırıcı olarak kullanılırlar. Ayrıca emülsiyon halinde, film ve katı halde de yapıştırıcı olarak kullanılırlar (Doğan *et al* 2006).

Termoplastik türü yapıştırıcıların birçoğu 100°C gibi yüksek sıcaklığa dayanmaktadır. Bunların yapışma gücü kuvvetlidir ama çekme gücü pek kuvvetli değildir. Bir takım koruma tedbirleri alınmamış ise atmosferik şartlar ve kullanıldıkları şartlarda çatlama mümkündür. Pek fazla yük gerektirmeyen ortamlarda metalik olmayan parçaların, plastiklerin, deri, kâğıt, kumaş ve benzeri malzemelerin yapıştırılmasında kullanılırlar (Doğan *et al* 2006).

### 2.4.2. Termosetler

Termoset reçineleri termoplastiklere nazaran ısı ile özellikleri değişen plastik maddelerdir. Termosetler, ısıtıldıklarında kimyasal bir değişme uğrarlar ve çözünen, eriyen bir yapıdan sonuçta erimez ve çözünme bir yapıya kavuşurlar. Bunlar bir kez ısı ve basınç altında şekil verildikten sonra yeniden şekillendirilemezler. Bu özellikleri, yapılarında bulunan polimer zincirleri termoplastiklerin aksine çapraz bağlarda (kimyasal bağlarla) birbirlerine bağlanmış olmalarından kaynaklanmaktadır. Termosetlerden epoksi reçineleri, poliesterler, fenolik ve amino reçineleri ile yapılan yapıştırıcılar bu grubun önemli üyeleri arasında bulunmaktadır. Termosetlerde yapılan yapıştırıcılar önemli üyeleri arasında bulunmaktadır. Termosetlerde yapılan yapıştırıcılar, 200°C ve üstü gibi yüksek sıcaklıklarda kullanılmaktadır. Sıvı, pasta ve toz halinde bulunan yapıştırıcılarla çok kuvvetli bir yapıştıma elde edilmektedir. Yapıştırıcının çekme gücü kuvvetlidir. Kopma ve kırılmalara karşı direnci fazla olan termoset yapıştırıcıları metallerin, seramik, ahşap, cam ve benzeri yapısal malzemelerin yapıştırılmasında kullanılırlar. Termosetler terimi hem sıcakta hem de oda sıcaklığında çapraz bağlı yapıya dönüşebilen anlamına gelmektedir. Termosetlere örnek olarak epoksi reçineler, polytetrafloroetilen, polyüretan, fenol-formaldehit reçineler, doymamış polyester reçineler verilebilir. Hatta kauçuklarda termoset plastikler grubuna dahil edilebilir, çünkü düşük yoğunlukta çapraz bağ içerirler. Termosetlerin kullanım amacına göre bu ara bağların sayısı ayarlanır (Doğan *et al* 2006).

### 2.5. Biyopolimerler

Biyopolimerler canlı organizmalar tarafından üretilen polimerlerdir. Selüloz, nişasta, kitin, proteinler, peptidler, DNA ve RNA biyopolimerlere örnek olarak gösterilebilir. Sayılan bu biyopolimerler sırasıyla şeker, amino asit ve nükleotid adı verilen monomerlerden oluşmaktadır. Selüloz Dünya'da hem en çok bulunan biyopolimer hem de organik bileşiktir. Bitkilerin yaklaşık %33'lük bir kısmını selüloz oluşturmaktadır.

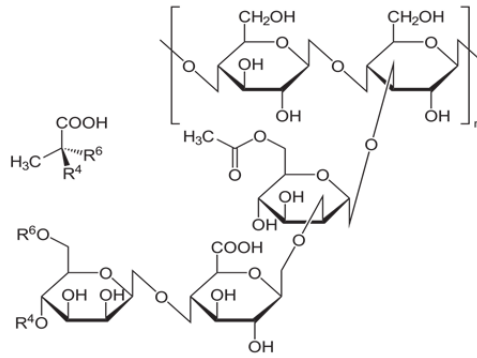
Pamuğun selüloz içeriği %90 iken, ağaçların %50'sini selüloz oluşturmaktadır (Anonim 2012).

Polimerler ve biyopolimerler arasındaki ana ve tanımlayıcı fark yapılarında gözükmektedir. Biyopolimerleri de içeren polimerler kendini tekrar eden monomer adlı yapı taşlarından oluşmaktadır. Biyopolimerlerin de iyi tanımlanmış yapıları vardır fakat bu onların tanımlayıcı özellikleri değildir (örnek: lingo-selüloz). Proteinler ele alındığı zaman kesin kimyasal kompozisyonları ve yapıtaşların dizilme sırasına birincil yapı denirken, birçok biyopolimer kendiliğinden karakteristik kompakt şekillere katlanarak, biyolojik fonksiyonlar edinirler. Yapısal biyoloji adında biyopolimerlerin yapısal özelliklerini çalışın bir dal dahi mevcuttur. Buna karşın çoğu sentetik polimer daha basittir ve daha rastgele yapılardır. Bu durum biyopolimerlerde olmayan moleküler kütle dağılımını sağlar. Biyopolimerlerin sentezi çoğu in vivo sistemlerde kalıp üzerinden gerçekleştiği için aynı çeşit olan bütün biyopolimerler her zaman tamamiyle aynıdır. Hepsi benzer dizide olurlar, benzer sayıda monomer içerirler ve bu sayede hepsi aynı ağırlığa sahiptir. Bu fenomene biyopolimerlerin tekil-dağılım (monodispersity) özelliği adı verilir ve çoklu-dağılım gösteren sentetik polimerlerden en önemli farklarından biridir (Anonim 2012). Ticari olarak birçok endüstride kullanılan çeşitli biyopolimerler vardır. Bunlar, guar gum, agar agar, arabik gum, keçiboynuzu gum, zantam gum v.b'dir.

### **2.5.1. Zantam Gum**

Glukozdan alkol fermantasyonu yolu ile arıtılması ile üretilebilmektedir. Çok küçük konsantrasyonlarda oldukça yüksek viskozite gösterir. Sıcak ve soğuk suda hemen çözünür. Dondurulma şartlarında bile stabildir. Yüksek alkolün ve asidin ortamda jelleşme özelliğini korur. Çok az miktarda zantam gum (%0,25–0,3) su–yağ emülsiyonlarında stabilite sağlar, meyve salataları için önemlidir. Bu etki gamın pseudoplastik özelliğinden ileri gelir. %0,5'den az konsantrasyonlarda pişirilerek pudinglerde yeterli jel özelliği verir. Fazla şekerli ürünlerde de kullanılır. Zantam gum

(Şekil 2.15) gıdalarda stabilizör, emülgatör, koyulaştırıcı, süspansiyon oluşturucu, tekstür geliştirici veya köpük arttırıcı olarak kullanılmaktadır. Düşük konsantrasyonlarda yüksek viskoziteli çözeltiler verdiği için, farklı sıcaklıklar da viskozitesinde az değişiklik görüldüğünden ve geniş bir pH aralığında üstün stabilite gösterdiğinden çok önemli fonksiyonlara sahiptir. Aynı zamanda, donma-çözülme stabilitesi ve süspansiyon oluşturma değerleri iyidir (Anonim 2013).



**Şekil 2.15.** Zantam gum formülü (Anonymous 2012a)

## 2.6. Uçucu Küller

Termik santrallerde enerji üretmek için yakıt olarak kullanılan kömürden, değişik özelliklerde kül ve cüruf, katı atık yan ürünü olarak ortaya çıkmaktadır. İleri teknolojiye sahip olan santrallerde, pulverize durumda yakılan kömürden arta kalan %12-%15 kadar külün büyük bir kısmını çok ince taneli kül oluşturur. Baca gazları ile birlikte çekilen ve filtrelerde tutulan çok ince taneli kül, uçucu nitelikli olduğundan “uçucu kül” olarak anılır (Öksüz 2006). Üretim yan ürünü olarak ortaya çıkan uçucu kül miktarı yılda 15 milyon ton olarak tahmin edilmektedir. Ülkenin çimento üretiminin 25 milyon ton civarında olduğu göz önüne alındığında, uçucu külün depolanması, saklanması veya atılmasının çevreye ve kamuya verdiği zararların önemi ortaya çıkmaktadır (Çakır 1999). Uçucu küller; kimyasal ve fiziksel özelliklerinin verdiği imkanlar nedeni ile çeşitli dünya ülkelerinde sanayide, teknikte ve inşaat endüstrisinde kullanılmaktadır. Uçucu küllerin bu şekilde kullanımı, endüstride daha ekonomik

uygulamalara ulaşılması imkanı verecektir. Uçucu küllerin Türkiye’de yıllık tüketimi ise üretimin %1’inden daha az seviyededir.

Uçucu küller fiziksel özellikleri bakımından şu şekilde sıralayabiliriz:

**Dane şekli ve Boyutu:** Uçucu kül çoğunlukla katı, biraz boşluklu ve küresel şekle sahip taneleri iğerir. Boşluklu taneler cenosphere olarak adlandırılır ve muhtevası %5 ile %20 arasındadır. Uçucu küllerin tane boyutları 1 ile 150 $\mu$  arasında değişir. %75’ten büyük kısmı 45 $\mu$  elekten geğer (Sevim 2003).

**Yoğunluk:** Normalde uçucu külün yoğunluğu 2,1 ile 2,7 gr/cm<sup>3</sup> civarındadır. Yoğunluğun yüksekliği uçucu külün inceliği ile ilgilidir. İnce küller kabaya göre daha fazla yoğunluk verirler (Sevim 2003).

**Renk:** Değişik kaynaklardan elde edilen uçucu küller değişik renklerde olabilir; ancak bu genellikle gri tonlarındadır (şekil 2.16). Bu renk, kullanılan fırınların işletilmesine ve kömürün kalitesine bağlıdır. Uçucu kül içerisinde yanmamış karbon oranı arttıkça rengi koyulaşır. Bunun yanı sıra demiroksit de uçucu külün rengini etkiler. Yüksek demiroksit iğeriği siyaha yakın bir renk verir. Genelde uçucu küller çimento rengine benzer ya da daha koyu bir renktedir (Sevim 2003).



**şekil 2.16.** Çeşitli renkteki uçucu küller (Öksüz 2006)

**Dayanım Aktivite İndisi:** Dayanım aktivite indisi uçucu külün puzzolanik reaksiyon ve dayanım kazandırma kapasitesini gösterir. Dayanım aktivite indisi ASTM C 311’e

göre belirlenir. Uçucu kül için bu değer 28 günde %75'ten daha az olmamalıdır (Sevim 2003).

**Su İhtiyacı:** Uçucu külün su ihtiyacı inceliği tarafından etkilenmektedir. Çok ince küllerle yapılan çimento hamuru, kaba olan uçucu küllerle yapılan çimento hamuruna göre oldukça fazla su ihtiyacı gösterir (Sevim 2003).

**Genleşme:** Pratikte zararlı olacak hacim genişlemeleri ve büzölmeleri gibi bozucu etkilerin uçucu kül karışımında görülmesi istenmez. ASTM C 618 (1994), hacim genişlemesi ve büzölme yüzdesini 0,8 olarak sınırlandırmış ve yapılacak deneyin ise ASTM C 311 (1994)'e göre yapılması istenmiştir (Sevim 2003).

**Üniformluluk (Homojenlik):** Uçucu kül danelerinin boyutları ve dağılımı belli bir üniformluluğa sahip olmalıdır. Uçucu külün üniformluluğu inceliğinin ve yoğunluğunun belirlenmesi ile kontrol edilir (Sevim 2003).

Uçucu külleri içindeki kimyasal karışımlarına göre 3 farklı şekilde sınıflandırabiliriz:

- CaO (kireç) içeriği açısından; CaO oranı %10'dan fazla ise bu tür uçucu küle yüksek kireçli ve kalsiyumlu uçucu küller, %10'dan az ise düşük kireçli ve kalsiyumlu uçucu küller adı verilir (ASTM C 618 1991).
- Yapısındaki kireç (CaO) ve sülfat (SO<sub>3</sub>) miktarına göre sınıflandırma yapılırsa, genel yapısı siliko aluminatlardan oluşan ve çoğunlukla taş kömüründen meydana gelen uçucu küllere siliko alüminöz uçucu küller adı verilir. Daha çok linyit kömüründen oluşan ve daha yüksek miktarda kireç ve sülfat içeren uçucu küllere sülfokalsik uçucu küller denir. Linyitten oluşan kireç ve silika (SiO<sub>2</sub>) miktarı yüksek uçucu küllere ise siliko kalsik uçucu küller adı verilir (Aitein *et al.* 1986).
- ASTM C 618 standartına göre uçucu küller F sınıfı uçucu kül ve C sınıfı uçucu kül olmak üzere iki ana bölüme ayrılırlar. F sınıfı uçucu küller bitümlü kömürden oluşur ve



yapısında  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  (Silisyum dioksit, alüminyum oksit, demir oksit) oranı %70'den fazla olan uçucu küllerdir. C sınıfı uçucu küller ise çoğunlukla linyit kömürü ve yarı bitümlü kömürden meydana gelir ve yapısında  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  (S + A + F) oranı %50'den büyük olan uçucu küllerdir (ASTM C618 2000).

Türkiye'de bulunan bazı termik santrallerde meydana gelen uçucu küllerin kimyasal bileşenleri Çizelge 2.1'de verilmiştir (Türker *et al.* 2009). Mineral yapıları açısından uçucu küller camsı yapısı olan alüminyum silikatlardan oluşurlar. Uçucu külün %70-90 oranını oluşturan temel bileşenleri  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 'tür. Uçucu külün geriye kalan kısmı ise Fe, Ca, Mg, Na, K ve Ti elementlerinden oluşmaktadır. Bu elementler Çizelge 2.2'de verilmiştir (Türker *et al.*, 2009).

**Çizelge 2.1.** Türkiye'deki bazı uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları (Türker *et al.* 2009)

Bileşim (%)	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Tunçbilek	Çayırhan	TS 639 sınırları	ASTM C 618 sınırları	
						F	C
$\text{SiO}_2$	27,4	56,8	58,59	49,13	-	-	-
$\text{Al}_2\text{O}_3$	12,8	24,1	21,89	15,04	-	-	-
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5,5	6,8	9,31	8,25	-	-	-
S+A+F	45,7	87,7	89,79	72,42	>70	>70	>50
CaO	47,0	1,4	4,43	13,2	-	-	-
MgO	2,5	2,4	1,41	4,76	<5	<5	<5
$\text{Na}_2\text{O}$	(n+k)0,3	(n+k)3,0	0,24	2,2	-	<1,5	<1,5
$\text{K}_2\text{O}$	-	-	1,81	1,76	-	-	-
$\text{SO}_3$	6,2	2,9	0,41	3,84	<5	<5	<5
k.k.	2,4	0,6	1,39	0,72	<10	<12	<6

Uçucu küllerin mühendislik özellikleri genellikle oldukça dar bir aralıkta değişir. Optimum su muhtevası, silt ve siltli killere nazaran daha geniş bir aralıktadır. Çatalağzı ve Soma – B uçucu külleri için farklı (standart proktor, modifiye proktor ve

titreşimlitokmak) sıkıştırma yöntemleri yakın sonuçlar vermiştir ve muhtemelen genelleme mümkündür. Düşük kalsiyumlu veya F tipi kuru veya suya doymuş uçucu küller kohezyonsuz zeminler gibi davranır ( $c'=0$ ) ve tipik  $\phi'$  değerlerinin sıkılığa bağlı olarak 30– 35 °C arasında değişmesi beklenir. Uçucu küller suya doymuş olmadığı zaman, suyun yüzeysel geriliminden dolayı görünen kohezyon oluşur ve serbest basınç deneyi uygulanabilir. Yüksek kalsiyumlu veya C tipi ıslak küllerde kendi kendine, zamana bağlı sertleşme olduğu için kohezyon ve serbest basınç dayanımında önemli artışlar gözlenir. Uçucu küllerin oldukça düşük geçirgenliği ve sıkışabilirliği vardır. Kısıtlı bilgiler arazide sıkışabilirliğin daha da düşük olduğunu göstermektedir. Oturmalar kile nazaran çok daha hızlı oluşur (Çakır 1999).

**Çizelge 2.2.** Uçucu Kül İçindeki Elementler (Türker *et al.* 2009)

Uçucu kül (mg/L)					
Element	Min	Max	Element	Min	Max
Antimon(Sb)	0,8	1 000,0	Kobalt(Co)	6,0	1 500,0
Arsenik(AS)	2,3	1 700,0	Bakir(Cu)	30,0	3 020,0
Baryum(Ba)	96,0	13 900,0	Flor(F)	0,4	624,0
Berilyum(Be)	1,0	1 000,0	Galyum(Ga)	10,0	10 000,0
Bizmut(Bi)	10,0	30,0	Germanyum(Ge)	<10,0	11 000,0
Bor(B)	<10,0	3 000,0	Altın(Au)	0,004	0,5
Brom(Br)	0,3	670,0	Demir(Fe)	7 800,0	289 000
Kadmiyum	0,1	250,0	Kurşum(Pb)	3,1	1 600,0
Kalsiyum(Ca)	5 400,0	177 000	Lityum(Li)	77,0	120,0
Seryum(ce)	28,0	320,0	Magnezyum(Mg)	4 900,0	60 800,0
Klor(Cl)	13,0	25 000,0	Mangan(Mn)	31,0	4 400,0
Krom(Cr)	11,0	7 400,0	Civa(Hg)	0,01	22,0
Fosfor(P)	600,0	2 500,0	Molibden(Mo)	6,5	500,0
Platin(Pt)	0,7	-	Nikel(Ni)	1,8	8 000,0
Potasyum(k)	1 534,0	34 700,0	Gümüş(Ag)	1,0	50,0
Selenyum(Se)	1,2	<500,0	Sodyum(Na)	1180,0	20 300,0

Silisyum(Si)	196 000	271 000	Tellür	0,11	10,0
Titan(Ti)	400,0	15 900,0	Toryum(Th)	1,8	68,0

Uçucu kül en yaygın puzolanik özellik gösteren atıklardır. Puzolanik özellik malzemenin inceltirilip nemli ortamda kalsiyum hidroksitle kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliğine sahip olmasına denir. Uçucu külün ince olması puzolanik özelliğini etkiler. Uçucu kül daha fazla inceltirilerek yüzey alanının artırılması puzolanik etkileşimin daha fazla artmasına sebep olur. Bu durum uçucu külü iyi bir bağlayıcı malzeme yapar.

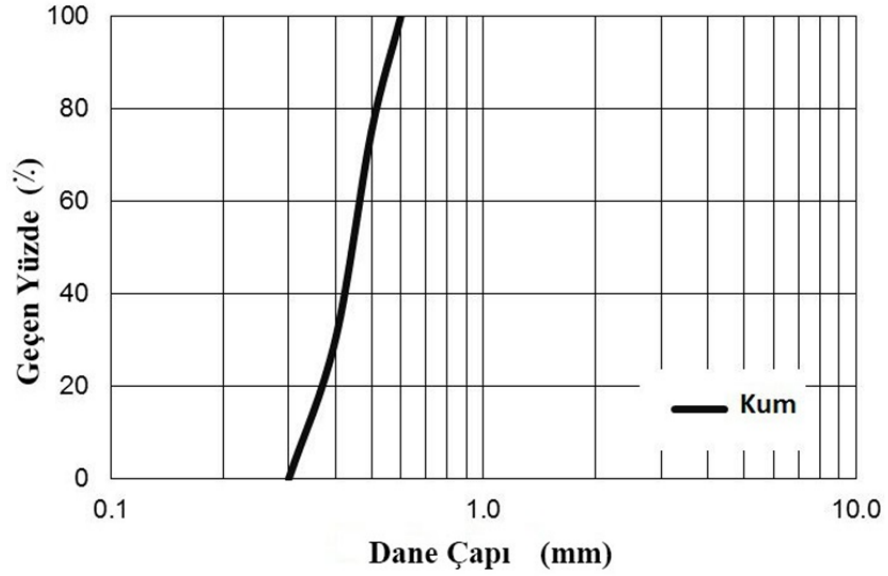
Uçucu küller geoteknik alanında da bir çok sahada kullanılmaya başlamıştır. Dolgu yapılması, zemin stabilizasyonun sağlanması ve bent yapılması için kullanılmaktadır (Ferreira *et al.* 2003). Aynı zamanda çöp sahaları ve atık depolarında sızdırmaz bariyer olarak kullanılmaktadır. Bunların yanında uçucu küller, donatılı zemin duvarlarda duvar arkası dolgusu olarak ve ayrıca çöp atık sahaları üzerinde yapılan beton kaplama veya döşemelerdeki farklı oturma hasarlarının onarımı için, kireç ile birlikte enjeksiyon yapımında kullanılmaktadır.

### **3. MATERYAL ve YÖNTEM**

#### **3.1. Materyal**

##### **3.1.1. Kum**

Çalışma kapsamında Altunkent-Erzincan'dan temin edilen dere kumu kullanılmıştır. Araziden alınan kum etüvde 105°C sıcaklığında kurutulup, sonra 0,3 ve 0,6 mm çaplı eleklerden elenerek kullanılmıştır. Kuma ait dane çapı dağılımı ve bazı geoteknik özellikleri Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında yapılan deneyler sonucunda belirlenmiştir. Kum numunelerine ait dane dağılımı eğrileri Şekil 3.1'de ve belirlenen bazı geoteknik özellikleri ise Çizelge 3.1'de verilmiştir. Arazide suya doymuş gevşek ince kumu (sıvılaştırılabilir bir zemini) temsil edebilmek için deneylerde 0,3 mm-0,6 mm aralığındaki kum %30 rölatif sıklıkta suya doymuş olarak laboratuvarında hazırlanmıştır.



Şekil 3.1. Deneysel kumun dane dağılım eğrisi

Çizelge 3.1. Deneysel kumun özellikleri

Geoteknik Özellikler		Kum
Zemin	sınıflandırma	SP
Özgül ağırlık, $G_s$		2,67
Max boşluk oranı		1,00
Min boşluk oranı		0,80
$D_{10}$ , mm		0,34
$D_{30}$ , mm		0,40
$D_{60}$ , mm		0,47
$C_u$		1,38
$C_c$		1,00

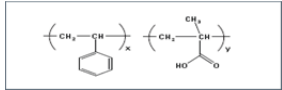
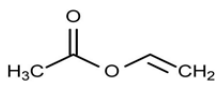
### 3.1.2. Polimerler

Deneysel kumun polimer olarak KEMPRO firmasından temin edilen Stiren Akrilik Kopolimer (SACP) ve polivinil asetat (PVA, PVAc) kullanılmıştır (Şekil 3.2). Polimerlere ait bazı özellikler Çizelge 3.2’de verilmektedir. Deneysel kumun polimerler üç farklı karışımında ve kum + su (suya doymuş kum) toplam ağırlığının %5, %10, %20 oranlarında kullanılmıştır.



**Şekil 3.2.** Deneylerde kullanılan SACP ve PVA

**Çizelge 3.2.** SACP ve PVA ait özellikler (Anonim 2009)

Özellikler	SACP	PVAc
Kimyasal Adı	Stiren Akrilik Kopolimer	Polivinil Asetat
Formülü		
Viskozite @20° C (cPs)	1000-5000	1700-3000
Partikül Boyutu (µ)	0,01-0,05	-
pH	8,5-9,5	-
Özgül Ağırlık (g/ml)	0,93	1,18
Kuruma Süresi	Orta Derecede Hızlı	-
Minimum Film Oluşturucu Isı	4-5° C	2-8° C
Fiziksel Görünüm	Şeffaf Sıvı	Şeffaf Viskoz Sıvı
Katı Oranı (%)	50 ± 1	12 ± 0,3
Ömrü	Minimum Altı Ay	1 Yıl
Çözücü	Ksilen	Su

### 3.1.3. Biyopolimer

Deneyleerde Bagherinia (2013) ve Fatholahzadeh (2013) alışmalar dikkate alınarak biyopolimer olarak zantam gum, kum + su (suya doygun kum) toplam ağırlığının %0,25 oranında kullanılmıştır (şekil 3.3).



**şekil 3.3.** Deneyleerde kullanılan biyopolimer (Zantam gum)

#### **3.1.4. Uçucu Kül**

Deneyleerde Afşin-Elbistan termik santralinden temin edilen uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu külün S+A+F oranı %50'den (%46) düşük olsada C sınıfı olarak kabul edilmektedir. Uçucu kül, deneyleerde kum + su (suya doygun kum) toplam ağırlığının %10, %20 ve %30 oranında kullanılmıştır.

### **3.2. Yöntem**

#### **3.2.1. Polimer karışım oranlarının belirlenmesi**

Çalışmada derin karıştırma için kullanılacak polimer karışım oranlarının belirlenebilmesi için n deneyleer yapılmıştır. Çizelge 3.3'te verildiği gibi üç farklı polimer karışımı hazırlanmıştır. Polimerler su ile ya da susuz olarak iki farklı şekilde

mikserde karıştırılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımların oda sıcaklığı ve kalıp içerisinde sertleşip sertleşmediklerinin ve sertleşme sürelerinin belirlenebilmesi için metal silindirik kalıplarda (D=3,8 cm, H=7,6 cm) numuneler üretilmiştir (Şekil 3.4, 3.5 ve 3.6).

**Çizelge 3.3.** Ön deneylerde kullanılan SACP ve PVA karışım oranları

	SACP (%)	PVA (%)
POL 1	100	-
POL 2	75	25
POL 3	50	50



**Şekil 3.4.** Deneylerde kullanılan %100 SACP (POL 1)

- (a) %100 SACP
- (b) %100 SACP kalıp içinde
- (c) %50 SACP + %50 su kalıp içinde



**Şekil 3.5.** Deneylerde kullanılan %75 SACP + %25 PVA (POL 2)

- (a) %75 SACP + %25 PVA karışımı
- (b) %75 SACP + %25 PVA kalıp içinde



(c) %50 POL 2 + %50 su kalıp içinde



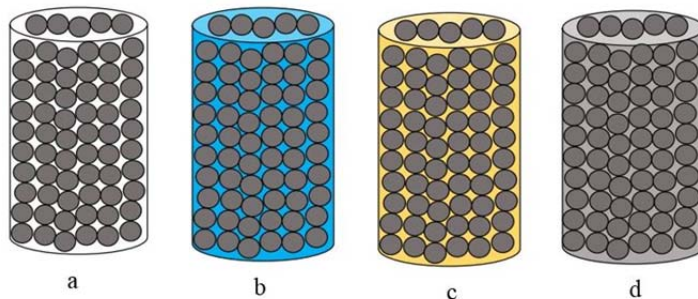
**Şekil 3.6.** Deneilerde kullanılan %50 SACP + %50 PVA (POL 3)

- (a) %50 SACP + %50 PVA karışımı
- (b) %50 SACP + %50 PVA kalıp içinde
- (c) %50 POL 3 + %50 su kalıp içinde

7 ve 14 gün oda sıcaklığında bekletilen karışım numuneleri kalıptan çıkarılmıştır. Bu kür sürelerinde, POL 1 ve POL 2 polimer karışımları kalıptan çıkabilecek sertliğe ulaşmışlar ama POL 3 kalıptan çıkarılabilecek sertliğe ulaşmamıştır. Bu sebeple suya doymun kum üzerinde yapılacak deneylerde POL 1 ve POL 2'nin kullanılmasına karar verilmiştir.

### 3.2.2. Derin karıştırma uygulanmış suya doymun kum numunelerin hazırlanması

Çalışmada %30 rölatif sıklığa sahip suya doymun kum, biyopolimer (zantam gum), polimer (POL 1 ve POL 2) ve uçucu kül kullanılarak derin karıştırma yöntemi ile laboratuvarında iyileştirilmiştir. Hazırlanan numunelerin şematik görüntüsü Şekil 3.7'de verilmiştir.



**Şekil 3.7.** Suya doymun kum-biyopolimer-polimer-uçucu kül karışımının şematik görüntüsü

- (a) %30 rölatif sıklıkta kuru kum numunesi (D=0,38 cm, H=7,6 cm boyutlarında ki silindirik kalıp içinde).
- (b) %30 rölatif sıklıkta suya doymun kum numunesi.
- (c) %30 rölatif sıklıkta suya doymun kum numunesinin biyopolimer eklemiş hali.
- (d) %30 rölatif sıklıkta suya doymun kum numunesinin biyopolimer, katkı ve polimer eklemiş hali.

Derin karıştırma yöntemini konu alan çalışmalar incelendiğinde laboratuvarında numune hazırlanmak için Çizelge 3.4'te verilen yöntemlerin kullanıldığı görülmüştür. Bu çalışmalar dikkate alınarak D=3,8 cm, H=7,6 cm olan silindirik metal kalıplar ve Şekil 3.8'de verilen mikser kullanılmıştır.



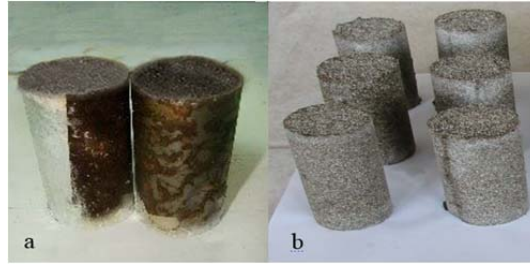
**Şekil 3.8.** Deneilerde kullanılan mikser

**Çizelge 3.4.** Değişik çalışmalarda laboratuvarında derin karıştırma uygulanmış numunelerin hazırlama yöntemleri

Çalışma	Kalıp	Mikser	Karıştırma süresi	Kür şekli
Japon Geoteknik Kurumu	D=5cm, H=10 cm Silindirik	120-300 rpm	10 dakika	20 ± 3 °C %95 nem
Euro Soil Slab	D=5 cm, H=10 cm Silindirik	-	5 dakika	18-22 °C Nemsiz ortamda
Al-Tabba <i>et al.</i> (1999) Shen <i>et al.</i> (2003)	D=5cm, H=10 cm, D=15 cm Silindirik	-	-	Oda sıcaklığında

Jacobson <i>et al.</i> (2002) Virginia Tech and VDOT United states	D=5 cm, H=10 cm Silindirik	68-155 rpm	5 dakika	20 ± 3 °C %100 nem
--	-------------------------------	------------	----------	-----------------------

Numunelerin hazırlanmasında öncelikle suya doymuş kum, kum ve su karıştırılarak hazırlanmıştır. Daha sonra zantam gum, uçucu kül ve polimer karışımı 5 dakika süre ile mikserde 150 rpm’de karıştırılmış ve hazırlanan suya doymuş kum ve bu karışım yine 5 dakika süreyle 150 rpm’de mikserde karıştırılmıştır. Karışımlar 38 mm çapında ve 76 mm yüksekliğinde silindirik metal kalıplara konulmuştur. Numunelerin kalıplara yapışmasını önlemek amacıyla kalıpların iç kısmı ince bir film tabakası şeklinde yağlanmıştır. Oluşan hava kabarcıkları elle hafifçe kalıbın kenarına vurularak çıkarılmıştır. Sertleşen numuneler 3-5 gün sonra kalıptan çıkarılmış (Şekil 3.9) ve 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri için %90 neme sahip olan kür odasında 20 ± 3 °C sıcaklıkta bekletilmiştir (Şekil 3.10).



**Şekil 3.9.** Laboratuvarında hazırlanan numuneler

- (a) Kalıp içerisindeki numune
- (b) Kalıptan çıkarılan numune



**Şekil 3.10.** Kür odasında bekletilen numuneler

### 3.2.3. Biyopolimer-polimer-uçucu kül karışım oranlarının belirlenmesi

Derin karıştırma uygulanacak suya doymuş kuma hangi oranlarda biyopolimer (zantam gum), polimer ve uçucu kül karıştırılacağı belirlenebilmesi için ikinci bir seri ön deney yapılmıştır. Yapılan bu ön deneylerde bir önceki bölümde anlatıldığı gibi numuneler hazırlanmış ve 28 günlük küre tabi tutulduktan sonra serbest basınç mukavemeti belirlenmiştir. Yapılan bu deneylerde; POL 2 polimer karışımından %0,25, %0,5, %1, %1,5, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında; zantam gumdan %0,1, %0,25 ve %0,5 oranlarında; uçucu külden %1, %3, %5, %10, %20 ve %30 oranlarda ayrıca %0,5, %3, %5 ve %10 oranlarında çimento kullanılmıştır. Bu oranlar kum + su (suya doymuş kum) toplam ağırlığına göre hesaplanmıştır. Çizelge 3.5'te ön deneyler için hazırlanan numuneler ve 28 günlük serbest basınç mukavemetleri verilmektedir.

**Çizelge 3.5.** Biyopolimer-polimer-uçucu kül karışım oranlarının belirlenmesinde kullanılan numuneler

No	Kum miktarı (%)	Su miktarı (%)	Biyopolimer (zantam gum) miktarı (%)	Polimer (POL 2) miktarı (%)	Katkı türü	Katkı miktarı (%)	Serbest Basınç Mukavemeti (MPa)
1	100	35	0,2	1	Uçucu Kül	1	Sertleşmiyor
2	100	35	0,2	3	Uçucu Kül	1	Sertleşmiyor
3	100	35	0,2	5	Uçucu Kül	1	Sertleşmiyor

4	100	35	0,2	1	Uçucu Kül	3	Sertleşmiyor
5	100	35	0,2	3	Uçucu Kül	3	Sertleşmiyor
6	100	35	0,2	5	Uçucu Kül	3	0,31
7	100	35	0,2	1	Uçucu Kül	5	0,07
8	100	35	0,2	3	Uçucu Kül	5	0,14
9	100	35	0,2	5	Uçucu Kül	5	0,08
10	100	35	0,1	1	Uçucu Kül	1	0,01
11	100	35	0,1	3	Uçucu Kül	1	0,07
12	100	35	0,1	5	Uçucu Kül	1	0,08
13	100	35	0,1	1	Uçucu Kül	3	0,07
14	100	35	0,1	3	Uçucu Kül	3	0,07
15	100	35	0,1	5	Uçucu Kül	3	0,41
16	100	35	0,1	1	Uçucu Kül	5	0,12
17	100	35	0,1	3	Uçucu Kül	5	0,08
18	100	35	0,1	5	Uçucu Kül	5	0,17
19	100	35	0,2				Sertleşmiyor
20	100	35	0,1				Sertleşmiyor
21	100	35	0,2		Çimento	0.5	Sertleşmiyor
22	100	35	0,2	0.5			Sertleşmiyor
23	100	35	0,1	0.25			Sertleşmiyor
24	100	35	0,0	1.5	Çimento	1.5	Sertleşmiyor
25	100	35	0,2	1.5			Sertleşmiyor
26	100	35	0,1	3	Çimento	3	0,50
27	100	35	0,1	5	Çimento	3	0,73
28	100	35	0,1	3	Çimento	5	0,19
29	100	35	0,1	5	Çimento	5	0,41
30	100	35	0,2	3	Çimento	3	0,28
31	100	35	0,2	5	Çimento	3	0,82
32	100	35	0,2	3	Çimento	5	0,23
33	100	35	0,2	3	Çimento	5	0,60
34	100	35	0,0	5	Çimento	5	Sertleşmiyor

Çizelge 3.5. (Devam)

No	Kum miktarı (%)	Su miktarı (%)	Biyopolimer (zantam gum) miktarı (%)	Polimer (POL 2) miktarı (%)	Katkı türü	Katkı miktarı (%)	Serbest Basınç Mukavemeti (MPa)
35	100	35	0,0	5	Uçucu Kül	5	Sertleşmiyor
36	100	35	0,0	5	Uçucu Kül	10	0,16
37	100	35	0,0	5	Çimento	10	0,14
38	100	35	0,0		Çimento	50	0,07
39	100	35	0,0	5	Uçucu Kül	10	0,11
40	100	35	0,0	5	Uçucu Kül	20	0,18
41	100	35	0,0	5	Uçucu Kül	30	0,31
42	100	35	0,0	10	Uçucu Kül	10	0,33
43	100	35	0,0	10	Uçucu Kül	20	0,29
44	100	35	0,0	10	Uçucu Kül	30	0,42
45	100	35	0,0	20	Uçucu Kül	10	1,07
46	100	35	0,0	20	Uçucu Kül	20	0,71

47	100	35	0,0	20	Uçucu Kül	30	0,49
48	100	35	0,0	5	Uçucu Kül	10	0,08
49	100	35	0,0	5	Uçucu Kül	20	0,19
50	100	35	0,0	5	Uçucu Kül	30	0,20
51	100	35	0,0	10	Uçucu Kül	10	0,23
52	100	35	0,0	10	Uçucu Kül	20	0,36
53	100	35	0,0	10	Uçucu Kül	30	0,33
54	100	35	0,0	20	Uçucu Kül	10	0,50
55	100	35	0,0	20	Uçucu Kül	20	0,59
56	100	35	0,0	20	Uçucu Kül	30	0,26
57	100	35	0,0	30	Uçucu Kül	10	0,40
58	100	35	0,0	30	Uçucu Kül	20	0,75
59	100	35	0,0	30	Uçucu Kül	30	1,00
60	100	35	0,0	30	Uçucu Kül	10	1,18
61	100	35	0,0	30	Uçucu Kül	20	1,23
62	100	35	0,0	30	Uçucu Kül	30	1,08
63	100	35	0,0	40	Uçucu Kül	10	1,47
64	100	35	0,0	40	Uçucu Kül	20	2,82
65	100	35	0,0	40	Uçucu Kül	30	2,82
66	100	35	0,0	40	Uçucu Kül	10	3,21
67	100	35	0,0	40	Uçucu Kül	20	3,03
68	100	35	0,0	40	Uçucu Kül	30	4,60

Çizelge 3.5 incelendiğinde anlaşılacağı gibi 1 MPa üzerinde serbest basınç mukavemeti sadece %30 ve %40 polimer içeriklerinde elde edilmiştir. Ayrıca biyopolimer katkılı numunelerin, biyopolimer katkısızlara oranla daha yüksek dayanım verdiğide görülmektedir. Ayrıca polimer ve uçucu külün düşük miktarlarında yine olumlu sonuçlar

alınmamıştır. Tüm bu sonuçlar dikkate alınarak zantam gum %0,25, polimer karışımları (POL 1 ve POL 2) %5, %10 ve %20, uçucu kül ise %10, %20 ve %30 oranında (kum + su toplam ağırlığının) kullanılmasına karar verilmiştir. %30 ve %40 polimer oranları yüksek dayanım vermelerine rağmen ekonomik olmamaları sebebiyle tercih edilmemiştir.

### 3.2.4. Serbest basınç mukavemeti deneyleri

Numunelerin serbest basınç mukavemeti deneyleri ASTM D 2166'e uygun olarak yapılmıştır. 38 mm çapında ve 76 mm yüksekliğinde silindir kalıplardan çıkartılan numuneleri 20 ton kapasiteli (Şekil 3.11) serbest basınç deney aletine yerleştirilmiş ve 0,5 mm/dakika hızlarında kırılmışlardır. Her 15 saniyede basınç değerleri dijital yük okuma aparatından okunmuştur ve bu işlem kırılma anına kadar devam ettirilmiştir. Serbest basınç mukavemetleri 3.1 bağıntısı ile belirlenmiştir.



**Şekil 3.11.** Serbest basınç mukavemeti deneylerinde kullanılan SoilTest cihazı

$$q_u = P_{\max} / A_f \quad (3.1.)$$

Bağıntıda,  $P_{\max}$ : kırılma anındaki basınç değeri,  $A_f$ : zemin numunelerinin kırılma anında en kesit alanını ifade etmektedir.

### 3.2.5. Donma-çözülme deneyleri

Hazırlanan numuneler “TS EN 1367-1 Agregaların donma-çözölmeye karşı direncinin tayini yöntemine” göre donma-çözölme deneyine tabi tutulmuştur. Buna göre numuneler alüminyum folyo içine konularak (Şekil 3.12) 5 ve 10 çevrim için donma-çözölme cihazında bekletilmiştir (Şekil 3.13). 5 ve 10 çevrimlerinin sonunda

numunelerin serbest basınç mukavemeti deneyleri yapılmıştır. Donma-çözülme işlemi için hazırlanmış numuneler cihaza konulduktan sonra ilk sıcaklığı  $-20^{\circ}\text{C}$ 'ye getirilmiş ve 6 saat bekletilmiştir, ikinci işlemde sıcaklık  $+25^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar getirilmiş ve 6 saat bekletilmiştir. Bu işleme 1. çevrim denilir (Roustaei and Ghazavi 2011). Donma işleminden çözülme işlemine geçme süresi ve aksine 1 saat olarak nitelenmiştir. Donma-çözülme çevrimlerinin sayısı 5 ve 10'a kadar devam etmiştir.



**Şekil 3.12.** Donma-çözülme cihazında bekletilen alüminyum folyo içerisindeki numuneler



**Şekil 3.13.** Donma-çözülme cihazı



#### **4. ARAŞTIRMA BULGULARI**

Kum zeminlerin derin karıştırma ile iyileştirilmesinde polimerlerin kullanılabilirliğini araştırmak için 18 farklı polimer–uçucu kül karışımı hazırlanmış ve 0,3mm-0,6 mm aralığındaki suya doygun kum (%30 rölatif sıklıkta) iyileştirilmiştir. İyileştirilmiş numunelerin 7, 14 ve 28 günlük serbest basınc mukavemetleri ve bu kr süresinde 5 ile 10 donma-çözülme çevrimleri sonucundaki serbest basınc mukavemetleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda elde olunan bulgular aşağıda üç başlıkta sunulmuştur.

##### **4.1. Polimer-Uçucu Kül Karışımlarının Suya Doygun Kumun Serbest Basınc Mukavemetine Etkisi**

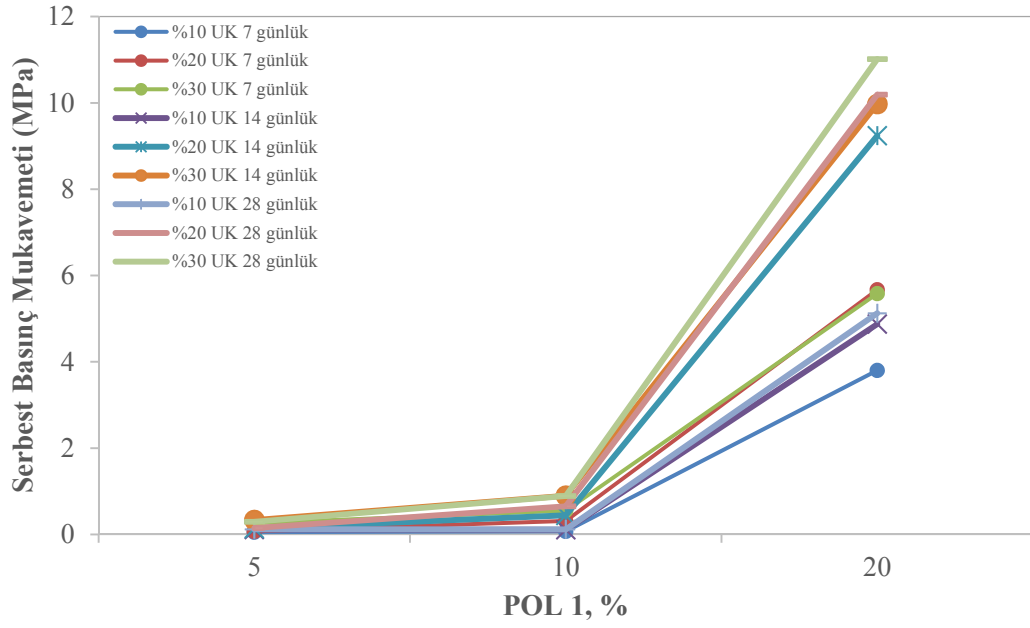
Polimer-uçucu kül karışımları kullanılarak iyileştirilmiş %30 rölatif sıklıktaki suya doygun kum numunelerinin 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri sonrasında elde edilen serbest basınç mukavemetleri Çizelge 4.1’de verilmektedir.

**Çizelge 4.1.** Numunelerin serbest basınç mukavemeti değerleri

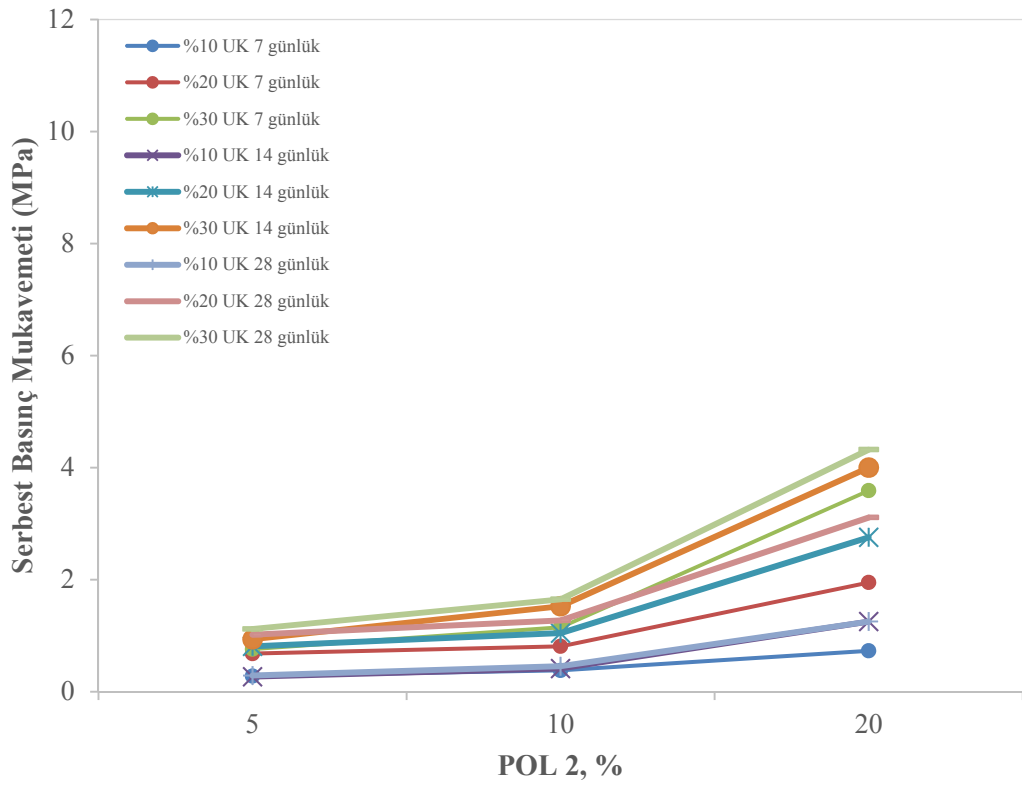
Deney Numarası	POL 1 (%)	POL 2 (%)	Biyopolimer (%)	Uçucu Kül (%)	Serbest Basınç Mukavemeti (MPa)		
					7 Günlük	14 Günlük	28 Günlük
S1	5		0,25	10	0,05	0,11	0,12
S2	5		0,25	20	0,07	0,14	0,15
S3	5		0,25	30	0,26	0,33	0,29
S4	10		0,25	10	0,07	0,11	0,11
S5	10		0,25	20	0,31	0,44	0,65
S6	10		0,25	30	0,55	0,90	0,89
S7	20		0,25	10	3,80	4,87	5,12
S8	20		0,25	20	5,67	9,24	10,19
S9	20		0,25	30	5,58	9,97	11,01
S10		5	0,25	10	0,28	0,27	0,29
S11		5	0,25	20	0,68	0,81	1,02
S12		5	0,25	30	0,76	0,94	1,12
S13		10	0,25	10	0,38	0,41	0,45
S14		10	0,25	20	0,81	1,05	1,27
S15		10	0,25	30	1,15	1,53	1,65
S16		20	0,25	10	0,73	1,25	1,25
S17		20	0,25	20	1,95	2,73	3,11
S18		20	0,25	30	3,59	4,00	4,32

Çizelge incelendiğinde 7 günlük serbest basınç mukavemetlerinin 0,05 MPa ile 5,67 MPa arasında, 14 günlük serbest basınç mukavemetlerinin 0,11 MPa ile 9,97 MPa arasında ve 28 günlük serbest basınç mukavemetlerinin 0,11 MPa ile 11,01 MPa arasında değiştiği görülmektedir. En yüksek mukavemet değerleri %20 POL 1 - %30 uçucu kül karışımında 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri için sırasıyla 5,58 MPa, 9,97 MPa ve 11,01 MPa olarak elde edilmiştir.

Polimer yüzdesinin serbest basınç mukavemetine etkisi POL 1 ve POL 2 için sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir. Şekiller incelendiğinde görüleceği gibi POL 1 polimer karışımının %5 ve %10 oranları çok düşük serbest basınç mukavemeti verirken %20 oranında 5 MPa üzerinde değerler vermiştir.

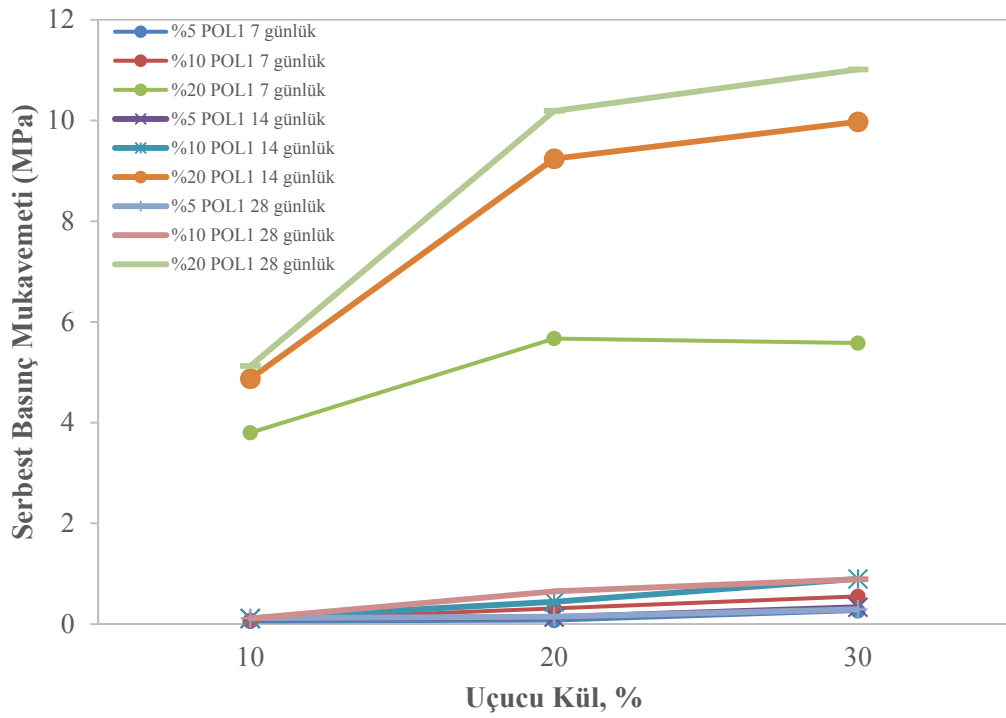


Şekil 4.1. POL1 yüzdesinin serbest basınç mukavemetine etkisi

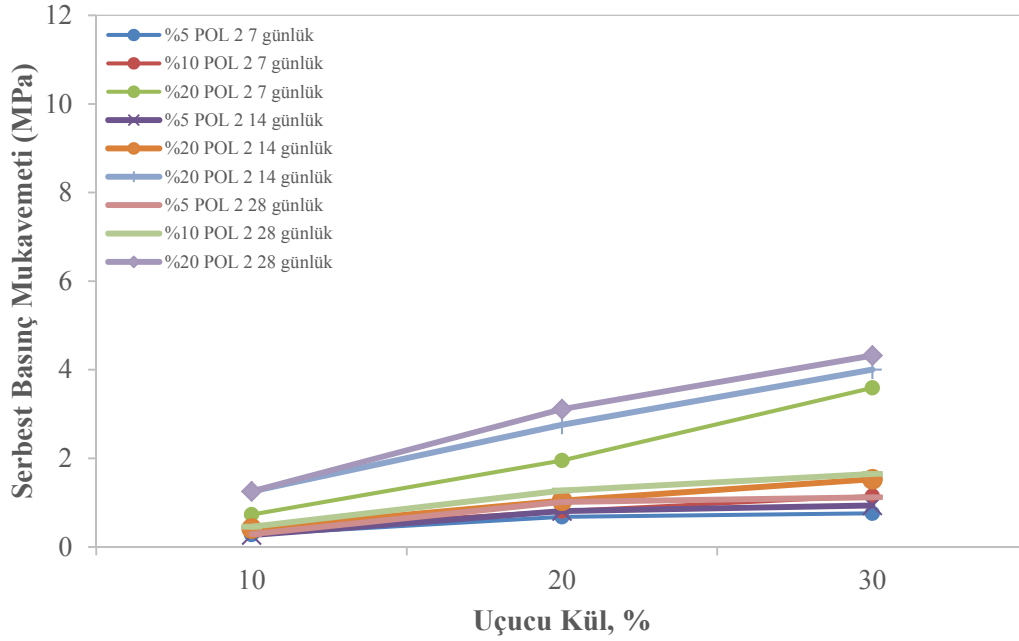


Şekil 4.2. POL 2 yüzdesinin serbest basınç mukavemetine etkisi

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te ise uçucu kül oranının numunelerin serbest basınç mukavemetine etkisi görülmektedir. POL 1 numunelerinde uçucu kül %10'den %20'ye çıktığında serbest basınç mukavemeti artmaktadır. Buna karşın %20 ile %30 uçucu kül oranlarında belirgin bir artış olmamıştır (Şekil 4.3). POL 2'de ise %20 polimer katkısı haricinde uçucu kül katkısının serbest basınç mukavemetine önemli bir katkısı olmamıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.3. Uçucu kül yüzdesinin serbest basınç mukavemetine etkisi (POL 1)



**Şekil 4.4.** Uçucu kül yüzdesinin serbest basınç mukavemetine etkisi (POL 2)

Numunelere ait gerilme-birim deformasyon eğrileri EK 1’de verilmektedir. Eğriler incelendiğinde %5 ve % 10 polimer miktarlarında numunelerin %2’lik deformasyonda gevrek kırıldığı ve %20 polimer miktarlarında ise numunelerin %2-%6 aralığında yine gevrek kırıldığı görülmektedir. POL 1 ve POL 2 numunelerinin kırılma anına ait fotoğraflar ise sırasıyla Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da verilmektedir.



**Şekil 4.5.** POL 1 numunelerinin kırılması ait iki örnek

- (a) %20 POL 1 + %30 uçucu kül numunesi  
(b) %20 POL 1 + %20 uçucu kül numunesi

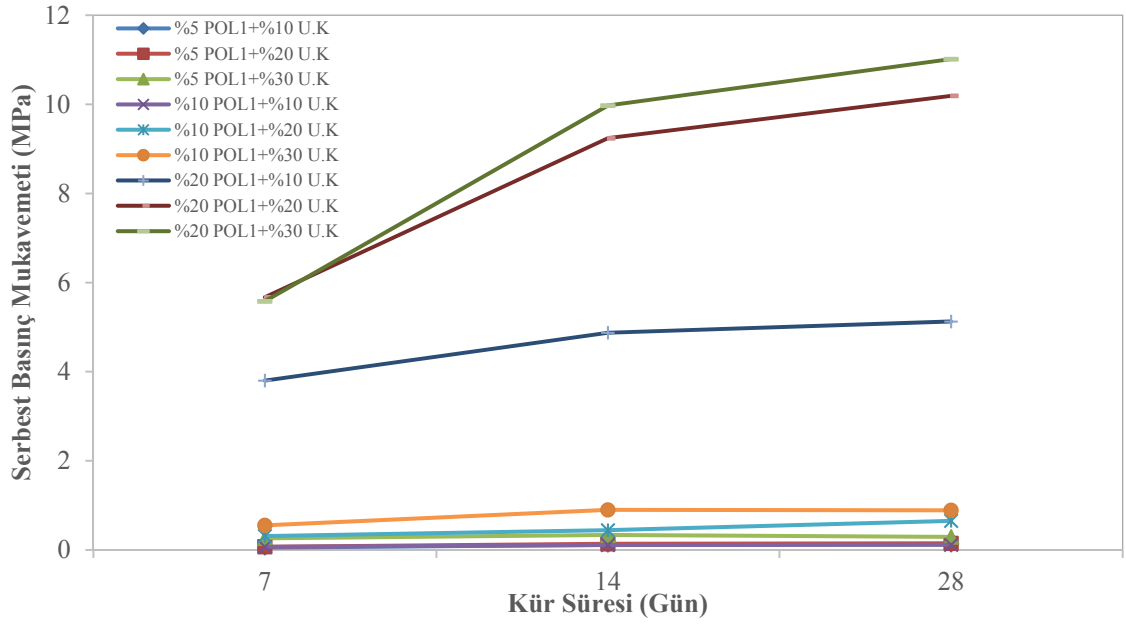


**Şekil 4.6.** POL 2 numunelerinin kırılması ait iki örnek  
(a) %20 POL 2 + %30 uçucu kül numunesi  
(b) %20 POL 2 + %20 uçucu kül numunesi

#### 4.2. Numunelerinin Serbest Basınç Mukavemetlerine Kür Süresinin Etkisi

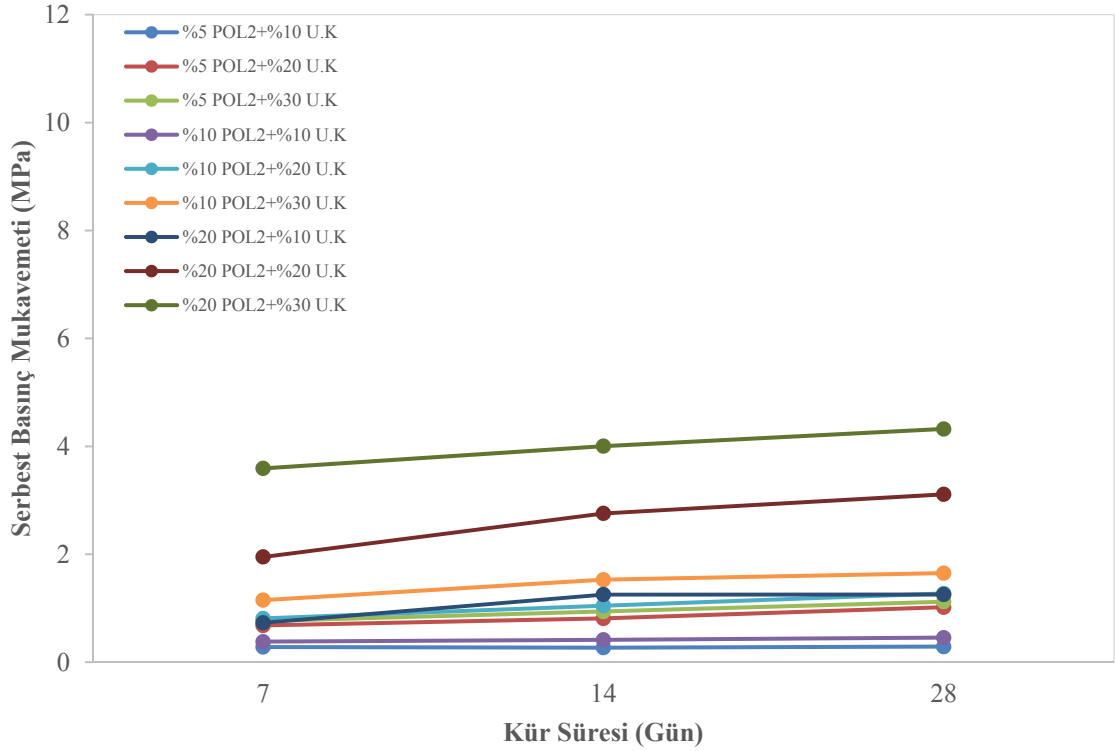
Kür süresinin numunelerin serbest basınç mukavemetleri üzerindeki etkisi görebilmek için 7, 14 ve 28 günlük numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar POL 1 için Şekil 4.7’de, POL 2 için ise Şekil 4.8’de verilmiştir.

Şekil 4.7 incelendiğinde POL 1 karışımlarında %20 polimer oranındaki numuneler hariç diğer tüm numunelerin serbest basınç mukavemetine kür süresinin önemli bir etkisi olmadığı görülecektir. Benzer şekilde POL 2 karışımında %20 polimer-%20 uçucu kül oranı haricinde diğer tüm numunelerde serbest basınç mukavemetine kür süresinin önemli bir etkisi yoktur (Şekil 4.8).



**Şekil 4.7.** POL 1 kür süresinin serbest basınç mukavemetine etkisi

On sekiz farklı karışım içerisinde 2 MPa'dan yüksek 7 günlük serbest basınç mukavemeti; %20 POL 1+ %10 UK; %20 POL 1+ %20 UK; %20 POL 1+ %30 UK, %20 POL 2+ %20 UK ve %20 POL 2+ %30 UK numunelerinde elde edilmiştir. Bu numunelere ait 7 günlük serbest basınç mukavemetleri sırayla 3,8 MPa, 5,68 MPa, 5,58 MPa, 1,95 MPa ve 3,59 MPa olarak belirlenmiştir. Aynı numunelerin 28 günlük serbest basınç mukavemetleri ise sırayla 5,12 MPa, 10,19 MPa, 11,01 MPa, 3,11 MPa ve 4,32 MPa olarak belirlenmiştir.



**Şekil 4.8.** POL 2 için kür süresinin serbest basınç mukavemetine etkisi

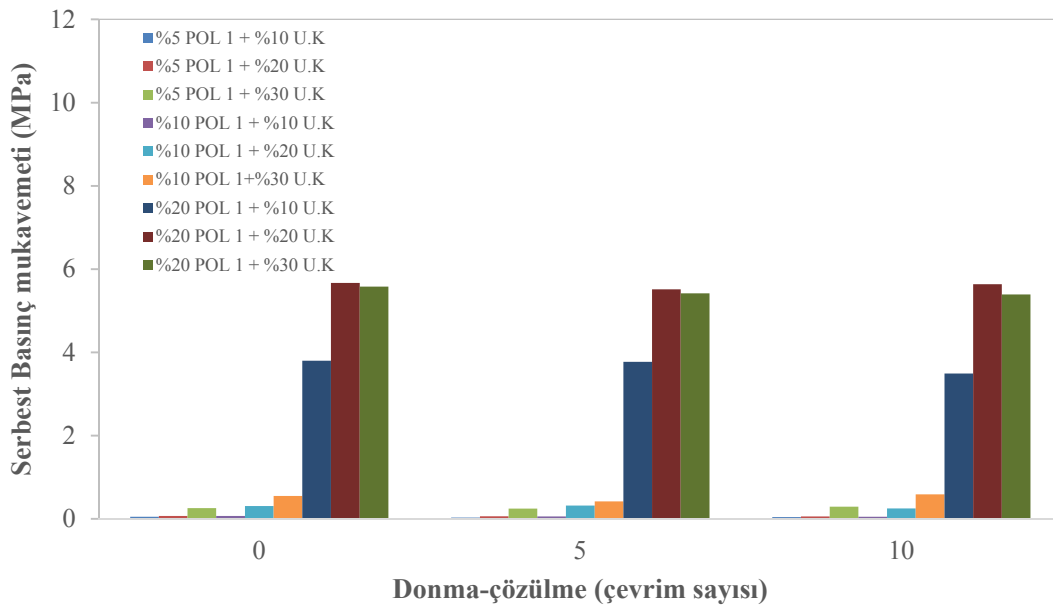
### 4.3. Numunelerinin Donma-Çözülme Davranışı

Donma-çözülmenin polimer, biyopolimer, uçucu kül katkılı suya doymuş kum numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisini inceleyebilmek için 7, 14 ve 28 günlük kür sürelerine tabi tutulan numuneler üzerinde donma-çözülmenin 5 ve 10 çevrimi uygulanarak daha sonra bu numuneler üzerinde serbest basınç mukavemeti deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen gerilme-deformasyon grafikleri EK 1'de verilmektedir. Gerilme-deformasyon eğrilerinden elde edilen maksimum serbest basınç mukavemetlerine donma-çözülme çevrim sayısının etkisi Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'da verilmiştir. 7 günlük küre tabi tutan numunelerin donma-çözülme etkisini gösterir grafikler, POL 1 ve POL 2 için sırasıyla Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmiştir. Aynı şekilde POL 1 ve POL 2 için 14 günlük numunelere ait sonuçlar sırasıyla Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'te verilmiştir. Ayrıca, kür süresi ve donma-çözülme çevriminin numunelerin serbest basınçlarına etkisinin üç

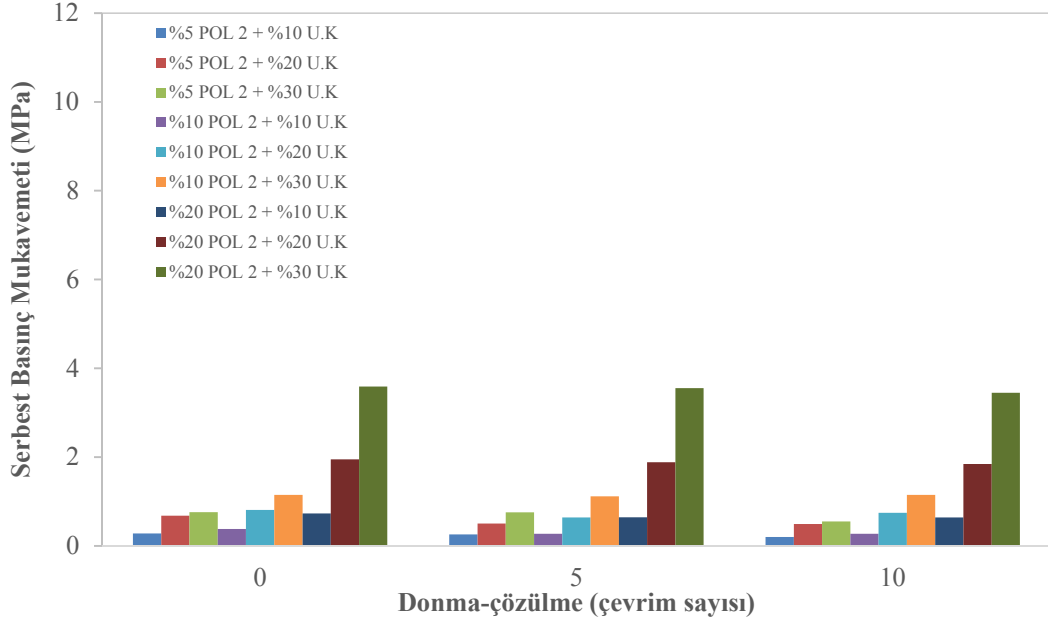


boyutlu olarak gösterimi her numune için ayrı ayrı Ek 2’de verilmiştir. Tüm şekiller incelendiğinde, donma-çözülmenin numunelerinin serbest basınç mukavemetleri üzerinde önemli bir etkisi olmadığı söylenebilir.

Şekil 4.9’de verilen 7 günlük numunelerin serbest basınç mukavemetleri incelendiğinde, %30 uçucu kül katkılı %20 POL 1 numunelerinin serbest basınç mukavemetleri donma-çözülmenin 5 ve 10 çevrimi sonrasında sırasıyla %2,87 ve %3,4 azalarak 5,58 MPa’dan 5,42 MPa ve 5,39 MPa’ya düşmüştür. %20 uçucu kül katkılı %20 POL 1 numunelerinin serbest basınç mukavemetleri ise donma-çözülmenin 5 ve 10 çevrimi sonrasında sırayla %2,82 ve %0,53 azalarak 5,67 MPa’dan 5,51 MPa ve 5,64 MPa’ya düşmüştür. Şekil 4.10’de verilen 7 günlük numunelerin serbest basınç mukavemetleri incelendiğinde, ise %30 uçucu kül katkılı %20 POL 2 numunelerinin serbest basınç mukavemetleri donma-çözülmenin 5 ve 10 çevrimi sonrasında sırasıyla %1,11 ve %3,9 azalarak 3,59 MPa’dan 3,55 MPa ve 3,45 MPa’ya düşmüştür. %20 uçucu kül katkılı %20 POL 2 numunelerini serbest basınç mukavemetleri ise donma-çözülmenin 5 ve 10 çevrimi sonrasında sırasıyla %3,08 ve %5,13 azalarak 1,95 MPa’dan 1,89 MPa ve 1,85 MPa’ya düşmüştür.

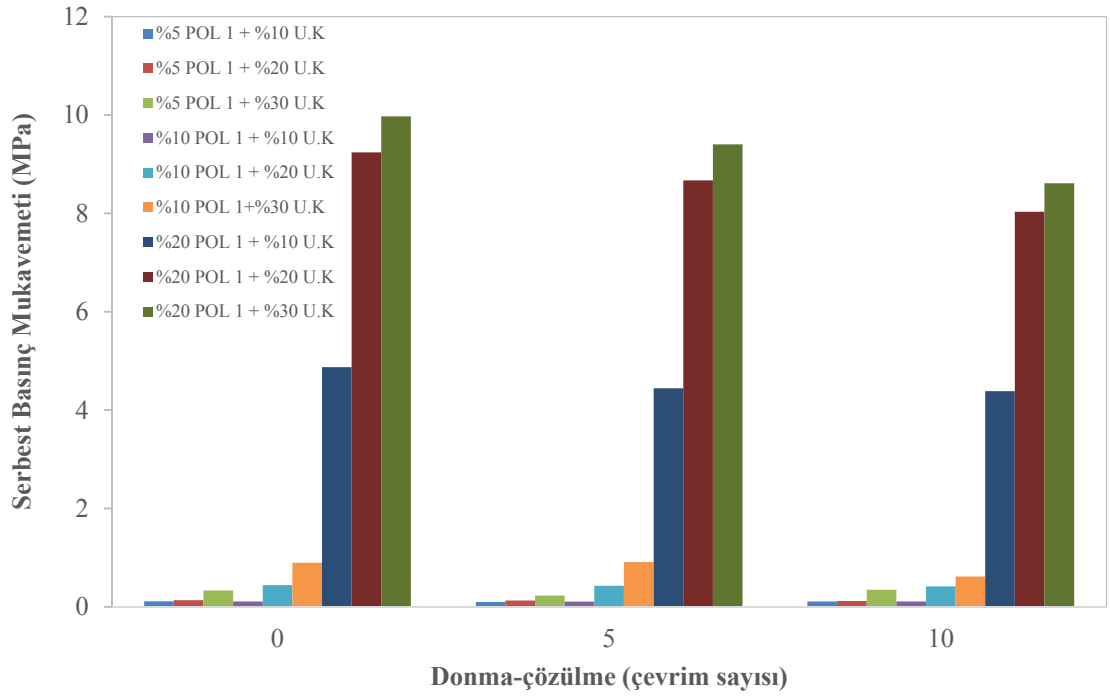


**Şekil 4.9.** 7 günlük POL 1 numunelerinin serbest basınç mukavemetine donma-çözülmenin etkisi

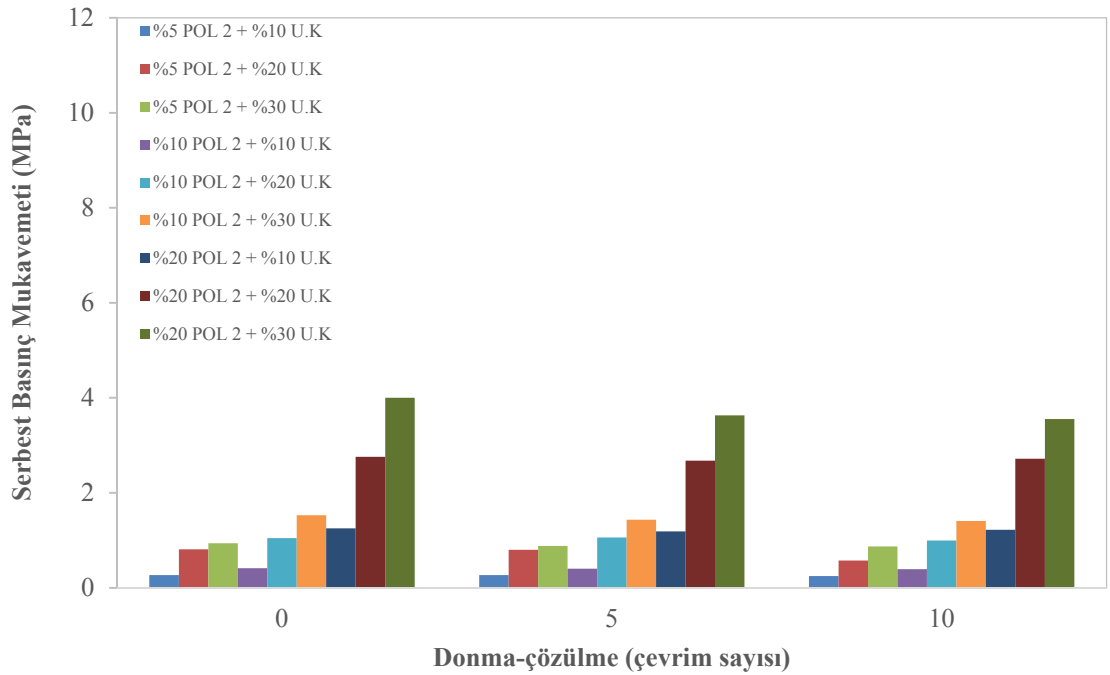


**Şekil 4.10.** 7 günlük POL 2 numunelerinin serbest basınç mukavemetine donma-çözülmenin etkisi

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de verilen 14 günlük numunelere ait sonuçlar incelendiğinde, %30 uçucu kül katkılı %20 POL 1 numunelerinin serbest basınç mukavemetleri donma-çözülmenin 5 ve 10 çevrimi sonrasında sırasıyla %5,72 ve %13,64 azalarak 9,97 MPa’dan 9,40 MPa ve 8,61 MPa’ya düşmüştür. %20 uçucu kül katkılı %20 polimer 1 numunelerini serbest basınç mukavemetleri ise donma-çözülmenin 5 ve 10 çevrimi sonrasında sırayla % 6,17 ve %13,1 azalarak 9,24 MPa’dan 8,67 MPa ve 8,03 MPa’ya düşmüştür. Yine benzer şekilde %20 POL 1 + %20 UK numunesi için 5 ve 10 donma-çözülme çevrimi sonucunda serbest basınç mukavemetleri sırayla % 0,79 ve % 8,16 azalarak 3,80 MPa’dan 3,77 MPa ve 3,49 MPa’ya gerilemiştir (Şekil 4.12).

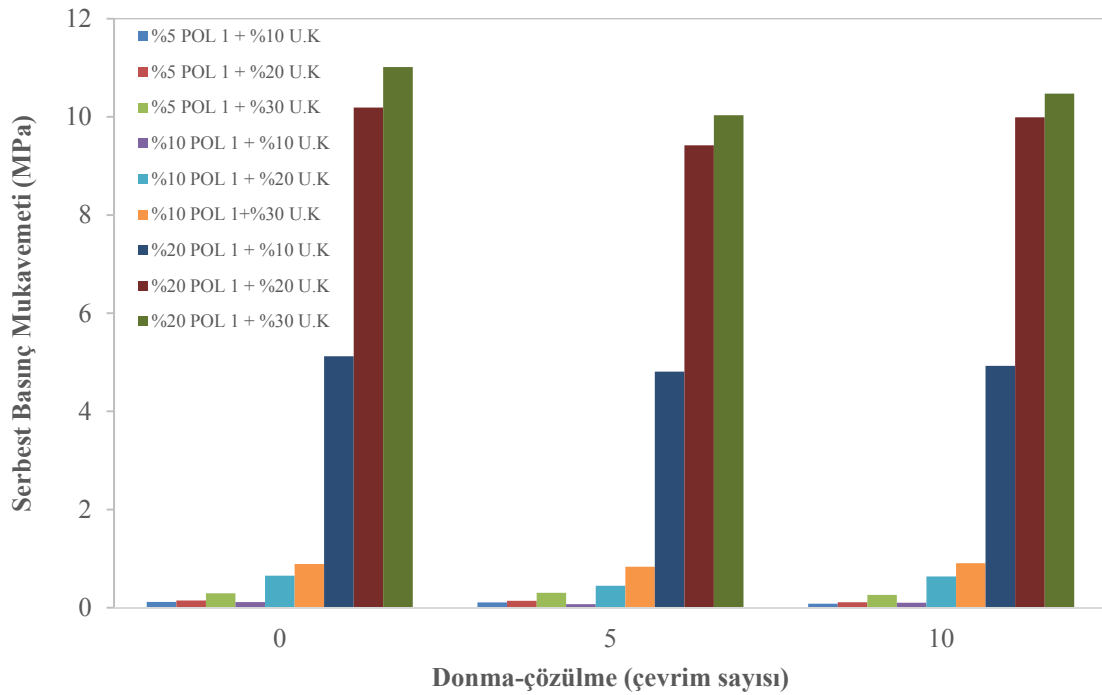


**Şekil 4.11.** 14 günlük POL 1 numunelerinin serbest basınç mukavemetine donma-çözülmenin etkisi



**Şekil 4.12.** 14 günlük POL 2 numunelerinin serbest basınç mukavemetine donma-çözülmenin etkisi

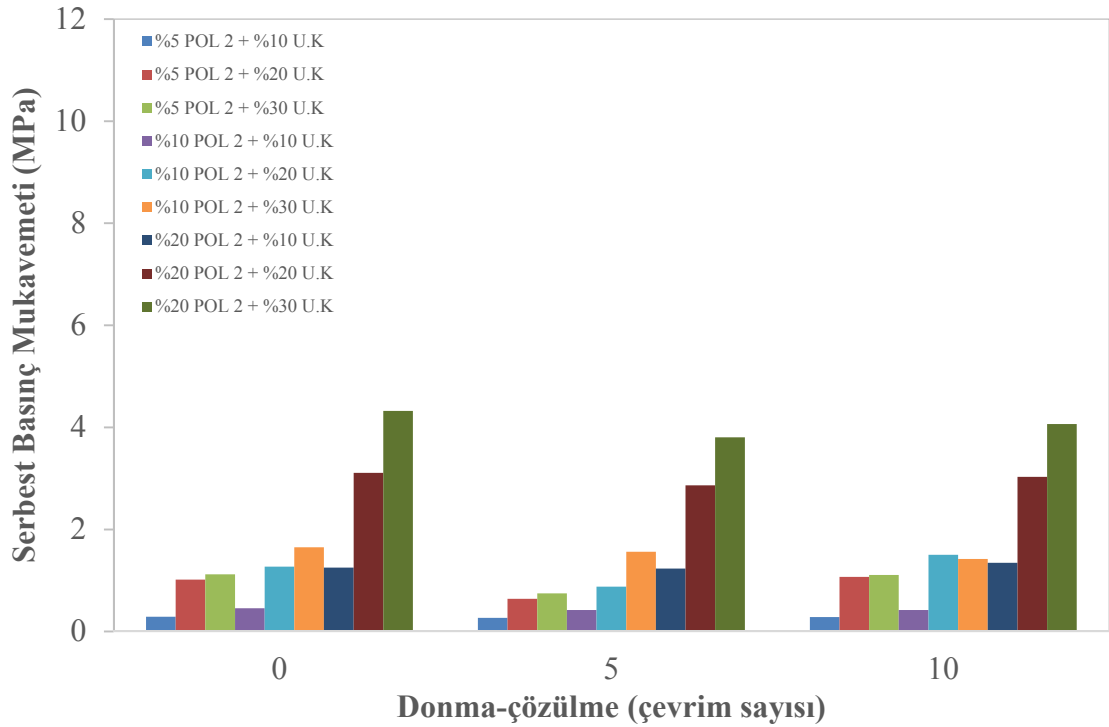
Çalışmada kullanılan polimer karışımları POL 1 ve POL 2 ile uçucu kül kullanarak iyileştirilmiş suya doymun kum numuneler 28 günlük küre tabi tutulduktan sonra 5 ve 10 çevrim donma-çözölmeye maruz bırakılmıştır. Numunelerin donma-çözölme sonrası serbest basınç mukavemetleri (28 günlük) Şekil 4.13 (POL 1) ve Şekil 4.14'te (POL 2) verilmiştir. Her iki şekilde incelendiğinde göröleceği gibi 7 ve 14 günlük sonuçlara benzer olarak donma-çözölme derin karıştırma ile iyileştirilmiş numuneler üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir. Çalışmada en yüksek dayanımı veren %20 POL 1 + %30 UK numunesinin serbest basınç mukavemeti donma-çözölmesinin 5 ve 10 çevrimi sonrasında sırayla %8,9 ve %5 azalarak 11,01 MPa'dan 10,03 MPa ve 10,47 MPa'a düşmüştür.



**Şekil 4.13.** 28 günlük POL 1 numunelerinin serbest basınç mukavemetine donma-çözölmenin etkisi

Şekil 4.13'de verilen 28 günlük numunelerin serbest basınç mukavemetleri incelendiğinde, %30 uçucu kül katkılı %20 POL 2 numunelerini serbest basınç mukavemetleri donma-çözölmenin 5 ve 10 çevrimi sonrasında sırasıyla %11,9 ve %6 azalarak 4,32 MPa'dan 3,81 MPa ve 4,07 MPa'a düşmüştür. %20 uçucu kül katkılı %20

POL 2 numunesinin serbest basınç mukavemetleri ise donma-çözülmenin 5 ve 10 çevrimi sonrasında sırasıyla %7,9 ve %3 azalarak 3,11 MPa'dan 2,86 MPa ve 3,03 MPa'a düşmüştür.



**Şekil 4.14.** 28 günlük POL 2 numunelerinin serbest basınç mukavemetine donma-çözülmenin etkisi

Bu sonuçlar dikkate alındığında tüm numunelerin kür süresi ve donma-çözülme çevrimlerinden kısmen etkilendiği söylenebilir. Ayrıca, 10 donma-çözülme çevrimine tabi tutulmuş 28 günlük %20 POL 1 ve %20 POL 2 numunelerinin yaklaşık 3-11 MPa aralığında serbest basınç mukavemeti değerleri vermesi derin karıştırma uygulanmış zeminler için beklenen değerlerin üzerindedir. Literatürde, derin karıştırma ile iyileştirmede beklenen serbest basınç mukavemetleri granüler zeminler için 0,5-5 MPa arasındadır (Bruce and Bruce 2003). Bu bağlamda; %20 POL 1-POL 2 ve %30-20 UK karışimli numunelerin donma-çözülme maruz suya doymuş gevşek kum zeminlerin derin karıştırma ile iyileştirmesinde kullanılabileceği söylenebilir.

## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, suya doygun gevşek kumun (%30 rölatif sıklıkta) derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmesinde polimerlerin (SACP ve PVA) ve biyopolimer (zantam gum) kullanılabilirliği araştırmak amacıyla serbest basınç mukavemeti ve donma-çözülme deneyleri yapılmıştır. Polimerler için en uygun oranlarının belirlenmesinden sonra polimer karışımları kum + su (suya doygun kum) toplam ağırlığının %5, %10 ve %20'si miktarlarında kullanılmıştır. Ayrıca, %0,25 oranda zantam gum ve %10, %20 ve %30 oranında C sınıfı uçucu kül deneylerde kullanılmıştır. Deneylerden elde olunan sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

Çalışmada kullanılan polimerler (SACP ve PVA) oranlarının belirlenbilmesi için yapılan ön deneyler sonucunda; %100 SACP (POL 1) ve %75 SACP + %25 PVA (POL 2) karışım oranlarının kullanılmasına karar verilmiştir. Yine polimer karışımlarının, biyopolimerin (zantam gum) ve uçucu külün hangi oranlarda kullanılacağını belirlemek için 68 farklı karışım oranında hazırlanan numunelerin 28 günlük serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan katkılarının yukarıda verilen oranlarda kullanılmasına karar verilmiştir. Bu oranlarda hazırlanan 18 seri numunenin 7,14 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetleri ile bu kür süresinde 5 ve 10 donma-çözülme çevrimi uygulanmış numunelerin serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir.

Polimer karışımlarının ve uçucu kül yüzdesinin artmasıyla serbest basınç mukavemetleri artmıştır. En yüksek serbest basınç mukavemetleri % 20 POL 1+%10 UK, % 20 POL 1+%20 UK, % 20 POL 1+%30 UK, % 20 POL 2+%20 UK ve % 20 POL 2+%30 UK numunelerinde elde edilmiştir. POL 1 polimeri, POL 2 polimerine göre yaklaşık 2,5 kat daha yüksek serbest basınç mukavemeti değerleri vermiştir.

Deneylelerden %20 POL 1 (%100 SACP) +%30 uçucu kül oranında hazırlanan numuneler en yüksek serbest basınç değerlerini vermiştir. Bu numunenin 7, 14 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetleri sırasıyla 5,58 MPa, 9,97 MPa ve 11,01 MPa olarak elde edilmiştir. 5 MPa ve üzeri serbest basınç mukavemetlerinin elde edilmesi derin karıştırma ile iyileştirmede beklenen değerlerin çok üzerindedir. Literatürde, derin karıştırma ile iyileştirmede beklenen serbest basınç mukavemetleri granüler zeminler için 0,5-5 MPa arasındadır (Bruce and Bruce 2003). Ayrıca diğer zemin iyileştirme yöntemleri (enjeksiyon, jet grout vb.) de düşünüldüğünde bu çalışma da kum için elde edilen serbest basınç mukavemetlerinin çok yüksek olduğu söylenebilir.

Kür süresinin numunelerin serbest basınç mukavemetleri üzerinde etkisi bazı numuneler haricinde önemsizdir ve yaklaşık %10 miktarında olmuştur. Kür süresinin etkili olduğu numunelerde ise 14 gün ile 28 gün arasında ki mukavemet artışı, 7 gün ile 14 gün arasındaki artışa kıyasla azalmıştır. Yine de 7 günlük kür süresi sonunda 5 MPa üzerinde serbest basınç mukavemetine ulaşılması sebebiyle %20 polimer katkısının kısa inşaat süresinin zorunlu olduğu alanlarda rahatlıkla derin karıştırma uygulamalarında kullanılabileceği söylenebilir.

Zeminlerin iyileştirilmesinde yüksek serbest basınç ve kayma mukavemetlerinin elde edilmesinin yanında durabilite diyebileceğimiz donma-çözülme ve diğer çevresel etkilere dayanklılıkta önem arz etmektedir. Bu çalışmada, SACP, PVA, uçucu kül ve biyopolimerler kullanılarak derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmiş suya doymuş gevşek kum numunelerde 11 MPa'la varan yüksek serbest basınç mukavemetleri elde edilmiştir. Bununla birlikte numuneler üzerinde uygulanan donma-çözülme neticesinde numunelerin yaklaşık %3-10 aralığında dayanım kaybına uğramışlardır. Numunelerin böyle düşük oranlarda donma-çözülmeden etkilenmesi sebebiyle bu tezde kullanılan katkıları ile yapılacak zemin iyileştirmelerinin soğuk iklimin hüküm sürdüğü ve donma-çözülme etkisinin yüksek olduğu yerlerde rahatlıkla kullanılabileceği söylenebilir.

%20 polimer içeriği yaklaşık olarak arazide yapılacak derin karıştırma iyileştirilmesinde 200 kg/m<sup>3</sup>'lük miktara denk gelmektedir. Bu oranda, çimentonun kullanıldığı

çalışmalarda önerilen 300-500 kg/m<sup>3</sup> miktarlardan dūřūktūr. Bu sebeple POL 1 ve POL 2 polimer karışımları derin karıştırma uygulanalarında imento ve kiree alternatif olarak kullanılabilceği sōylenbilir. Yine de çimentonun polimerlerden ucuz olması dikkate alınarak ayrıntılı bir maliyet analizinin de yapılması ileri çalışmalar için önerilmektedir.

Polimerlerin kumların iyileştirilmesinde kullanımında daha kesin yargılara varabilmek için farklı gradasyon ve rōlatif sıklıklarda kumlar ūzerinde deneyler tekrarlanmalı ve hidrolik iletkenlik gibi diğer geoteknik deneyler de yapılmalıdır. Ayrıca sōz konusu polimer ile suya doygun kum davranışını açıklayabilmek için bazı elektrokinetik (pH, EC, zeta potansiyeli, BET gibi) deneyler, XRD, SEM ve TGA analizlerinin yapılması önerilmektedir.



## KAYNAKLAR

- Ahmed, N.B., 1995. "Chemical stabilization of baiji sand dunes in Iraq. 1. Effect of some soil stabilizers on the infiltration rate of sand", Qatar University Sci. J., 15(1), 109-113.
- Ahnberg, H., 1996. "Stress depent parameters of cement and lime stabilized soils", Proc. 2<sup>nd</sup> International Conference on ground Improvement Geosystems-IS Tokya 96, Grouting and Deep Mixing, Tokyo 1996, Vol. 1, 387-392.
- 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.
- Aitcin, P.C., 1986, HighPerformanceConcrete, books.google.com.tr/books?isbn=0203475038.
- Ajorloo, A.M., 2010. "Characterization of the mechanical behavior of improved loose sand for application in soil-cement deep mixing", Doctoral Thesis, University of Lille, France.
- Altun, S., 2010. "Zemin iyileştirme yöntemleri, derin temeller ve uygulama örnekleri", Ege Üniversitesi, İnşaat mühendisleri odası İzmir şubesi.
- and macrostructure of soils", Proc., Int. Symp. on Frozen Soil Impacts of Agric.,
- Andromalos, K.B., Bahner, E.W., 2003. "The application of various deep mixing methods for excavation support systems", Grouting and Ground Treatment, ASCE, GSPNo. 120: 515-526.
- Anonim, 2008. "Kimya teknolojisi polimer kavramları ve özellikleri 1", MEGEP.
- Anonim, 2009. <http://www.kempro.com.tr/>.
- Anonim, 2012. <http://www.biyoplastik.net/2012/12/biyopolimerlere-giris-biyopolimer-nedir.html>
- Anonim, 2013. <http://polimer.nedir.com/#ixzz2U1LKNTha>.
- Anonymous, 2010a. <http://www.geofirmllc.com/images/services/deepapplication.jpg>.
- Anonymous, 2010b. <http://www.geofirmllc.com/groundimprovement.html>.
- Anonymous, 2010c. [http://www.groundimprovement.ch/Ground\\_Improvement\\_Solution\\_s/Deep\\_Soil\\_Mixing\\_files/DSM-Installation.jpg](http://www.groundimprovement.ch/Ground_Improvement_Solution_s/Deep_Soil_Mixing_files/DSM-Installation.jpg).
- Anonymous, 2010d. [http://www.groundimprovement.ch/Ground\\_Improvement\\_Solution\\_s/Deep\\_Soil\\_Mixing\\_files/DSM-QC1.gif](http://www.groundimprovement.ch/Ground_Improvement_Solution_s/Deep_Soil_Mixing_files/DSM-QC1.gif).
- Anonymous, 2010e. [http://www.groundimprovement.ch/Ground\\_Improvement\\_Solution\\_s/Deep\\_Soil\\_Mixing.html](http://www.groundimprovement.ch/Ground_Improvement_Solution_s/Deep_Soil_Mixing.html)
- Anonymous, 2010f. <http://www.geofirmllc.com/groundimprovement.html>.
- Anonymous, 2012a, [http://linkyimg.arvixedicated.com/thumbnails2012/201283/bf0776de-64da-4525-ae27-5c10246a9f18\\_thumb\\_BR\\_40.jpg](http://linkyimg.arvixedicated.com/thumbnails2012/201283/bf0776de-64da-4525-ae27-5c10246a9f18_thumb_BR_40.jpg).
- Aoi, M., 2002. Execution procedure of Japanese dry method (DJM). Proc. Tokyo Workshop 2002 on Deep. Mixing, Tokyo, 91-101.

- Asghari, E. , Toll D. G., Haeri, S.M., 2003. “Triaxial Behavior of a Cemented Gravely Sand, Tehran Alluvium”, *Geotechnical and Geological Engineering* 21: 1–28, 2003. # 2003 KluwerAcademic Publishers. Printed in the Netherlands.
- ASTM C 618, 1991. <http://www.astm.org/Standards/C618.htm>.
- ASTM C 618, 2000. <http://www.astm.org/Standards/C618.htm>.
- Ayan, E., 2009. “Derin zemin iyileştirme yöntemleri ve uygulamadan örnekler”, Y.Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Bahner, E. W., Naguib, A.M., 2000. “Ground improvement for large above ground petroleum”
- Bishop, R.T., Mcalpin, B.A., Jones, D., 1998. “Stabilisation of earth roads with water-based polymer emulsions” *Proc S Afr Sug Technol Ass* (1998) 72:309-315.
- 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.
- Çakir, M., 1999, “Uçucu Kül ile Zemin Stabilizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- CDM Association, 2002. CDM-Cement Deep Mixing Bulletin as of 2002.
- Chamberlain E.J., Iskander I., Hunsiker S.E., “Effect of freeze-thaw on the permeability
- Çokça, E., Toktaş, F., 2002, “Dispersif Bir Kilin C Tipi Uçucu Kül ile Stabilizasyonu” *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi*, Sh:659 – 668, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Day, S., Sales, T., Camp, N., November 2004 to February 2005, <http://www.geosolutions.com/case-studies/soil-mixing/zvi-clay-soilmixing.php>.
- Dias, D.R., Camarini, G., Miguel, M.G., 2012. “Preliminary laboratory tests to study the increase of strength in samples of soft soils with cement, for treatments using Dry-Mix System”, *Grouting and Deep Mixing 2012*, *Geotechnical Special Publication (GSP) No. 228*.
- DJM Association, 2002. DJM-Dry Jet Mixing Method Bulletin as of 2002.
- Doğan, M., Kıralp, S., Özkoç, G., Erdoğan, S., Çamurlu, P., Baydemir, T., 2006, “Plastikler” , Odtü Yayıncılık, 125 Sayfa.
- Durmuşoğlu, E., Çorapçıoğlu, M.Y., “Experimental study of horizontal barrier formation by colloidal silica”, *Journal of Environmental Engineering*, 126: 833-841 (2000).
- Ferreira, C., Ribeiro, A., Ottosen, L., 2003, “Possible Applications For Municipal Solid Waste Fly Ash”, *Volume 96, Issues 2–3, Pages 201–216*.
- Gupta, S.C., Hooda, K.S., Mathur, N.K., Gupta, S., 2009. “Tailoring of Guar gum for desert sand
- Hartlen, J., Holm, G. 1995. “Deep Stabilization of Soft Soils With Lime-Cement Columns” *Proceedings of Bellgt B. Broms Symposium on Geotechnical Engineering*, Singapore, Japan, 173 -179.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., Nagaraj, T.S., 2005. “CLay–Water/Cement Ratio Identity for Cement Admixed Soft CLays”, *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, 2, 187-192.
- Hui, L.C., 2006. “Centrifuge modelling of wet deep mixing processes in soft clays”, Doctor of philosophy. Department of civil engineering national university of singapore.

- Jacobson, J., 2002. "Factors affecting strength gain in lime-cement columns and development of a laboratory testing procedure", Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and state University.
- Kaniraj, S.R. and Havanagi, V.G., 1999. "Compressive Strength of Cement Stabilized Fly Ash-Soil Mixtures, Cement and Concrete Research" 29,673–677.
- Karol, R., "Chemical Grouting and Soil Stabilization", *Marcel Decker Inc*, New York, 135-140,145-163,166-239 2003.
- Kaya, F., 2004. Ana Hatları ile Yapıştırıcılar. Birsen Yayınevi, 318 sayfa.
- Lewesley, G., 2006. "On the strength of saturated cement-treated soil reconstituted by wet-mixing", Master Thesis, University of British Columbia.
- Lorenzo, G.A., Bergado D.T., 2004. "Fundamental parameters of cement admixed CLay – New approach", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130 (10), 1-9.
- 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*.
- Maher, A., Douglas, W.S., Yang, D., Jafari, F., Schaefer, V.R., 2007. "Cement Deep Soil Mixing (CDSM) for Solidification of Soft Estuarine Sediments", *Marine Georesources and Geotechnology*, 25, 221–235.
- Matsuoka, N., Murton, J., 2008. "Frost weathering: recent advances and future directions". *Permafrost Periglac. Process.* 19: 195–210. doi:10.1002/ppp.620
- Miura, N., Horpibulsuk, S., Nagaraj, T.S. 2002. "Engineering behavior of cement stabilized CLay at high water content", *Soils and Foundations*, Vol.41, (5), 33-45.
- Moseley, M.P., Kirsch, K., 2003. "Ground improvement", *British Library Cataloguing in Publication British Library*, ISBN 0-203-50254-X Master e-book ISBN, 431.
- Naeini, S.A., Ghorbanalizadeh, M., 2010. "Effect of wet and dry conditions on strength of silty sand soils stabilized with epoxy resin polymer", *Journal of Applied Sciences* 10(22), 2839-2846.
- Newman, K., Tingle, J.S., 2004. "Emulsion polymers for soil stabilization", 2004 FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference, Atlantic City, New Jersey, USA.
- Öksüz, K., 2006. "Afşin–elbistan termik santrali uçucu külünün zemin Stabilizasyonunda kullanımı", *Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana*.
- Okumura, T., Terashi M., 1975. "Deep-Lime-Mixing Method of Stabilization for Marine CLays", *Proceedings of the 5th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation*
- Özaydın, K., 1997, "Zemin Mekaniği", Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Özaydın, K., 2000. *Zemin Mekaniği*. Birsen Yayınevi Ltd. Şti., İstanbul, 261s.
- Özgan, E., Ertürk, S., Serin, S., 2012. "Donma ve çözülmenin kohezyonlu zeminlerin fiziksel özelliklerine etkisinin incelenmesi", *Düzce Üniversitesi, İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi Cilt 1, No 1, 7-16, 2012. Türkiye*.

- Pathivada, S.P., 2005. "Effects of water-cement ratio on deep mixing treated expansive Clay characteristics", Maste Thesis, The Univercity Of Texas At Arlington.
- Porbaha, A., 1998. State of the Art in Deep Mixing Technology: Basic Concepts. Ground Improvement, 2(2), 81–92. Range, and Forest Lands, Spokane, Wash., 1990; 145-155. Range, and Forest Lands, Spokane, Wash., 1990; 145-155.
- Ratherford, C.J., 2004. "Design manual for excavation support using deep mixing technology", Master Thesis, Texas A&M University.
- Roustaei, M., Ghazavi, M., 2011. "Strength Characteristics of Clay Mixtures with Waste Materials in Freeze-Thaw Cycles", Journal of Structural Engineering and Geotechnics, 1 (1), 1-5, Spring 2011.
- Saçak M., 2005, "Polimer Teknolojisi", Baran Ofset, Ankara.
- Santoni, R.L., Tingle, J.S., and Webster, SL, 2003. "Stabilization of Silty Sand with Nontraditional Additives", Transportation Research Record 1787, TRB, National Research Council, Washington, DC, 33-41.
- Sargent, P., Hughes, P.N., Rouainia, M., White, M.L., 2012. "The Use Of Alkali Activated Waste Binders İn Enhancing The Mechanical Properties And Durability Of Soft Alluvial Soils", School of Civil Engineering and Geosciences, Drummond Building, Newcastle University, Newcastle upon Tyne, Tyne and Wear, NE1 7RU, UK.
- Şengör, M.Y., 2011. "The Deformation Characteristics of Deep Mixed Columns in Soft Clayey Soils: A Model Study", Doctoral Thesis, METU, Turkey.
- Sevim, U.K., 2003, "Afşin – Elbistan Uçucu Külünün Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanılabilirliğinin Çimento Hamuru ve Harçlarının Üzerinde Yapılacak Deneylerle Araştırılması", Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Shrestha, R., 2008. "Soil Mixing: A Study on 'Brusselian Sand' Mixed with Slag Cement Binder", Master Dissertation, University of Ghent, University of Brussle.
- Shrestha, R., Al-Tabbaa, A., 2012. "Development of predictive models for cement stabilized soils", Department of Engineering, University of Cambridge. UK.
- Sukontasukkul, P., and Jamsawang, P., 2011. "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.
- 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.
- Terashi M. 2002. "Long-Term Strength Gain vs. Deterioration Of Soils Treated By Lime And Cement. Proc. Tokyo Workshop 2002 On Deep Mixing", Tokyo, 39-57.
- Terashi M., Tanka, H., 1981. "Ground Improvement by Deep Mixing Method", Proceedings of the Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden, 3, 777- 780.
- Terashi, M. 2009. Keynote lecture: Current practice and future perspective of QA/QC for Deep-Mixed ground, Okinawa Deep Mixing Symposium 2009.
- TS 639, 1975, "Portland Çimento Klinkerine ve Portland Çimento Betonuna Karıştırılacak Uçucu Küller", Ankara.

- Tsytoich, N., 1975. The mechanics of frozen ground. Scripta Book Co. pp. 78–79. ISBN 978-0-07-065410-5.
- 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.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A., 2009. ” Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması Ve Özellikleri”. Ankara.
- Yang, D.S., 1997. “Chapter 2.5: Deep Mixing” In Situ Ground Improvement, Reinforcement and Treatment: A Twenty Year Update and a Vision for the 21st Century, Ground Reinforcement Committee, American Society of Civil Engineers, Geo-Institute Conference, Logan, UT, July 16-17. pp. 130-150.
- Yıldız, S., 2006. “Kolloidal silika enjeksiyonlu ince-orta boyut dağılımına sahip kumun statik ve dinamik yükler altında davranışı”, Y.Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.

## ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Urumiye (İRAN) şehrinde doğdu. İlkokul, ortaokul ve liseği Urmiye’de okudu. 2001 yılında Azad e Urumiye Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümüne başladı ve Üniversiteden 2005 yılında mezun oldu. 2011 yılında Erzurum Atatürk Üniversitesinin Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans öğrenimine başladı.