

**KİLLERİN DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİ
İLE İYİLEŞTİRİLMESİNDE DOYMAMIŞ
POLYESTERİN KULLANILABİLİRLİĞİ**

Majid BAGHERINIA

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Yrd. Doç. Dr. Seracettin ARASAN
2013**

Her Hakkı Saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KİLLERİN DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİ İLE
İYİLEŞTİRİLMESİNDE DOYMAMIŞ POLYESTERİN
KULLANILABİLİRLİĞİ**

Majid BAGHERINIA

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ERZURUM
2013**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

KİLLERİN DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİ İLE İYİLEŞTİRİLMESİNDE
DOYMAMIŞ POLYESTERİN KULLANILABİLİRLİĞİ

Yrd. Doç. Dr. Seracettin ARASAN danışmanlığında, Majid BAGHERINIA tarafından hazırlanan bu çalışma 03/10/2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak ~~oybirliği/oy çokluğu~~ (.../...) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Şahin ZAIMOĞLU

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Seracettin ARASAN

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hayrettin EROĞLU

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

KİLLERİN DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİ İLE İYİLEŞTİRİLMESİNDE DOYMAMIŞ POLYESTERİN KULLANILABİLİRLİĞİ

Majid BAGHERINIA

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, kil zeminlerin derin karıştırma yöntemi ile iyileştirmesinde polimerlerin kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla laboratuarda (düşük plastisiteli, CL ve yüksek plastisiteli, CH) iki farklı kil zemin üzerinde serbest basınç mukavemeti ve donma-çözülme deneyleri yapılmıştır. Polimer olarak, doymamış polyester toplam ağırlığın %5, %10 ve %20'si miktarlarında kullanılmıştır. Ayrıca, farklı yüzdelerde biyopolimer ve %3 kireç deneylerde kullanılmıştır. Yapılan laboratuvar deney sonuçlarından polyester yüzdesinin artmasıyla CL kilinin serbest basınç mukavemetinin arttığı, CH kilinin serbest basınç mukavemetinin ise azaldığı belirlenmiştir. Kür süresinin artması ile her iki kilin serbest basınç mukavemetlerinde önemli değişiklikler olmamıştır.

2013, 76 sayfa

Anahtar Kelimeler: Kil, derin karıştırma, doymamış polyester, serbest basınç mukavemeti, donma-çözülme.

ABSTRACT

MS Thesis

UTILIZATION OF UNSATURATED POLYESTER IN IMPROVEMENT OF THE CLAYS WITH DEEP MIXING

Majid BAGHERINIA

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 clays with deep mixing method was investigated. For this purpose, unconfined compression strength test and freezing-thawing tests were performed on two clays (low plasticity clay-CL and high plasticity clay-CH) at laboratory. Unsaturated polyester was used at percentage of 5%, 10% ve 20% of total mass. Additionally, the different percentages of biopolymer and %3 lime were used. The laboratory test results showed that the unconfined compressive strength of CL clay increased and CH clay decreased with increasing polyester ratio. Furthermore, there were not observed any significantly change on unconfined compression strength with increasing curing time for both two clays.

2013, 76 pages

Keywords: Clay, deep mixing, unsaturated polyester, 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.

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.

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.

Majid BAGHERINIA

Eylül 2013

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç ve Kapsam.....	2
1.2. Kaynak Özetleri.....	3
2. KURAMSAL TEMELLER.....	11
2.1. Killer.....	11
2.2. Derin Karıştırma Yöntemi.....	15
2.3. Derin Karıştırma Yönteminde Kullanılan Bağlayıcılar.....	21
2.4. İyileştirilmiş Zeminlerin Donma-Çözülme Davranışı.....	23
2.5. Termoset Yapıştırıcılar ve Doymamış Polyester.....	24
2.6. Biyopolimerler.....	27
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	31
3.1. Materyal.....	31
3.1.1. Kil numuneler.....	31
3.1.2. Doymamış polyester.....	32
3.1.2. Biyopolimerler.....	33
3.2. Yöntem.....	34
3.2.1. Polyester numunelerinin elde edilmesi.....	34
3.2.2. Derin karıştırma uygulanmış kil numunelerin hazırlanması.....	36
3.2.3. Serbest basınç mukavemeti deneyleri.....	40
3.2.4. Donma-çözülme deneyleri.....	41
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	42
4.1. Polyester Numunelerinin Serbest Basınç Mukavemetleri.....	42
4.2. Kil-Polyester Numunelerinin Serbest Basınç Mukavemetleri.....	45

4.3. Kil-Polyester-Biyopolimer Numunelerinin Serbest Basınç Mukavemetleri.....	52
4.4. Kil-Polyester-Biyopolimer-Kireç (PBK) Numunelerinin Serbest Basınç Mukavemetleri.....	57
4.5. CL Kili-Polyester-Biyopolimer-Kireç (PBK) Numunelerinin Serbest Basınç Mukavemetlerine Kür Süresinin Etkisi.....	59
4.6. CL Kili-Polyester-Biyopolimer-Kireç (PBK) Numunelerinin Donma-Çözülme davranışı	60
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	66
Ekler	71
ÖZGEÇMİŞ	77

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A°	Angstrom (1 angstrom= 1.0×10^{-10} metre)
c	Kohezyon
CDM	Derin Islak Karıştırma
CH	CH Kili
CH	Yüksek Plastisiteli Kil
CL	CL Kili
CL	Düşük Plastisiteli Kil
CL-PBK	CL Kili-Polyester-Biyopolimer-Kireç
CMC	Kontrol Modüllü Kolonlar (Controlled Modulus Columns)
$C_{w, opt}$	Kil Su Oranının Optimum Hali
DCM	Derin Çimento Karışımı
DJE	Kuru Jet Karıştırma (burgunun boyunda)
DJM	Kuru Jet Karıştırma
DJS	Kuru Jet Karıştırma (burgunun ucunda)
DRS	Kuru Rotary Karıştırma (burgunun ucunda)
FHWA	Federal Karayolları İdaresi
GG	Guar Gum
H	Hızlandırıcı
H/S	Hızlandırıcı/Sertleştirici
KG	Keçiboynuzu Gum
qu	Serbest Basınç Mukavemeti
S	Sertleştirici
UCS	Serbest Basınç Mukavemeti
W/C	Su/Çimento Oranı
WJS	Islak Jet Karıştırma (burgunun ucunda)
W_L	Likit Limit
W_{opt}	Optimum Su Muhtevası
W_P	Plastik Limit

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Karışımların kür süresine bağlı olarak serbest basınç mukavemetleri (Şengör 2011)	8
Şekil 1.2. Turba ve kil örneklerde su-çimento oranının kayma mukavemetine etkisi (Pakbaz and Alipour 2012)	9
Şekil 2.1. Nano boyuttaki Kaolinit (Mitchell 1993)	13
Şekil 2.2. Nano boyutta halloysit (Mitchell 1993).....	13
Şekil 2.3. Nano boyutta illit (Mitchell 1993).....	14
Şekil 2.4. Nano boyutta montmorillonit (Mitchell 1993).....	14
Şekil 2.5. Zemin iyileştirmesinde farklı yöntemler (Altun 2010).....	15
Şekil 2.6. Derin Karıştırma Yönteminin farklı uygulama şekilleri (Anonymous 2012).16	
Şekil 2.7. Derin karıştırma uygulama şekilleri (Yang 1997).....	16
Şekil 2.8. Derin karıştırmada önerilen farklı yöntemler (Porbaha 1998).	18
Şekil 2.9. Derin ıslak karıştırma (Denizde)	20
Şekil 2.10. Derin ısalak karıştırma (Arazide).....	20
Şekil 2.11. Derin kuru karıştırma	21
Şekil 2.12. Kireç içeriğinin çeşitli zeminlerdeki etkisi (Tunç 2002).....	23
Şekil 2.13. Aynı kireç içeriğindeki farklı zemin cinslerinin zamana bağlı mukavemet artışı (Tunç 2002)	23
Şekil 2.14. Guar gumın kimyasal formülü (Anonim 2013c)	28
Şekil 2.15. Toz formunda guar gum (Anonim 2013c).....	28
Şekil 2.16. Keçiboynuzu gum tozu (Anonim 2013c)	30
Şekil 3.1. Deneyleerde kullanılan killere ait dane dağılım eğrileri.....	31
Şekil 3.2. Doymamış polyester, polyester hızlandırıcısı ve sertleştiricisi.....	33
Şekil 3.3. Deneyleerde kullanılan biyopolimerler	34
Şekil 3.4. Alüminyum folyo kapta hazırlanmış polyester karışımı	35
Şekil 3.5. Farklı renklerde hazırlanmış polyester numuneleri	35
Şekil 3.6. Polyester numunelerinin görüntüleri	35
Şekil 3.7. CL kili numunelerinin hazırlanması	36
Şekil 3.8. CL kili-polyester karışımları	37

Şekil 3.9. CH Kili-polyester karışımının hazırlanması	37
Şekil 3.10. CH kili-polyester numunesinin kalıba konulması ve kalıptan çıkarılmış hali	37
Şekil 3.11. CL ve CH killerinin kapalı olarak hazırlanması.....	38
Şekil 3.12. 7 günlük kapalı olarak bekletilen numunelerin kontrolü.....	38
Şekil 3.13. Biyopolimer katkılı CL ve CH killerinin polyester deneylerinin kür odasında bekletilmesi.....	39
Şekil 3.14. Kür odasında bekletilen keçi boynuzu gum katkılı CL ve CH kili-polyester numuneleri.....	39
Şekil 3.15. Kür odasında bekletilen biyopolimer ve kireç katkılı CL ve CH kili-polyester numuneleri	40
Şekil 3.16. Serbest basınç mukavemeti deneylerinde kullanılan cihazlar	40
Şekil 3.17. Donma-çözülme cihazında bekletilen alüminyum folyo içerisindeki numuneler	41
Şekil 3.18. Donma-çözülme cihazı	41
Şekil 4.1. Hızlandırıcı yüzdesinin serbest basınç mukavemetine etkisi	43
Şekil 4.2. Polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetine hızlandırıcı ve sertleştiricinin farklı yüzdelere etkisi	44
Şekil 4.3. Farklı hızlandırıcı ve sertleştirici yüzdesinde hazırlanan polyester numuneleri.....	44
Şekil 4.4. Su içerisinde hazırlanan polyester numunesi.....	45
Şekil 4.5. Polyester numunesinin su içinde ve su olmadan serbest basınç mukavemeti.....	45
Şekil 4.6. %50 su muhtevası ve %10 polyester oranında CL kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetine H/S oranının etkisi	46
Şekil 4.7. %40 Su muhtevası ve %10 polyester oranında CL kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetine H/S oranının etkisi	47
Şekil 4.8. Polyester oranının farklı su muhtevalarında CL kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisi	47
Şekil 4.9. CL kili-polyester numunelerinin kırılması	48
Şekil 4.10. %50 Su muhtevası ve %10 polyester oranında CH kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetine H/S oranının etkisi	49

Şekil 4.11. %90 Su muhtevası ve %10 polyester oranında CH kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetine H/S oranının etkisi	49
Şekil 4.12. Polyester oranının farklı su muhtevalarında CH kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisi	50
Şekil 4.13. CH kili-polyester numunelerinin kırılması	50
Şekil 4.14. Polyester oranının kapalı ve açıkta bekletilen CL kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisi	51
Şekil 4.15. Polyester oranının kapalı ve açıkta bekletilen CH kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisi	52
Şekil 4.16. Kapalı halde bekletilen numunelerin kırılması	52
Şekil 4.17. Polyester oranının CL kili-polyester-GG numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisi	53
Şekil 4.18. GG oranının CL kili-polyester-biyopolimer numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisi	54
Şekil 4.19. CL kili-polyester-biyopolimer numunesinin kırılması	54
Şekil 4.20. Polyester oranının CH kili-polyester-biyopolimer numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisi	55
Şekil 4.21. GG oranının CH kili-polyester-biyopolimer numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisi	55
Şekil 4.22. CH kili-polyester-biyopolimer numunesinin kırılması.....	56
Şekil 4.23. GG ile KG oranının CL kili-polyester-biyopolimer numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisi	56
Şekil 4.24. GG ile KG oranının CH kili-polyester-biyopolimer numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisi	57
Şekil 4.25. Polyester oranının GG ve kireç katkılı CL kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisi	58
Şekil 4.26. Polyester oranının GG ve kireç katkılı CH kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisi	58
Şekil 4.27. 14 ve 28 günlük CL Kili-PBK numunelerinin serbest basınç mukavemetine polyester oranının etkisi	60
Şekil 4.28. 14 günlük CL Kili-PBK numunelerinin serbest basınç mukavemetine donma-çözülmenin etkisi	61

Şekil 4.29. 28 günlük CL Kili-PBK numunelerinin serbest basınç mukavemetine donma-çözülmenin etkisi62

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmiş zeminin mühendislik özellikleri	
.3	
Çizelge 2.1. Kil minerallerinin kimyasal bileşimi (ağırlığa göre) (Scheffer-Schachtschabel 1970)	13
Çizelge 2.2. Gıda sektöründe kullanılan guar gumun işlevi (Anonim2013)	29
Çizelge 2.3. Guar gumun diğer sektörlerde kullanılabilirliği (Anonim 2013)	29
Çizelge 3.1. Deneyleerde kullanılan CL ve CH kilinin özellikleri	32
Çizelge 3.2. Doymamış polyester, hızlandırıcı ve sertleştiriciye ait özellikler	33
Çizelge 4.1. Farklı hızlandırıcı ve sertleştirici oranlarında hazırlanan polyester numuneleri	42

1. GİRİŞ

Derin karıştırma yöntemi zeminlerin iyileştirme yöntemlerinden birisidir. Bu yöntemde bağlayıcı madde olarak kireç veya çimento arazide içi boş burgu ekipmanı ile zeminle karıştırılıp kolonların oluşturulmasıyla iyileştirme sağlanır. Bu yöntem ilk olarak 1954 yılında ABD’li Prepakt 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 (1970) 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 Tanaka 1981; Hartlen and Holm 1995; Ahnberg 1996; Porbaha *et al.* 1998; 2000; 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; Maher *et al.* 2007; Lewsley 2008; 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.

Derin karıştırmada çimentoya alternatif katkıların kullanılabilirliği konusunda literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır (Ahnberg and Holm 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 kullanımını her geçen gün artan çağımızın malzemeleridir. Polimerlerin zemin iyileştirilmesinde kullanımı ise halen araştırılan bir konudur. Literatürde polimerler kullanılarak yapılan zemin iyileştirme çalışmaları; kimyasal enjeksiyon (Persoff *et al.* 1999; Durmuşoğlu and 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:

- Düşük ve yüksek plastisiteli killerin derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmesinde polimerlerin (doymamış polyester ve biyopolimer) kullanılabilirliğini araştırmak.
- Polimerlerle derin karıştırma uygulanmış killerin serbest basınç mukavemetine kür süresi ve şeklinin etkisini araştırmak.
- Polimerlerle derin karıştırma uygulanmış killerin donma-çözülme davranışını araştırmak.

Çalışma kapsamında Kurşunlu-Çorum'dan temin edilen düşük plastisiteli kaolinit kili (CL) ile Aşkale-Erzurum'dan temin edilen yüksek plastisiteli smektit kili (CH) kullanılmıştır. Killer öğütüldükten sonra 0,5 mm çaplı elekten elenerek kullanılmıştır. Arazi şartlarında suya doymun kil zemin özelliklerini deneylerde uygulayabilmek için killer likit limit kıvamında hazırlanmış daha sonra katkılarla derin karıştırma yöntemine uygun olarak laboratuarda karıştırılmıştır. Polimer olarak %5, %10 ve %20 oranlarında doymamış polyester ve %1, %0.5, %0.25, %0.15, %0.05 ve %0.02 oranlarında biyopolimer (Guar gum (GG) ve Keçiboynuzu gum (KG)) ve %3 kireç kullanılmıştır. 14 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetleri belirlenen numunelerin ayrıca her iki 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 kil-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 sertleştiren maddenin özellikleri, zemin özellikleri ve koşulları (özellikle kil zeminlerin), 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

Serbest basınç mukavemeti (U.C.S)	0.2-5 MPa (granüler zeminde 0.5-5 MPa) (kohezyonlu zeminde(c) 0.2-2MPa)
K	$10^{-6} - 10^{-9}$ m/s (bentonit kullanıldığında bu değer düşük olur)
E	Laboratuar numuneleri için serbest basınç deneyi 350 ile 1000 kat Arazi numuneleri için serbest basınç deneyi 150 ile 500 kat.
Kayma mukavemeti	Serbest basınç mukavemetinin %40-%50’si kadar eğer UCS < 1MPa,
Çekme mukavemeti	Genellikle serbest basınç mukavemetinin %8-%14’si kadar
28 günlük serbest basınç mukavemeti	Siltler ve killer için 7 günlük dayanımın 1.4 ile 1.5 kat ve kumlar için 7 günlük dayanımın 2 kat.
60 günlük serbest basınç mukavemeti	28 günlük serbest basınç mukavemetinin 1.5 kat,

Siva (2005) plastisite indisi orta ve yüksek olan killer üzerinde yaptığı laboratuvar çalışması sonucunda, derin karıştırma tekniğini, büzülme ve şişme potansiyeline sahip zeminler için önermiştir. Bu çalışmada, bağlayıcı madde olarak kullanılan çimento ve kireç farklı oranlarda kullanılmıştır. Bağlayıcı dozajı ve karışımı (kireç/çimento) sırasıyla 100 ile 200 kg/m³ ve 100-0 ile 0-100 aralığında değişmiştir. Numunelere %100 nem odasında 7 ve 14 günlük kür sürelerinde serbest basınç mukavemeti, büzülme, şişme ve emme deneyleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda, en etkili su/çimento oranlarını (w/c) 0,8 ve 1,3 olduğunu bulunmuştur.

Bergado and Lorenzo (2005) yaptıkları çalışmada, serbest basınç mukavemeti ve ödometre deneyleri sonuçlarından kil-su karışımının optimum (C_w, opt) halinde, derin karıştırma yöntemi ile çimento ve kilin ekonomik ve etkili karışımını bulmayı amaçlamışlardır. Çalışmada kil-su oranının optimum karışımı, kilin likit limitine yakın olduğunu bulmuşlardır. Kil-su oranının optimum karışımında çimento oranı ağırlık olarak sadece %10 olmuştur. Hâlbuki konvensiyonel yöntemde bu değer %17 olmuştur. Sonuçta çimentonun maliyetinin optimum karışım yöntemiyle %40 azaldığını belirtmişlerdir.

Ahnberg (2006) yaptığı laboratuvar çalışmasında, iki tür kil ve iki tür organik zemin üzerinde derin karıştırma yöntemini kullanarak araştırma yapmıştır. Bağlayıcı maddeler çimento, kireç, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül farklı oranlarda, tek başına veya farklı karışımlarda kullanılmıştır. Çalışmada mukavemet özelliklerinin yanında birim hacim ağırlık, su muhtevası, doyunluk derecesi, permeabilite ve kompaksiyon özellikleride belirlenmiştir. Numunelerin mukavemet özelliklerinin belirlenmesinde tek eksenli ve üç eksenli basınç mukavemeti deneyleri yapılmıştır. Ayrıca, kür süresinin iyileştirmede kullanılan farklı bağlayıcılara etkisi araştırılmıştır.

Lorenzo and Bergado (2006) yaptıkları çalışmada, yüksek su muhtevasındaki kilin kireç kullanılarak sıkışabilirliği ve dayanımının derin karıştırma yönteminden nasıl etkilendiğini araştırmışlardır. Kür süresi boyunca, çimento içeriği ve kil-su-çimento karışımındaki kil içeriğinin dayanım ve sıkışabilirlik üzerinde önemli derecede etkisinin

olduğunu belirlemişlerdir. En uygun iyileştirmeyi sağlamak için, toplam kil-su içeriğinin belirli bir çimento karışımı ile seçimi önerilmiştir. Serbest basınç ve drenajsız konsolide deneylerinin sonuçlarından, boşluk oranı, kil-su içeriği, çimento içeriği ve kür süresinin numunelerin mukavemetinde etkili oldukları ifade edilmiştir.

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 etkisi serbest basınç mukavemeti deneyleri ile araştırılmıştır. Toplam su-çimento oranının azalmasıyla, dayanımın doğrusal olmayan bir şekilde arttığı ve kum-silt oranından bağımsız olduğu sonucuna varılmıştır.

Shrestha (2008), kum zemin üzerinde Portland çimentosu klinkeri ile yüksek fırın cürufunun bağlayıcı madde olarak kullanıldığı bir çalışma yapmıştır. Bağlayıcı miktarı 200 kg/m^3 , 300 kg/m^3 , 400 kg/m^3 , 500 kg/m^3 , 600 kg/m^3 ve 700 kg/m^3 olarak kum zemini ile laboratuarda kolonlar üretilerek deneyler yapılmıştır. Ayrıca toplam su muhtevasının dayanıma etkisini de incelemiştir. 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 arttığı belirlenmiştir. Serbest basınç mukavemeti deneyinden elde edilen en yüksek değer, bağlayıcının 600 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 ve jet grout 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 laboratuarda, 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 laboratuarda 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, gevşek silisli kumun kayma mukavemetini iyileştirmek için laboratuarda derin çimento karıştırma yöntemi kullanarak iyileştirme yapmıştır. Portland çimentosunu tek başına veya kireç ve silis dumanı kombinasyonları ile bağlayıcı madde olarak kullanmıştır. Çimentolaşmanın etkisi, serbest basınç mukavemeti, çekme dayanımı, kesme kutusu ve drenajlı üç eksenli basınç deneyleri ile 180 günlük numuneler üzerinde araştırmıştır. Sonuçlar, çimentolu kumun gerilme-deformasyonunun doğrusal olmadığı sonucunu vermiştir. Çimento oranı arttığında zeminin rijitliği ve dayanımı da artmıştır.

Sukontasukkul and Jamsawang (2011) yaptıkları çalışmada, derin çimento karıştırma yöntemi ile hazırlanan numunelerin eğilme performansını iyileştirmek amacıyla çelik ve polipropilen liflerinin etkisini araştırmışlardır. Derin çimento karışımlarında, %10-%20 çimento oranı kullanıldığında aynen sert çimento gibi davrandığını belirtmişlerdir (iyi

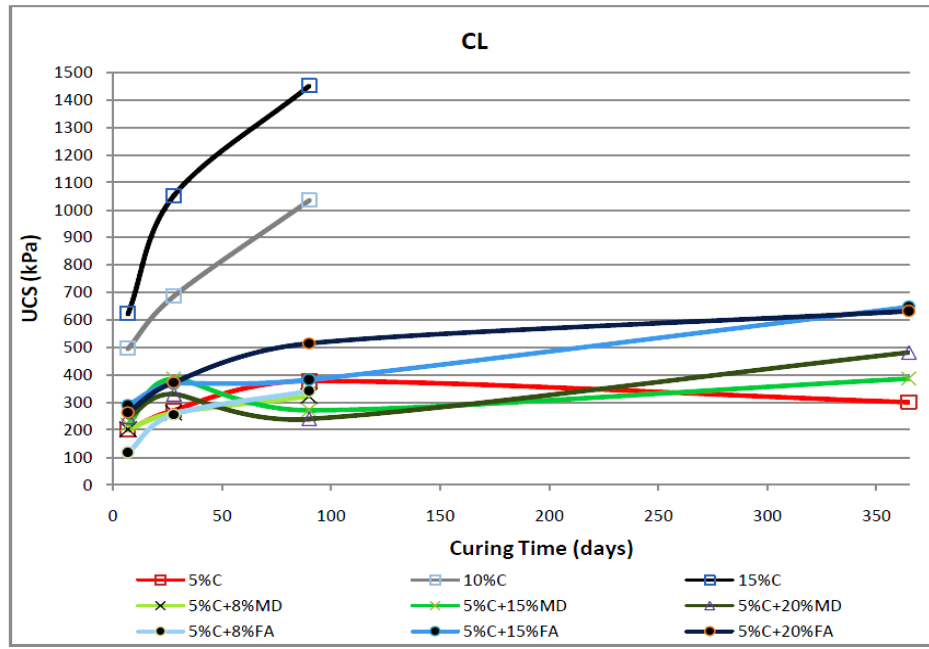
basınç dayanımı ve düşük permeabilite). Polipropilen ve çelik lifler üç farklı hacim oranında (%0.5, %0.75 ve %1.0) kullanılmıştır. Sonuçta çelik ve polipropilen liflerin kullanımıyla eğilme performansının iyileştiği ve polipropilen lifin uygulanmasının çelik life göre daha iyi sonuç verdiği ifade edilmiştir.

Tang *et al.* (2011), derin çimento karıştırma yöntemi ile organik ve turba zeminlerin geoteknik özelliklerini iyileştirmek amacıyla araştırma yapmışlardır. 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.

Şengör (2011) yaptığı doktora tezinde, yumuşak kil zemin içinde derin karıştırma kolonlarının deformasyon karakteristikleri, model deneyler yaparak araştırmıştır. Bu araştırmanın ilk aşamasında, iyileştirilmiş zeminler üzerinde tek eksenli basınç deneyleri yaparak yumuşak kil zeminler için etkili karışım oranları ve karışım tipleri araştırılmıştır. 7, 28, 90 ve 365 günlük kür süreleri sonunda tek eksenli basınç dayanım değerleri elde edilmiştir. Bununla beraber iyileştirilmiş zeminlerin elastisite modülü (E50)/serbest basınç dayanımı (UCS) oranları da ayrıca araştırılmıştır (Şekil 1.1). Araştırmanın ikinci aşamasında, büyük ölçekli konsolidasyon tankları içerisinde dört farklı yerleşimde ve üç tip karışım oranında model derin karıştırma kolonları oluşturulmuş ve derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmiş kil zeminin konsolidasyon özellikleri araştırılmıştır.

Derin karıştırma kolonları ile iyileştirilmiş yumuşak kil zemin üzerinde yapılan büyük ölçekli konsolidasyon deneylerinin sonuçlarına göre, iyileştirilmiş yumuşak kil zeminin sıkışma özellikleri kolon parametrelerine, özellikle etkili alan oranı ve karışım malzemesi miktarına bağlı olarak belirlenmiştir. İyileştirme açısından kolon çimento miktarının (buna bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımı, UCS) en etkili parametre olduğu tespit edilmiştir. İyileştirilmiş zeminin sıkışma modülünü belirlemek için kullanılan bağıntıların geçerliliği irdelenmiştir. İyileştirilmiş zeminin sıkışma

modülünün tespitinde zeminin ve kolon malzemesinin sıkışma modüllerinin kullanılmasının daha iyi sonuç verdiğini görmüştür. Ön tasarım işlerinde kullanılabilir şekilde, oturma azaltım faktörü ile alan oranı ve çimento miktarı arasındaki ilişkileri de tespit etmiştir. Oturma değerlerinden zemin ve kolon üzerindeki gerilmeler geri-hesaplanmıştır ve gerilme oranları tespit edilmiştir.

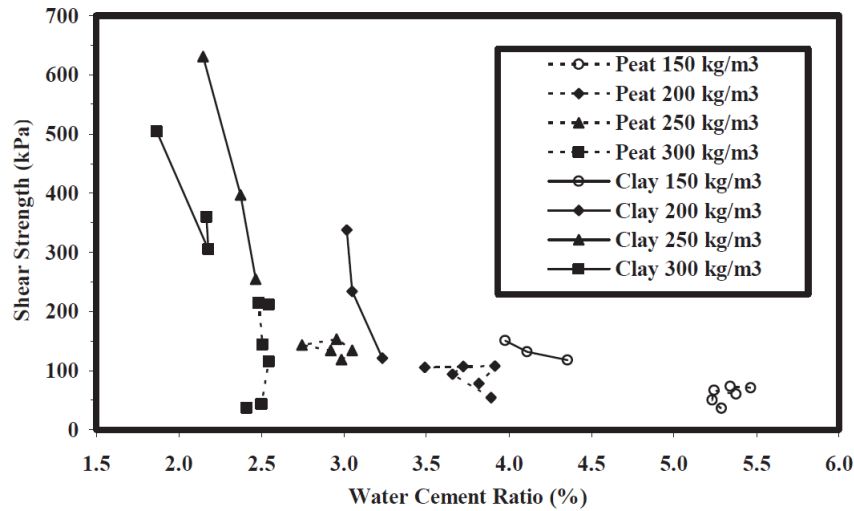


Şekil 1.1. Karışımların kür süresine bağlı olarak serbest basınç mukavemetleri (Şengör 2011)

Pye *et al.* (2012), laboratuvar ve arazide derin karıştırmanın kuru yöntemini kullanılarak dizayn ve inşa etme işlerini araştırmışlardır. Laboratuvarında turba ve kilde çimentonun bağlayıcı madde olarak kullanıldığı deneyler yapılmıştır. Arazide yapılmış kolonların dayanım testleri sonuçları ile laboratuvar numunelerinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Karıştırma enerjisinin ve su-çimento oranının en önemli faktörler olduğu belirlenmiştir. Ayrıca su-çimento oranının azalmasıyla drenajsız kayma mukavemetinin azaldığı ifade edilmiştir (Şekil 1.2)

Pakbaz and Alipour (2012) ise yaptıkları çalışmada, kil-çimento karışımının geoteknik özelliklerini derin karıştırma yöntemi kullanarak araştırmışlardır. Sıkışma indisi ve ön

konsolidasyon basıncı açısından laboratuarda kil-çimento karışımlarının sıkışma özellikleri ile birlikte endeks özellikleri değerlendirilmiştir. Ayrıca laboratuarda elde edilen farklı karışımlarının serbest basınç açısından mukavemet özelliklerini karşılaştırılmıştır. Kil numuneleri portland çimentosu ile kilin kuru kütlesi açısından %4, %6, %8 ve %10 oranlarda ve üç farklı su muhtevasında (%30, %48 ve %70) 7,14 ve 28 günlük kür süreleri için uygulanmıştır. Çalışma sonucunda; çimento uygulanan zeminlerin mukavemetlerinin çimento miktarının artması ve su içeriğinin düşmesiyle arttığı ifade edilmiştir. Ayrıca, konsolidasyon deney sonuçlarına göre sıkışma indisi ve ön konsolidasyon basıncı çimento miktarının artmasıyla artmıştır.



Şekil 1.2. Turba ve kil örneklerde su-çimento oranının kayma mukavemetine etkisi (Pakbaz and Alipour 2012)

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, laboratuarda 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 %4.0 ve %8.0 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. Killer

2.1.1. Kil

Kil doğada bol miktarda bulunan minerallerdendir. Fakat saf kil bulmak oldukça zordur. Kilin içerisinde en çok kalker, silis, mika, demir oksit bulunur. Genellikle 0,002 mm'den daha küçük daneli zeminlere kil adı verilmektedir. Kil sarımtırak, kırmızımtırak, esmer gibi renklerde bulunur. Bu özelliğini bileşiminde bulunan yanıcı maddeler verir. Kilin yapısı itibarıyla su emme ve şişme özelliği vardır. Bu nedenle kil daima nemlidir. Kili meydana getiren maddeler sulu alüminyum silikatlerdir. $m \text{ Al}_2\text{O}_3$, $n \text{ SiO}_2$, $p \text{ H}_2\text{O}$ genel kimyasal bileşim formülü ile ifade edilen kil, çok saf olduğu zaman hidrate Alümin Silikat (kaolinit) adını alır. Kaolinit'in kimyasal formülü, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dur (Anonim 2013a).

2.1.2. Kilin özellikleri

Plastisite: Öğütülmüş kile uygun miktarda su karıştırıldığı zaman işlenebilme ve şekillendirme özelliği kolaylaşır. Böylece kil kolayca şekil alır (Buna karşılık kum, su ile karıştırıldığı zaman herhangi bir plastik özellik kazanamaz) (Anonim 2013a).

Kohezyon: Kohezyon zemin danelerinin birbirlerini tutma kapasitesidir. Bu özellik kil hamuruna kuruduğu zaman kendisine verilmiş olan şekli muhafaza etme kabiliyeti sağlar. Örneğin kum bu özelliğe sahip olmadığı için su ile ıslandıktan sonra kurumaya terk edildiği zaman küçük bir darbe ile kendi kendine dağılır. Kilin kohezyona sahip olabilmesi için mutlaka su ile yoğurulması gereklidir (Anonim 2013a).

Renk: Killer metal oksitlerle karışık bir şekilde bulduklarından doğal olarak renklenmiş durumdadırlar. Ayrıca organik maddeler de ihtiva eder. Kilin saf olması

halinde rengi beyaz olur ve kaolen adını alır. Bunun ötesinde killerin renkleri sarı, pembe, kırmızımsı, mavimsi, gri, yeşil ve siyahımsı olabilir. Kilin rengi içinde bulunan maddeler hakkında fikir vermektedir. Kilde limonit bulunması halinde rengi esmerdir. Kilde demir peroksit bulunması halinde rengi kırmızıdır. Kilde manganez bioksit bulunması halinde rengi siyahtır. Kilde organik maddeler bulunması halinde menekşe rengindedir (Anonim 2013a).

Rötre: Kil su ile yoğrulup şekillendikten sonra kurumaya terk edilirse şekillendirme sırasında verilmiş olan ölçüleri küçülür. Diğer bir deyişle kil hamurunun kuruma sırasında hacmi küçülür. Bu olaya kilin rötre yapması denir. Kilin kurumasından meydana gelen rötre, kilin plastisite özelliğine bağlıdır. Rötre, plastisiteden sonra en önemli özelliktir (Anonim 2013a).

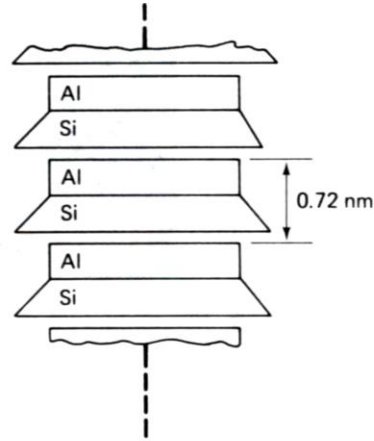
2.1.3. Kil minerallerinin sınıflandırılması

Zeminlerin ayrışması sırasında ortaya çıkan mineraller arasında en önemlileri kil mineralleridir. Bu nedenle zeminlerin ve sedimentlerin önemli kısmını oluştururlar ama püskürük kayalarda bulunmazlar. Kil mineralleri iyi kristalize olmuş, OH içeren alüminosilikatlardır. Yaprakçık şeklinde kristal yapıya sahiptirler ve bu nedenle mikalar gibi tabakalı veya fillosilikatlardandırlar. Yaprakçıkların çapı çoğunlukla 2 μ m'den küçüktür, kalınlığı ise 2-50 nm kadardır. Kil mineralleri kilce zengin olan topraklara, plastiklik, şişebilme ve büzülebilmeye, iyonları ve molekülleri adsorbe ve desorbe etme yeteneği kazandırır. Kil minerallerinin kimyasal yapısındaki elementler ve bunların oksitlerinin oranla farklı kil mineralleri arasında belirgin bir ayırımın yapılamayacağını göstermektedir (Çizelge 2.1). Bu nedenle kil minerallerinin sınıflandırılmasında daha az değişken olan kristal yapıları esas alınır (Uğur 2005).

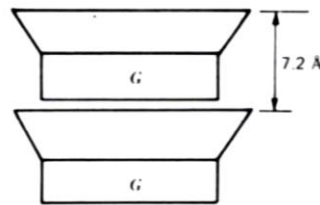
Çizelge 2.1. Kil minerallerinin kimyasal bileşimi (ağırlığa göre) (Scheffer-Schachtschabel 1970)

Kil mineralleri	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
Kaolinit	45-48	38-40	-	-	-	-	-	-
Montmorillonit -Nontroit	42-55	0-28	0-30	0-0,5	0-3	0-2.5	0-0.5	0-3
İllit	50-56	18-31	2-5	0-0.8	0-2	1-4	4-7	0-1
Vermikulit	33-37	7-18	3-12	0-0.6	0-2	20-28	0-2	0-0.4
Klorit	22-35	12-24	0-15	-	0-2	12-34	0-1	0-1

a) **Kaolinit ve Halloysit:** Genelde saf sulu alüminyum silikat olarak bulunan bu kil minerallerinin tabakaları arasında herhangi bir iyon bulunmaz (Şekil 2.1 ve Şekil 2.2). Şişme, katyon değişim ve rötre özellikleri düşüktür (Mittchell 1993).

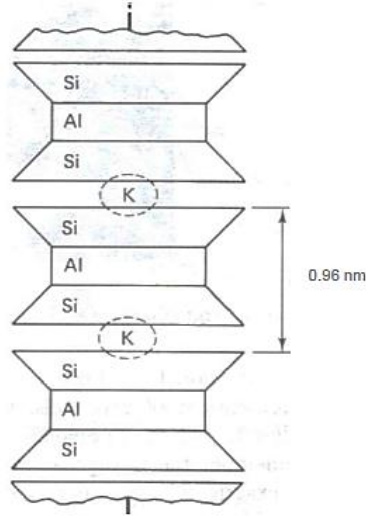


Şekil 2.1. Nano boyuttaki Kaolinit (Mitchell 1993)



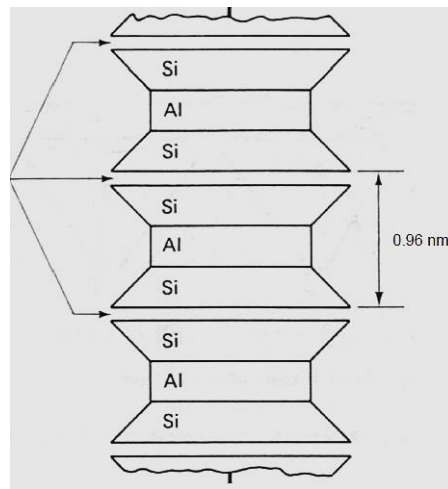
Şekil 2.2. Nano bouyutta halloysit (Mitchell 1993)

b) İllit: İllitler diğer kil minerallerinden K^+ (potasyum) iyonu içeriğiyle ayırt edilirler (Şekil 2.3). Şişme, katyon değişim özellikleri açısından kaolinit ile montmorillonit arasında davranış gösterirler.



Şekil 2.3. Nano boyutta illit (Mitchell 1993)

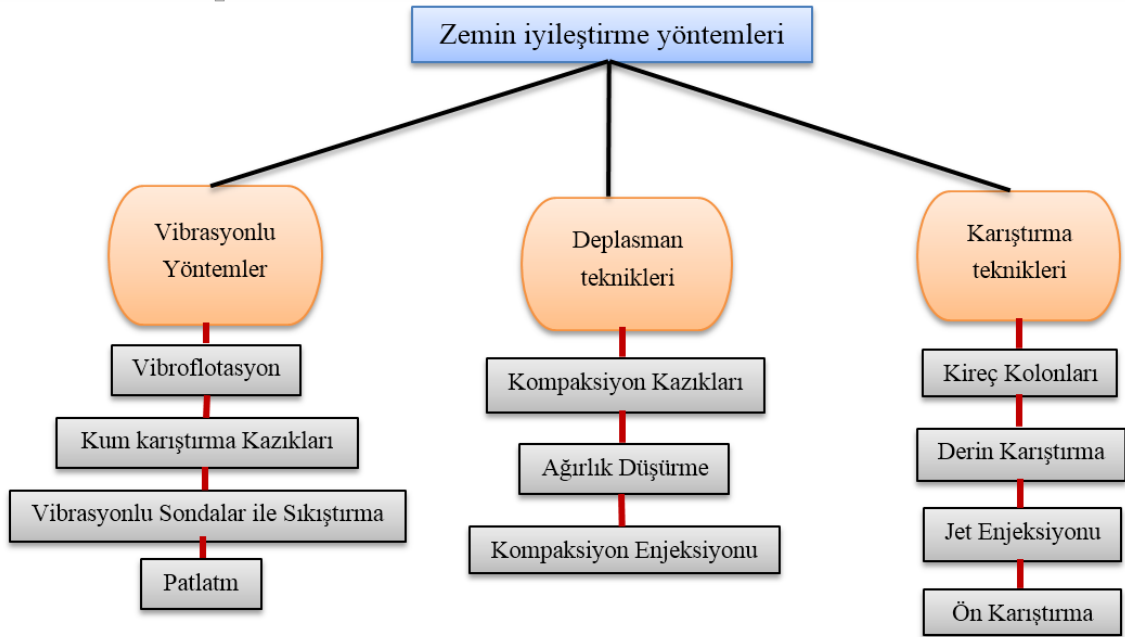
c) Montmorillonit: Montmorillonit mineralleri illit ve vermikulite benzeyen bir kristal yapısına sahiptirler (Uğur 2005). İllitten farklı olarak K^+ iyonu yerine tabakalar arasında H_2O , Na (sodyum), Ca (kalsiyum) veya Mg (magnezyum) iyonları bulunabilir. Bu özelliği sebebiyle yüksek şişme ve katyon değişim kapasitesine sahiptirler (Şekil 2.4).



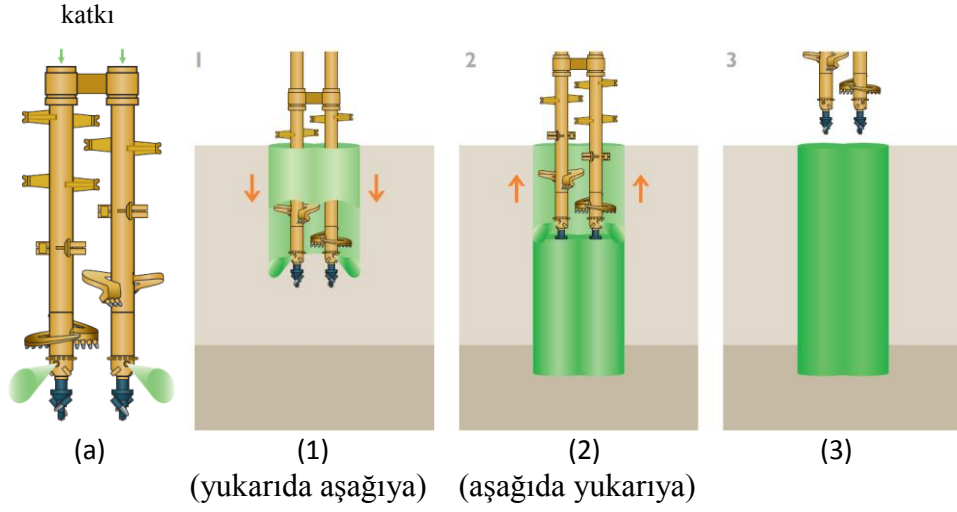
Şekil 2.4. Nano boyutta montmorillonit (Mitchell 1993)

2.2. Derin Karıştırma Yöntemi

Derin karıştırma yöntemi, zemin iyileştirme yöntemlerinden birisidir (Şekil 2.5). Arazide kireç, çimento ve buna benzer katkıları ortası delik burgular veya kanatlı karıştırıcılar vasıtasıyla zemin ile karıştırılacak (Şekil 2.6-a) kolonlar oluşturulur. Karıştırma işlemi alttan yukarıya veya aksine yapılabilir (Şekil 2.6-1, 2.6-2, ve 2.6-3). Kolonlar uygulama şekline göre grid, duvar, teğet ve blok tipi olarak farklı şekillerde uygulanabilir (Şekil 2.7). Derin karıştırma kolonlarının çapı genellikle 0,6 m ile 1,5 m'ye ve derinliği ise 40 m'ye kadar varabilir.

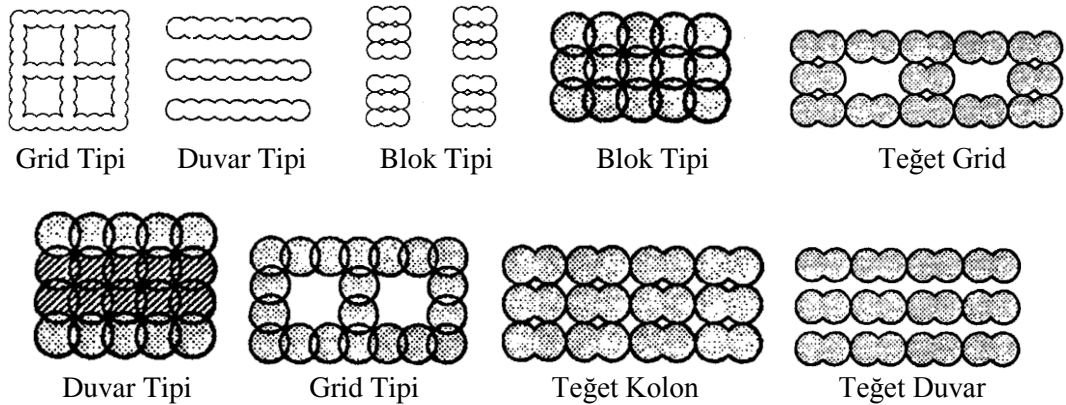


Şekil 2.5. Zemin iyileştirmesinde farklı yöntemler (Altun 2010)



Şekil 2.6. Derin karıştırma yönteminin farklı uygulamaları (Anonymous 2012)

Bu, iyileştirme ile zeminin dayanımı artar, sıkışabilirliği ve geçirimsizliği ise düşer. Tipik katkılar çimento ve kireçtir ancak cüruf veya diğer katkıları da kullanılabilir. Derin karıştırma kolonları tek başına, ayaklar oluşturmak için gruplar halinde, duvarlar için tek sıra halinde veya hücreler oluşturmak için belirli kalıplarda uygulanabilirler (Şekil 2.7). Bu işlem kaba-daneli zeminlerde sızdırmaz perde duvar oluşturmak için, kazı destek duvarları inşa etmek için ve sıvılaştırılabilir zeminleri stabilize etmek için kullanılabilir.



Şekil 2.7. Derin karıştırma uygulama şekilleri (Yang 1997)

2.2.1. Derin karıştırma yönteminin tarihi gelişimi

İlk olarak ABD’de 1954 yılında Federal Karayolları İdaresinde (FHWA), yapılan 82 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).

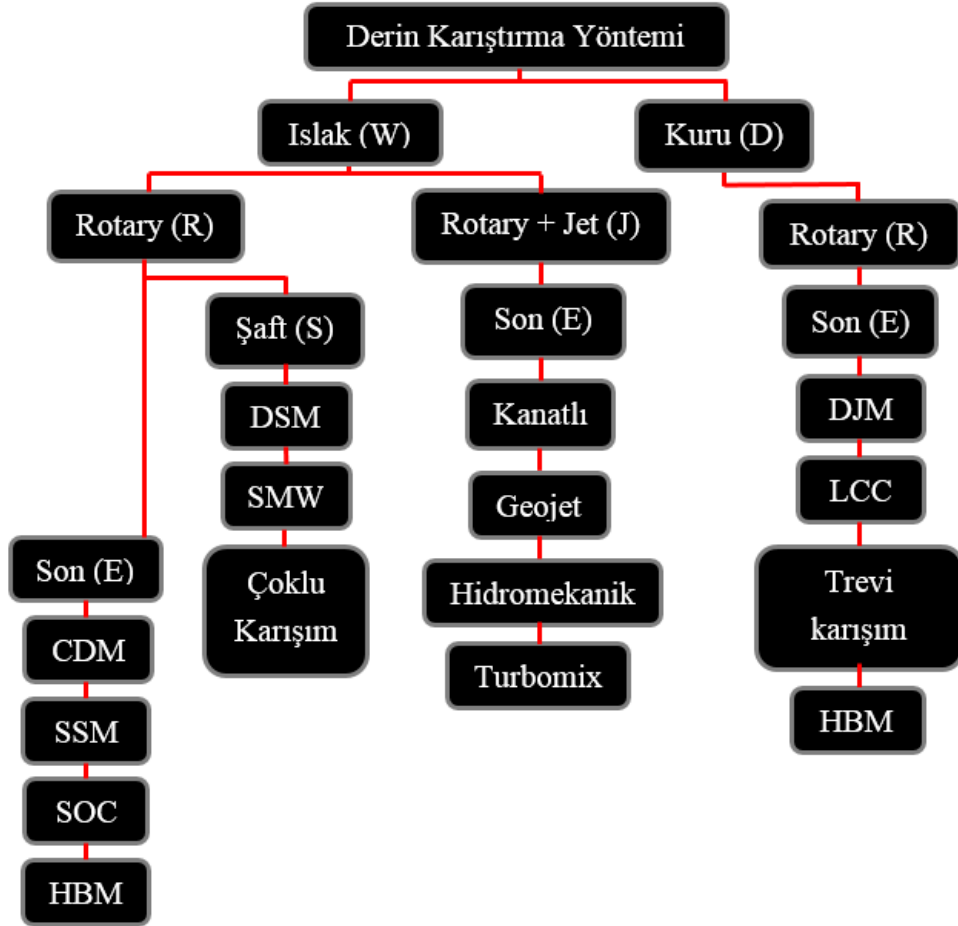
2.2.2. Derin karıştırma uygulamaları ve avantajları

Genel olarak, derin karıştırma yöntemi çok sert, sıkı ve kayalık olmayan zeminlerde alternatif bir yöntem olarak yaklaşık 30 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).

2.2.3. Derin karıştırma yönteminin sınıflandırması

Derin karıştırmada uygulanabilen yöntemler Şekil 2.8’de verilmiştir.



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

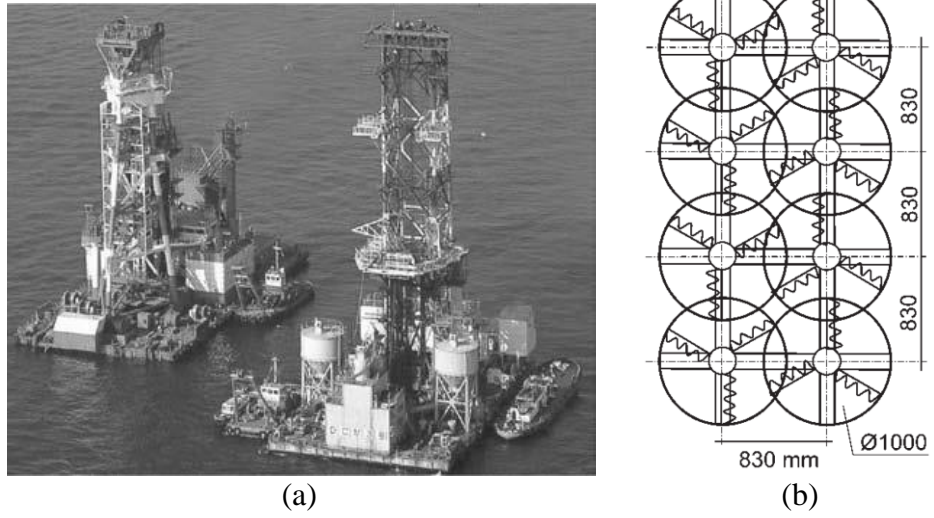
- Bağlayıcı madde ıslak (W) veya kuru (D) olarak iki farklı yöntemle zeminle karıştırılabilir.
- Bağlayıcı madde düşük basınç ile rotary (R) yardımıyla zemine aktarılır veya jet (J) ile yüksek basınç kullanarak zemine enjekte edilir.

- 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.

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).

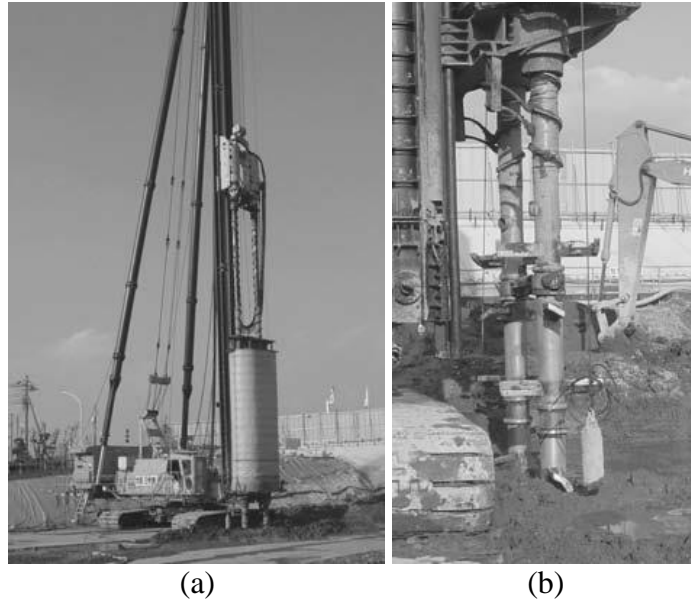
2.2.4. Derin karıştırmada uygulanan ıslak ve kuru yöntem

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 2002a). Derin ıslak karıştırma yöntemi deniz uygulamalarında özellikle kaplama duvarlarının temelini güçlendirmek amacıyla hemde iskele duvarı ve dalgakıran temellerinde kullanılır (Terashi 2002a). 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 (CDM Assoc. 2002). Islak karıştırma yönteminin denizde ve arazide uygulanması Şekil 2.9 ve Şekil 2.10 verilmiştir.



Şekil 2.9. Derin ıslak karıştırma (Denizde)

- (a) Denizde uygulanan Derin ıslak karıştırma yöntemi, (CDM Association Japan)
- (b) Karıştırma şaftının muhtemel düzenlenmesi (Moseley and Kirsch 1993)



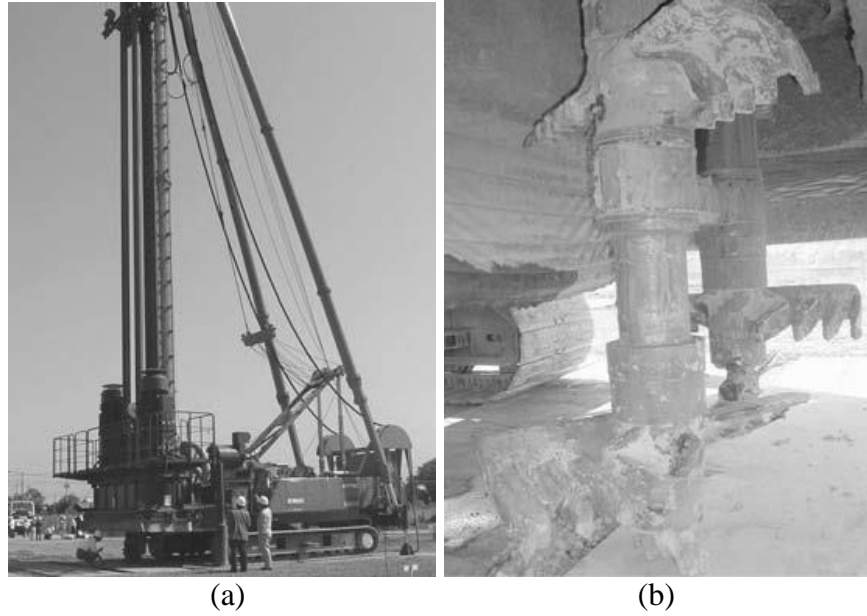
Şekil 2.10. Derin ıslak karıştırma (Arazide)

- (a) Arazide uygulanan derin karıştırmanın ıslak yöntemi
- (b) Burgunun boyunda yerleşen palet bıçakları (Moseley and Kirsch 1993)

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 standartta göre derin kuru karıştırma ekipmanı iki şafttan, karıştırıcı bıçağının çapı 1.0 m ve maksimum nüfuz 33 m’den oluşmaktadır (DJM Association 2002). 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

- (a) Derin karıştırmanın kuru yönteminin ekipmanı ve arazide uygulaması
- (b) Çapı 1 m olan karıştırıcı (Moseley and Kirsch 1993)

2.3. Derin Karıştırma Yönteminde Kullanılan Bağlayıcılar

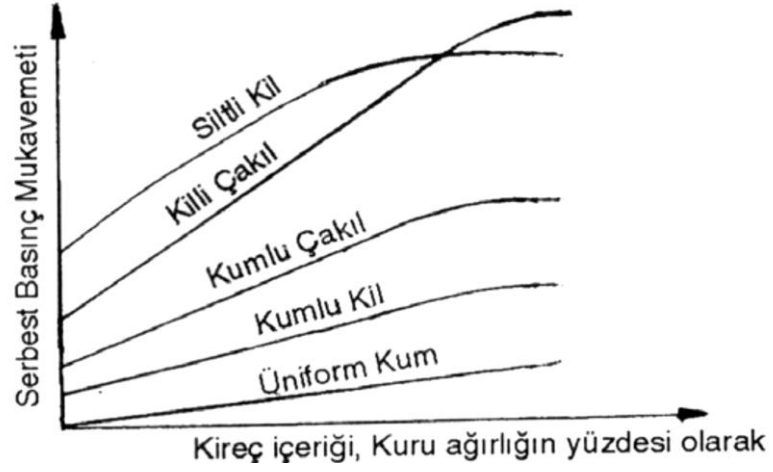
Zeminlerin iyileştirilmesinde katkı seçimi için, zemin cinsi, iyileştirme amacı (stabilite artışı, kaplama kalınlığının azalması, vb.), zeminin hangi özelliğinin iyileştirileceği, maliyet ve elde edilme kolaylığı gibi hususlar daima göz önünde tutulmalıdır. Kireç

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).

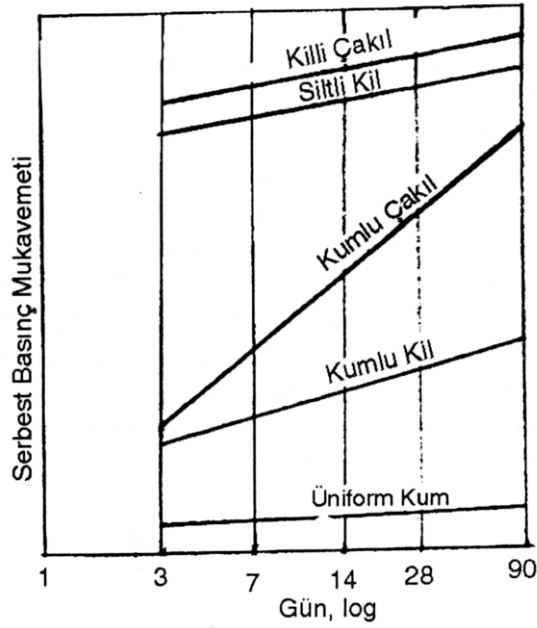
Çimento ve kireç en önemli bağlayıcı maddelerden ikisi olarak derin karıştırma yönteminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, yüksek fırın cürufu, alçı, kül ve bunların diğer yan ürünleriyle birlikte, kombinasyonları da kullanılmaktadır. Bağlayıcılar iyileştirme süresinde kil minerallerinin yüzeyinde kation değişmesini sağlayıp, zemin partiküllerini birbirine yapıştırıp ve/veya boşlukları kimyasal reaksiyonları ile doldurmaktadır (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 dolgulara özellikle yol inşaatlarında kullanılmaktadır (Özaydın 2000). Değişik tip zeminler için kireç miktarı ile serbest basınç mukavemeti arasındaki ilişki (Şekil 2.12) 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)

2.4. İyileştirilmiş Zeminlerin Donma-Çözülme Davranışı

Su donduğu zaman hacminde %9 artış olur. Belirli koşullar altında, bu genişleme kayaların yer değiştirmesi veya çatlamasına neden olabilir. -22°C 'de, buzun hacminde artışlar nedeniyle 207 MPa'a kadar basınçlar oluşturabilir, daha fazlası kayaların

dağılmasında yeterli olabilir (Matsuoka and Murton 2008; TSytovich and Aleksandrovich 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 (Anonymous 2013b). 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 ve 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, Iskandar and Hunsicker (1990) çalışmalarında, 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.

2.5. Termoset Yapıştırıcılar ve Doymamış Polyester

Polimer, monomer denilen küçük moleküllerden meydana gelen büyük moleküllerin zincir yapısında bulunduğu tabii veya suni bir madde olarak tanımlanır. 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 2013b). Çoğu polimerler karbona dayanır ve bu nedenle organik kimyasal madde olarak kabul edilir. Polimerler plastikler ve lastikler olarak ayrılabilir. Mühendislik malzemeleri olarak üç kategoriye bölmek daha uygundur: termoplastikler, termosetler ve elastomerler. Termoplastikler ve termosetler polimerler plastik, plastomerler ise lastiklerdir (Kaya 2004).

Termosetler, termoplastiklere nazaran ısı ile özellikleri değişen plastik maddelerdir. Termosetler, ısıtıldıklarında kimyasal bir değişime uğrarlar ve çözünen, eriyen bir yapıdan sonuçta erimez ve çözünmez bir yapıya kavuşurlar. Termosetlerden epoksi reçineleri, polyesterler, fenolik ve amino reçineleri bu grubun önemli üyeleri arasında bulunmaktadır.

Termoset reçinelerinin en önemlilerinden olan doymamış polyesterler, polihidrik asitler ve bir poliglikolin reaksiyonu sonucu elde edilirler. Polidihrik asitler arasında asit anhidrit veya melaik anhidrit yer almaktadır. Etilen glikol, dietilen glikol, trietilen ve polietilen glikol poliglikol olarak kullanılmaktadır. Doymamış polyesterler şurup kıvamında sıvı halinde veya erime noktası çok düşük olan katı madde halinde olan maddelerdir. Bu maddeleri polimerize ederek daha kullanışlı bir hale getirmek için stiren, vinilasetat ve dialil fitalat gibi monomerlere çapraz bağlamak gerekir. Çapraz bağlama, bahis konusu monomerlerin çok az miktarda kullanılması ile sağlanır. Benzol peroksit gibi bir organik katalistin yardımıyla polyester zincirleri stiren ile bağlanarak daha büyük bir molekül meydana getirirler. Stirenin fazla kullanılması sonucu termoplastik yapıya sahip bir polyester elde edilir. Katalistin parçalanarak serbest radikaller vererek reaksiyonu başlatması için ısıtılması gerekir. Ancak kobalt naftenat gibi reaksiyonu hızlandırıcı maddelerin kullanılması katalistin parçalanması oda sıcaklığında gerçekleştirir. Katalist sıvı haldeki polyestere katılmaktadır. Hızlandırıcı ise polyesterin sertleştirilmesinden, çapraz bağlamasından önce karışıma ilave edilir.

Sertleştirme sonucunda cam elyafı takviye edilmiş malzemeler kuvvetli bir şekilde birbirlerine yapışırlar.

Genellikle cam elyafı takviyeli iki polyester yüzey bu şekilde çok mükemmel bir şekilde yapıştırılırlar. Stirende çözülmüş doymamış polyester sıvı bir yapıştırıcı olarak kullanılarak oda sıcaklığında veya 100°C'ye kadar olan sıcaklıklarda yapışma sağlanabilir. Yapışma polyesterin stirene olan oranına bağlı olarak yumuşak ve sert olabilir. Polyesterin sertleştirilmesi çok hızlı olmalıdır. Doymamış polyester yapıştırıcıları ile sağlanan yapışma sonucu büzülme fazla olmaktadır ve bu özellik doymamış polyesterler için büyük bir dezavantajdır. Metil etil keton peroksit ve kobalt naftenat katalist olarak kullanılır. Bu kombinasyon polyesterin açıkta kalma zamanını azaltır.

2.5.1. Doymamış polyester

Polyester, plastiklerin ana bağları içinde ester fonksiyonel grupları içeren yoğunlaşma polimerleri olup doymuş ve doymamış olmak üzere ikiye ayrılır. Doymamış polyesterler, ester grupları ile birlikte çift bağlar içerdiklerinden çapraz bağ oluşturma eğilimi gösterirler ve sonucunda ortaya çıkan ürün termoset plastiktir. Ester grupları içermesine rağmen çift bağlar içermeyen polyesterler doymuş yapıları sebebiyle çapraz bağ oluşturmazlar. Ayrıca polyester yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahiptir ve ticari kullanımda en başarılı yapay elyaftır. Tüm örtü, ev tekstili (yatak takımları, çarşaf, yastık, perde, mobilya döşemeleri, halılar), lastik, çorap ve kemerlerde destekleyici elyaf olarak kullanılırlar (Anonim 2010):

- Güçlüdür, çekme ve aşınmaya karşı dirençlidir.
- Yıkabilir, kuru temizlenebilir.
- Çabuk kurur.
- Kırılmaya karşı dirençlidir, ısı uygulandığında kıvrılma özelliği vardır.
- Kimyasallara karşı dayanıklıdır.
- Statik ve tüylenme problemi olabilir.
- Düşük emiliminden dolayı pas çıkarma problemi olabilir.

2.6. Biyopolimerler

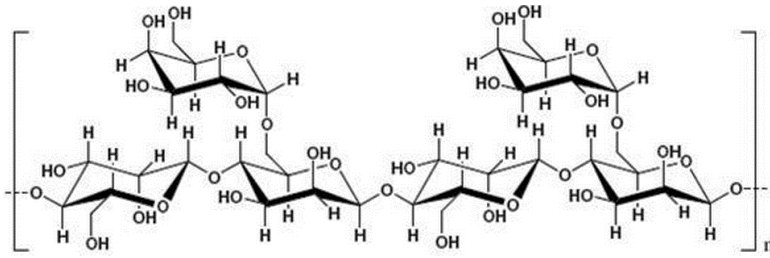
Biyopolimerler canlı organizmalar tarafından üretilen polimerlerdir. Selüloz, nişasta, kitin, proteinler, peptidler, DNA ve RNA biyopolimerlere örnek olarak gösterilebilir. Sayılan bu biyopolimerler sırasıyla şeker, amino asit ve nükleotid adı verilen monomerlerden oluşmaktadır. Selüloz Dünya’da hem 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. Bazı biyopolimerler biyolojik olarak yıkılabilirler. Bu da mikroorganizmalar tarafından karbondioksit ve suya yıkılabildikleri anlamına gelir (Anonim 2012).

Polimerler ve biyopolimerler arasındaki ana ve tanımlayıcı fark yapılarında görülmektedir. Biyopolimerleri de içeren polimerler kendini tekrar eden monomer adlı yapı taşlarından oluşmaktadır. Biyopolimerlerin de iyi tanımlanmış yapıları vardır fakat bu onların tanımlayıcı özellikleri değildir. Proteinler ele alındığı zaman kesin kimyasal kompozisyonları ve yapıtaşların dizilme sırasına birincil yapı denirken, birçok biyopolimer kendiliğinden karakteristik kompakt şekillere katlanarak, biyolojik fonksiyonlar edinirler. Buna karşın çoğu sentetik polimerler daha basittir ve daha rastgele yapıdadır. 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 tamamıyla aynıdır. Hepsisi 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).

2.6.1. Guar gum

Gumlar; yüksek molekül ağırlığı olan, % 0,1-0,5 konsantrasyonda viskoziteyi artırmak için kıvam artırıcı olarak kullanılan, negatif yüklü karbonhidratlardır. Ayrıca gumlar stabilizör ve jelleştirme ajanlarıdır.

Guar gum (GG), veya guargan, siyam baklasının (*Cyamopsis tetragonolobus*, *Cyamopsis psoraloides*) besidokusundan elde edilen bir kıvam arttırıcıdır. İnsan ve hayvanlar için bir besin kaynağı olarak kullanımı da bulunmaktadır. GG'nin kimyasal formülü Şekil 2.14'te verilmiştir. Toz formunda (Şekil 2.15) suda çok iyi hidratlanabilmekte ve gıda sanayisinde birçok uygulama alanı bulan koloidal çözeltiler vermektedir (Anonim 2013c).



Şekil 2.14. Guar gumun kimyasal formülü (Anonim 2013c)

Suda dağıtıldığında hidratlaşan GG, katıldığı ürünün viskozitesini hızla artırmakta, ısıtmadan 10-15 dakika içinde son viskozite değerinin yaklaşık yarısına ulaşmaktadır. Nötral yapıda olan GG; diğer gıda bileşenleriyle uyumlu olup, nişasta, selüloz, agar, K-karegenan ve ksantan gumla etkileşime girmektedir. Bu etkileşim, selülozla bağlanma şeklinde gerçekleşirken, suda çözünen proteinlerle ise viskozitede artış olarak kendini göstermektedir.



Şekil 2.15. Toz formunda guar gum (Anonim 2013c)

Örneğin; GG ve zantan gum karışımında görülen viskozite; her bir gum ayrı ayrı kullanıldığında elde edilen değerlerle karşılaştırıldığında oldukça yüksek kalmaktadır. GG'la selüloz arasındaki moleküller arası etkileşim, özellikle yağların yerine kullanılabilen maddelerin üretiminde kullanılmaktadır. GG'ın gıda sektöründe ve diğer sektörlerde ki kullanım alanları sırasıyla Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.2. Gıda sektöründe kullanılan guar gumun işlevi (Anonim 2013c)

Unlu mamüller	Yapıyı geliştirir, raf ömrünü uzatır, kıtırılığı artırır
Dondurmalar	Kremsi yapı kazandırır, buz kristallerinin oluşmasını önler ve hızlı erimeyi önler.
İşlenmiş peynir	Dokuyu ve lezzeti geliştirir, stabilizatörlük yapar.
Çorbalar	Yoğunlaştırma, stabilizatörlük
Etler	Sosislerde bağlayıcı madde, serbest suyu emer, dağılmayı önler
Sos ve çeşniler	Yoğunlaştırıcı, çözelti sabitleyici, akışkanlığı geliştirme
İçecekler	Akışkanlık kontrolü, ağızdaki tadı geliştirme, raf ömrünü artırma

Çizelge 2.3. Guar gumun diğer sektörlerde kullanılabilirliği (Anonim 2013c)

Patlayıcılar	Nemli koşullarda kararlılık.
Petrol sondajı	Sıvı kaybı kontrol etmeni, sıvı ayrıştırmada katkı maddesi.
Madencilik	Cevherlerin yoğunluğu, çökeltme ve daha iyi geri dönüşüm.
Yapı	Su tutucu.
Kozmetik ve Eczacılık	Yoğunlaştırıcı, bağ maddesi ve sıkışmış plakaları ayırıcı, hafif müshil etkisi, çözünebilir diyet lifi.
Kağıt Endüstrisi	Gelişmiş sayfa biçimlendirme, gelişmiş yırtılma ve katlanma direnci, son ürünün iyileştirilmesi.

2.6.2. Keçiboynuzu gum

Keçiboynuzu gumu (KG) gıdalarda kıvam arttırıcı katkı maddesi olarak kullanılır ve numarası E 410'dur. KG'ı, baklagiller grubuna giren karob ağacından (*Cerantonia saiqua*) elde edilir. Ağacın ürünü olan tohumların endospermeleri öğütülerek çıkarılır. KG'ı beyaz ile sarımsı beyaz arası bir renktedir (Şekil 2.16), hemen hemen kokusuz bir ürün olup sıcak suda çözünürken, etanolde çözünmez. Yüksek molekül ağırlığı vardır, kimyasal olarak galaktomannan olarak tanımlanabilir. GG ve KG birlikte kullanıldığında tamamlayıcı özellik göstermelerini ve tek kullanımlarına göre daha koyu bir jel oluşturmalarını sağlar (Anonim 2013c).



Şekil 2.16. Keçiboynuzu gum tozu (Anonim 2013c)

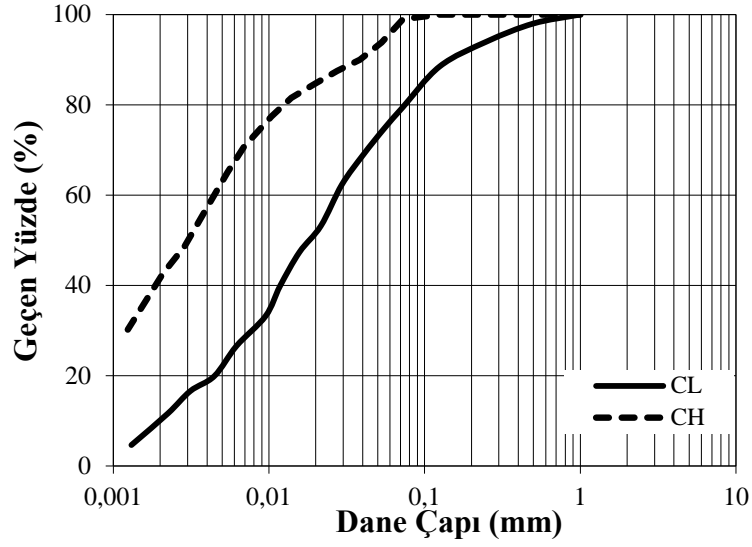
- (a) Sarı renkte olan keçiboynuzu gumu
- (b) Beyaz renkte olan keçiboynuzu gumu

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Kil numuneler

Çalışma kapsamında Kurşunlu-Çorum'dan temin edilen düşük plastisiteli kaolinit kili (CL) ile Aşkale-Erzurum'dan temin edilen yüksek plastisiteli smektit kili (CH) kullanılmıştır. Araziden alınan killer etüvde 105°C sıcaklığında kurutulup, Los Angeles aşınma cihazında öğütüldükten sonra 0,5 mm çaplı elekten elenerek kullanılmıştır (Arazi şartlarında suya doygun kil zemin özelliklerini deneylerde uygulayabilmek için killer farklı su içeriklerinde hazırlanmış daha sonra katkılarla derin karıştırma yöntemine uygun olarak laboratuarda karıştırılmıştır). CL ve CH kiline ait dane çapı dağılımı ve bazı geoteknik özellikleri Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında yapılan deneyler sonucunda belirlenmiştir. Kil numunelerine ait dane dağılımı eğrileri Şekil 3.1'de ve belirlenen bazı geoteknik özellikleri ise Çizelge 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Deneysel olarak kullanılan killere ait dane dağılım eğrileri

Çizelge 3.1. Deneysel olarak kullanılan CL ve CH kilinin özellikleri

		CH	CL
Geoteknik Özellikler			
< 0,002 mm	(%)	43	10
< 0,075 mm	(%)	99	80
Özgül ağırlık	---	2,79	2,77
Likit limit	(%)	90	40
Plastik limit	(%)	32	25
Plastisite indisi	(%)	58	15
Aktivite	---	1,35	1,5
Optimum su muhtevası ¹	(%)	35	22
Maksimum kuru birim hacim ağırlık ¹	(kN/m ³)	12,3	15,3

¹: Standart Proktor deneyinden elde edilmiştir.

3.1.2. Doymamış polyester

Deneysel olarak polimer olarak doymamış polyester (Dewilux-Döküm Tipi) kullanılmıştır. Doymamış polyesterin sertleşmesinde; hızlandırıcı (H) olarak Kobalt Naftanat,

sertleştirici (S) olarakta Metil Etil Keton Peroksit kullanılmıştır (Şekil 3.2). Doymamış polyester, H ve S'nin üretici firma katalogundan temin edilen bazı özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. Deneylerde doymamış polyester kil ağırlığının %5, %10 ve %20'si miktarında kullanılmıştır. H doymamış polyesterin %2, %5, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında, S ise H/S= 2, 3, 4 ve 5 olacak şekilde kullanılmıştır. H ve S oranları, doymamış polyester kullanılarak kompozit malzeme (mermerit v.b.) üretimi üzerinde yapılmış bazı çalışmalardan belirlenmiştir (Akın 2007; Gürü *et al.* 2007).

Çizelge 3.2. Doymamış polyester, hızlandırıcı ve sertleştiriciye ait özellikler

	Polyester	Hızlandırıcı	Sertleştirici
Kimyasal Adı	Polyethlene terephthalate	Cobalt(II) naphthenate	2-Hydroperoxy-2-((2-hydroperoxybutan-2-yl)peroxy)butane
Formülü			
Renk	Renksiz	Mavimsi kırmızı	Renksiz
Asit Değeri	22 mg KOH/g	-	-
Viskozite	600 cps	-	-
Katı Oranı	%65	%6 (Co ⁺²)	-
Yoğunluk	1,133 g/cm ³	0.96 g/cm ³	1.170 g/cm ³
Mol Ağırlığı	-	-	210.22 g mol ⁻¹
Parlama Noktası	N/A	-	82 °C
Erime Noktası	250 °C	140°C	-
Kaynama Noktası	-	>150°C	-



Şekil 3.2. Doymamış polyester, polyester hızlandırıcısı ve sertleştiricisi

3.1.3. Biyopolimerler

Deneyleerde biyopolimer olarak GG ve KG'ı (Şekil 3.3) kil+su toplam ağırlığına göre %0.02, %0.05, %0.15, %0.25, %0.5 ve %1 oranında kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Deneyleerde kullanılan biyopolimerler

- (a) Guar gum
- (b) Keçiboynuzu gum

3.2. Yöntem

3.2.1. Polyester numunelerinin elde edilmesi

Doymamış polyesterin tek başına serbest basınç mukavemetini ve etkin H, S oranlarını belirlemek amacıyla ön deneyler yapılmıştır. Her bir numune için 100gr doymamış polyester ile %2, %5, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında H ve 2, 3, 4 ve 5 oranlarında H/S kullanılmıştır. İlk önce 100gr doymamış polyester içerisine sırasıyla H ve S ilave edilmiştir. Karışımın homojen olması için karıştırma işlemi her aşamada devam ettirilmiştir (Şekil 3.4). Karıştırma süresi 3-5 dakika olarak uygulanmıştır. Karıştırma tamamlandıktan sonra karışım hemen 38 mm çaplı ve 76 mm yüksekliğe sahip metalik kalıplara dökülmüştür. H ve S'nin oranlarına göre numunelerin rengi açık kırmızı, koyu kırmızı ve yeşil olarak elde edilmiştir (Şekil 3.5a ve 3.5b). H ve S oranları arttıkça reaksiyon ısı artmakta, özellikle polyester/H=40 oranında kaynama meydana gelmiş ve numune sertleştikten sonra içinde boşluklar oluşmuştur. Numuneler sertleştikten sonra (~1-2 saat) kalıptan çıkarılmıştır.(Şekil 3.6a ve Şekil 3.6b). Kalıptan çıkarılan numunelerin serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir.



Şekil 3.4. Alüminyum folyo kapta hazırlanmış polyester karışımı



Şekil 3.5. Farklı renklere hazırlanmış polyester numuneleri

- (a) H ve S'nin farklı yüzdelerinden dolayı hazırlanmış farklı renklere polyester numuneleri
- (b) H ve S'nin farklı yüzdelerinden dolayı farklı kalınlıklarda oluşan polyester numuneleri



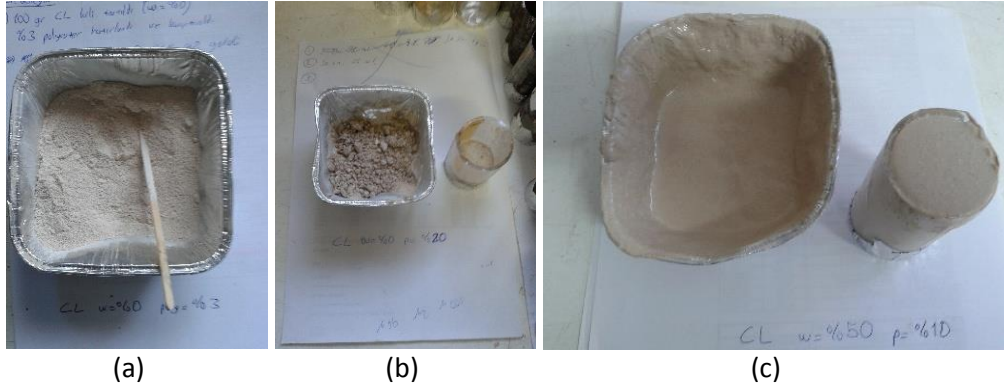
Şekil 3.6. Polyester numunelerinin görüntüleri

- (a) Kalıp içerisindeki polyester numuneleri
- (b) Kalıptan çıkarılmış polyester numuneleri

3.2.2. Derin karıştırma uygulanmış kil numunelerinin hazırlanması

a) CL kili polyester numuneleri: Düşük plastisiteli (CL) kilinin geoteknik özelliklerini iyileştirmek amacıyla derin karıştırma yöntemine uygun olarak laboratuarda numuneler hazırlanmıştır. Çalışmada doymamış polyester kilin %3, %5, %10 ve %20 toplam ağırlığı oranlarında, H ise polyesterin %2, %5, %10, %20 ve %40 ağırlığı oranlarında, S ise $H/S = 1, 2, 4$ ve 5 oranlarında kullanılmıştır. CL kili ise kuru halde, %25, %40 ve %50 su muhtevalarında karışıma katılmıştır. CL kili polyester karışımlarının hazırlanmasında ilk önce kil-su karışımını yaklaşık 5 dakika iyice karıştırıp kil-su çamuru elde edilmiştir. Polyester-H-S karışımı da hazırlandıktan sonra kil-su karışımına ilave edilip yaklaşık 5 dakika birlikte karıştırılmıştır. Karışımlar, 38 mm çapında ve 76 mm yüksekliğinde metal kalıplara konulmuştur. Numunelerin kalıplara yapışmasının önlemek amacıyla metal kalıpların iç kısmı ince bir film tabakası şeklinde yağlanmıştır. Oluşan hava kabarcıkları elle hafifçe kalıbın kenarlarına vurulması yoluyla çıkartılmıştır. CL kili polyester numunelerinin hazırlama süreci Şekil 3.7 ve 3.8'de verilmiştir. Karışımın sertleşme süreci polyester oranından ve kilin su muhtevsından etkilenmektedir. Başka bir deyişle, polyester oranı arttığında ve su muhtevası azaldığında sertleşme süreci azalmaktadır. Sertleşmesi biten numuneler kalıptan

alındıktan sonra 14 ve 28 günlük kür süresi için %80 rutubet içeren kür odasında bekletilmiştir. 14 ve 28 günlük numunelerin mukavemetinin tayini için serbest basınç mukavemeti cihazında deneyler yapılmıştır.



Şekil 3.7. CL kili numunelerinin hazırlanması

- (a) %0 su muhtevası, %3 polyester
- (b) %0 su muhtevası, %20 polyester
- (c) %50 sumuhtevası, %10 polyester



Şekil 3.8. CL kili-polyester karışımları

- (a) Kalıba dökülen numune
- (b) Kalıptan çıkarılan numune

b) CH kili polyester numuneleri: Yüksek plastisiteli (CH) kil üzerinde yapılan derin karıştırma yöntemine uygun numune hazırlama süreci CL kilinde uygulandığı gibi yapılmıştır. Polyester, H ve S oranları CL kili ile aynı oranlarda sadece CH kili yüksek plastisiteli olduğu için farklı su muhtevalarında (%40, %50, %80, %90 ve %100) deneyler yapılmıştır. Numuneler kür odasında %80 rutubette 14 gün bekletildikten sonra serbest basınç deneyleri uygulanmıştır. CH kili-polyester numunelerine ait görüntüler Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.9. CH Kili-polyester karışımının hazırlanması



Şekil 3.10. CH kili-polyester numunesinin kalıba konulması ve kalıptan çıkarılmış hali

c) Kapalı olarak bekletilen 28 günlük numuneler: Numunelerin tamamen kapalı olarak sertleşme süreleri ve serbest basınç mukavemetlerinin belirlenmesi için kapalı kalıplarda numuneler bekletilmiştir (Şekil 3.11). Bu amaçla numuneler yedişer gün aralıklarla kontrol edilerek sertleşip sertleşmedikleri belirlenmiştir (Şekil 3.12). 28 gün sonra tüm numuneler kalıptan çıkarılarak serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Yapılan bu deneyler sonucunda CL kili-polyester numunelerinin kapalı olarak 14 günde, CH kili-polyester numunelerinin ise 28 günde sertleştikleri tespit edilmiştir.



Şekil 3.11. CL ve CH kili-polyester numunelerinin kapalı olarak bekletilmesi



Şekil 3.12. 7 günlük kapalı olarak bekletilen numunelerin kontrolü

- (a) CH kilinin 7 gün sonrası kontrolü
- (b) CL kilinin 7 gün sonrası kontrolü

d) Biyopolimer katkılı CL ve CH kili-polyester numuneleri: Çalışmada, biyopolimer olarak GG ve KG kil+su toplam ağırlığının %0.02, %0.05, %0.15, %0.25, %0.5 ve %1 oranlarında deneylerde kullanılmıştır. Biyopolimerler önceki bölümlerde hazırlanması anlatılan kil-polyester karışımlarına katılmış ve 3 dakika süre ile karıştırılmıştır. Karışımlar 38 mm çapında ve 76 mm yüksekliğinde metal kalıplara dökülerek sertleşmeye bırakılmıştır. Numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra %80 nemde 14 ve 28 gün bekletildikten sonra serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Bu numunelere ait görüntüler Şekil 3.13 ve 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.13. Biyopolimer katkılı CL ve CH kilininin polyester deneylerinin kür odasında bekletilmesi



Şekil 3.14. Kür odasında bekletilen KG katkılı CL ve CH kili-polyester numuneleri

e) Kireç ve biyopolimer katkılı CL ve CH kili-polyester numuneleri: Çalışmada biyopolimer ve kireç birlikte kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Bu amaçla her iki kilinde kuru ağırlığının %3'ü oranında sönmüş kireç, kile ilk olarak kuru bir şekilde karıştırılmış daha sonra önceki bölümlerde anlatıldığı gibi numuneler hazırlanmıştır (Şekil 3.15).

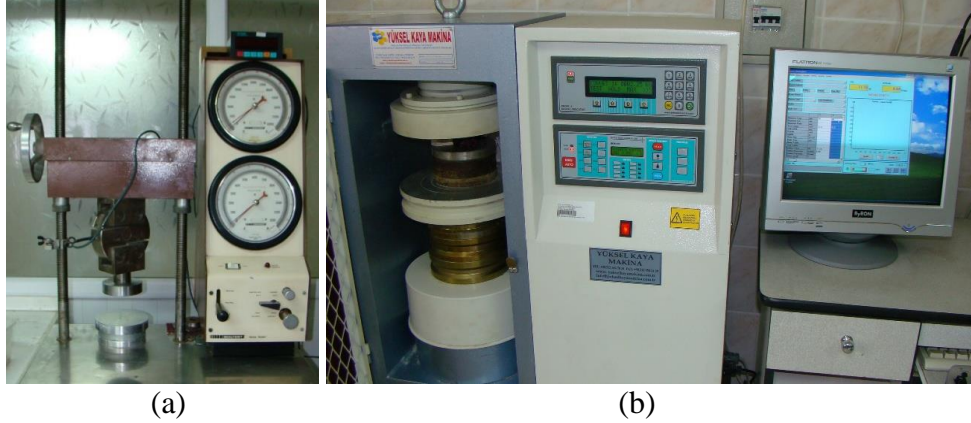


Şekil 3.15. Kür odasında bekletilen biyopolimer ve kireç katkılı CL ve CH kili-polyester numuneleri

3.2.3. 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 kil-polyester numuneleri 20 ton kapasiteli (Şekil 3.16a), polyester numuneleri ise 200 ton kapasiteli (Şekil 3.16b) serbest basınç deney aletlerine yerleştirilmiş ve sırasıyla 0,5 mm/dakika ve 200 kPa/saniye hızlarında kırılmışlardır. Kırılma anındaki en yüksek

basınç değerleri dijital yük okuma aparatından okunmuştur. Serbest basınç mukavemetleri 3.1 bağıntısı ile belirlenmiştir.



Şekil 3.16. Serbest basınç mukavemeti deneylerinde kullanılan cihazlar

- (a) Kil-polyester deneylerinde kullanılan SoilTest cihazı
- (b) Polyester deneylerinde kullanılan Autotest 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.

3.2.4. 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 3.17) 5 ve 10 çevrim için donma-çözölme cihazında bekletilmiştir (Şekil 3.18). 5 ve 10 çevrimlerinin sonunda numuneler serbest basınç mukavemeti deneyleri yapılmıştır. Donma-çözölme işlemi için hazırlanmış numuneler cihaza konulduktan sonra ilk sıcaklığı -20°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 (Ghazavi and Roustaeie 2010). Donma işleminden çözölme işlemine geçme süresi ve aksine 1 saat olarak nitelenmiştir. Donma-çözölme çevrimlerinin sayısı 5 ve 10'a kadar devam etmiştir.



Şekil 3.17. Donma-çözülme cihazında bekletilen alüminyum folyo içerisindeki numuneler



Şekil 3.18. Donma-çözülme cihazı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

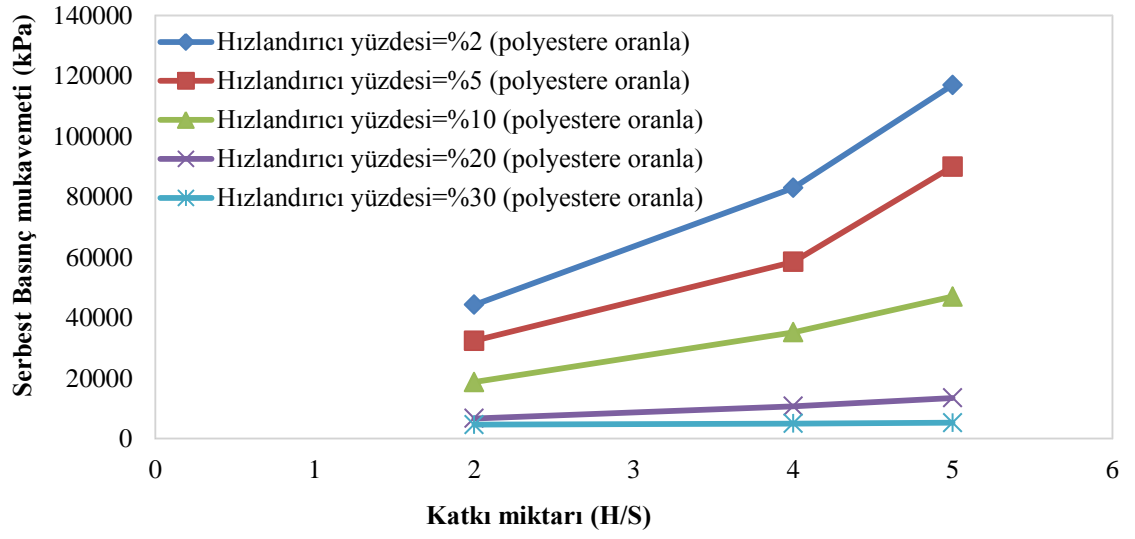
4.1. Polyester Numunelerinin Serbest Basınç Mukavemetleri

Bir günlük polyester numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç deney sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelge 4.1 sonuçları kullanarak çizilen grafikler Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir. Çizelge 4.1’de farklı H ve S yüzdelerinde hazırlanan numunelerin serbest basınç mukavemetleri verilmiştir. Serbest basınç mukavemetleri 4700 kPa (4.7 MPa) ile 117000 kPa (117 MPa) aralığında değişmektedir. H’nın %40 olduğu tüm numunelerde karıştırma işlemi sırasında kaynama olmuştur ve numune hazırlanamamıştır. En yüksek mukavemet değeri H’nın %2 ve H/S oranının 5 olduğu oranlarda 117 MPa olarak elde edilmiştir. Bu oranlar mermerit dökümünde kullanılan oranlarla aynıdır (Akın 2007).

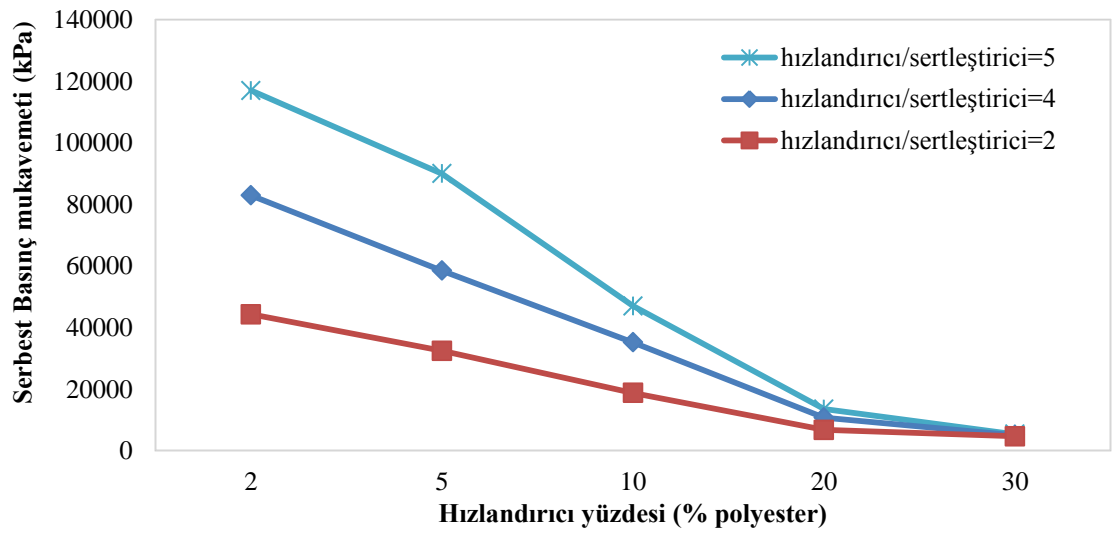
Çizelge 4.1. Farklı hızlandırıcı ve sertleştirici oranlarında hazırlanan polyester numuneleri

Deney Numarası	Hızlandırıcı (%polyester)	H/S	Serbest Basınç Mukavemeti (kPa)
1	2	2	44300
2	2	4	82940
3	2	5	117000
4	5	2	32420
5	5	4	58500
6	5	5	90000
7	10	2	18750
8	10	4	35220
9	10	5	47000
10	20	2	6755
11	20	4	10750
12	20	5	13500
13	30	2	4700
14	30	4	5038
15	30	5	5335
16	40	2	kaynama oldu
17	40	4	kaynama oldu
18	40	5	kaynama oldu

Çizelge 4.1’de olduğu gibi Şekil 4.1’den de görüleceği gibi H yüzdesinin %2 (polyestere oranla) ve H/S oranının 5 olduğu numunelerde en yüksek mukavemet değeri elde edilmiştir. H/S oranının artmasıyla tüm H yüzdelerinde serbest basınç mukavemeti artmıştır. Benzer şekilde, Şekil 4.2, H yüzdesinin artmasıyla serbest basınç mukavemetinin düştüğünü göstermektedir. H yüzdesinin %2 olduğu numunelerde H/S oranının 2’den 4’e çıkarıldığında serbest basınç mukavemetinde %87, 5’e çıkarıldığında ise %164’lük artışlar meydana gelmiştir. H/S oranının 5 olduğu numunelerde ise H %30’dan %20, %10, %5 ve %2’ye düşürüldüğünde serbest basınç mukavemetinde sırasıyla yaklaşık 2, 5, 9, 17 ve 22 kat artış meydana gelmiştir. H yüzdesinin azalması ile serbest basınç mukavemetinin artması maliyet açısından da olumlu bir sonuçtur. Ayrıca farklı hızlandırıcı ve sertleştirici yüzdelerinde hazırlanan numunelerine ait örnek bir görüntü Şekil 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.1. Hızlandırıcı yüzdesinin serbest basınç mukavemetine etkisi



Şekil 4.2. Polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetine hızlandırıcı ve sertleştiricinin farklı yüzdelерinin etkisi



(a)

(b)

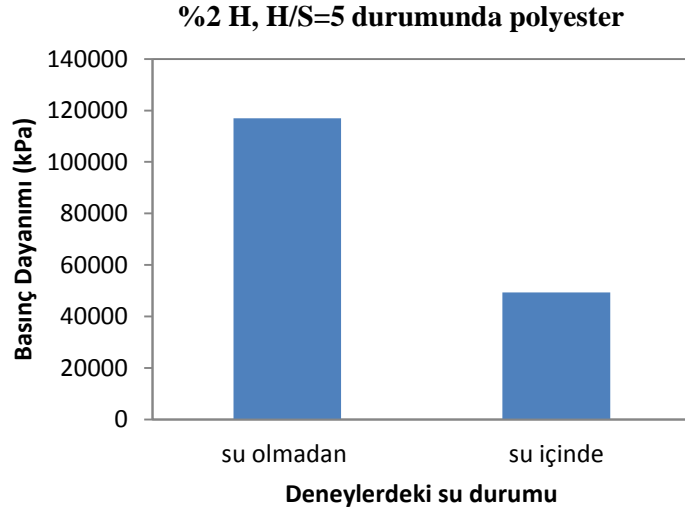
Şekil 4.3. Farklı hızlandırıcı ve sertleştirici yüzdesinde hazırlanan polyester numuneleri

- (a) Kalıptan çıkarılmış numuneler
- (b) Serbest basınç cihazında polyester numunesinin kırılması (%20 H oranı)

Polyester numuneleri hazırlanırken su kullanılmamaktadır. Bu sebeple, suya doymun zemin şartlarında polyesterin davranışını belirleyebilmek için su içerisinde de numuneler hazırlanarak (Şekil 4.4) serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Şekil 4.5'te de su içinde hazırlanan numune ile kuru hazırlanan numunelerin serbest basınç mukavemetleri verilmektedir. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi %2 H ve H/S oranının 5 olduğu ve suyun olmadığı durumda serbest basınç mukavemeti 117000 kPa iken su içerisinde hazırlanan numunenin serbest basınç mukavemeti %58 azalarak 49382 kPa olmuştur. Bu sonuç dikkate alındığında suya doymun zemin durumlarında da polyesterin kullanılabilceği söylenebilir.



Şekil 4.4. Su içerisinde hazırlanan polyester numunesi



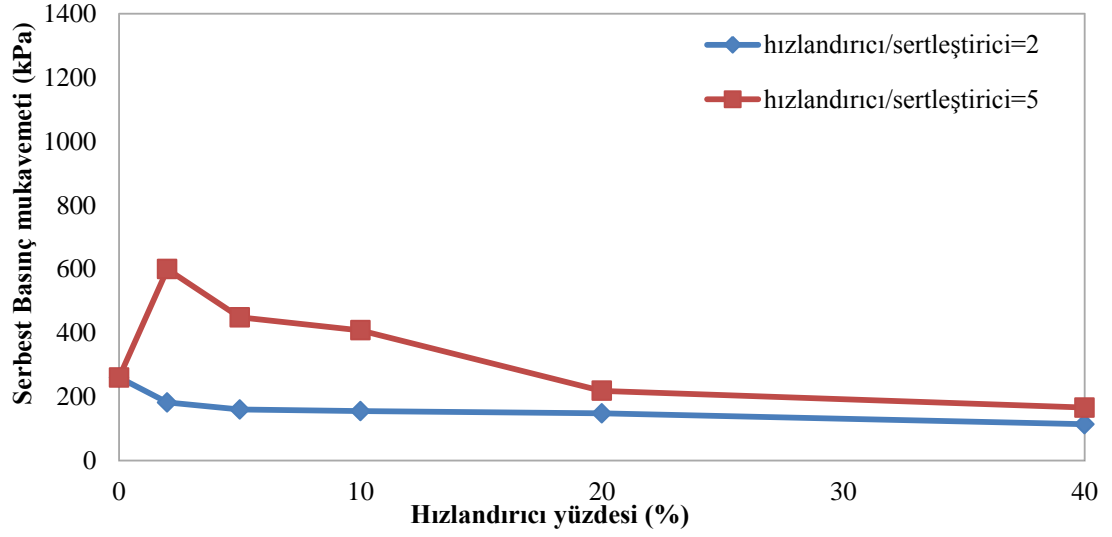
Şekil 4.5. Polyester numunesinin su içinde ve su olmadan serbest basınç mukavemeti

4.2. Kil-Polyester Numunelerinin Serbest Basınç Mukavemetleri

4.2.1. CL kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetleri

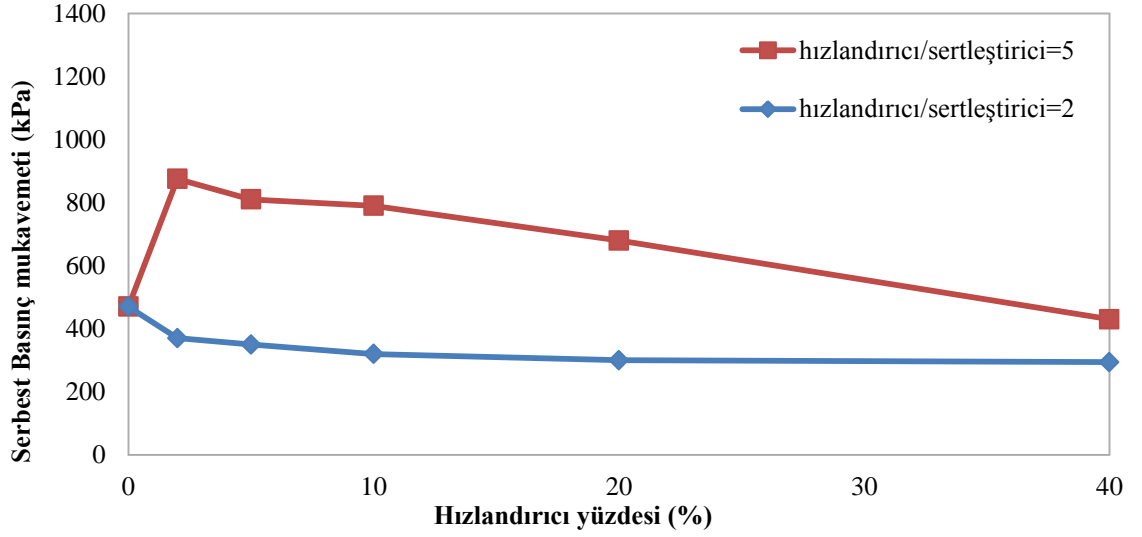
H yüzdesinin ve H/S oranının CL kili-polyester numuneleri üzerinde etkisinin belirlenebilmesi için likit limit kıvamında (%40 su muhtevası) ve %50 su muhtevası ile %10 polyester katkısında hazırlanan numunelere ait serbest basınç mukavemeti deney sonuçları sırasıyla Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilmektedir. Serbest basınç deneyleri öncelikle 7 günlük kür sürelerinde denenmiş ama numunelerin tam manasıyla sertleşmemesi sebebiyle 14 günlük kür sürelerinde deneyler yapılmıştır.

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 birlikte incelendiğinde, her iki su muhtevasında ve H/S oranının 2 olduğu numunelerde serbest basınç mukavemeti H yüzdesinin artması ile azalmaktadır. Buna karşın, H/S oranının 5 olduğu numunelerde özellikle %2 H yüzdesinde serbest basınç mukavemetleri artmıştır. %40 su muhtevasında yapılan deneylerde %50 su muhtevasında yapılan deneylere kıyasla daha yüksek serbest basınç mukavemetleri elde edilmiştir. Bu deney sonuçları dikkate alınarak sadece polyesterlerle yapılan deneylerde olduğu gibi CL kili-polyester numunelerinde de kullanılacak H’nin %2 (polyestere oranla), H/S oranının ise 5 olması gerektiğine karar verilmiştir.

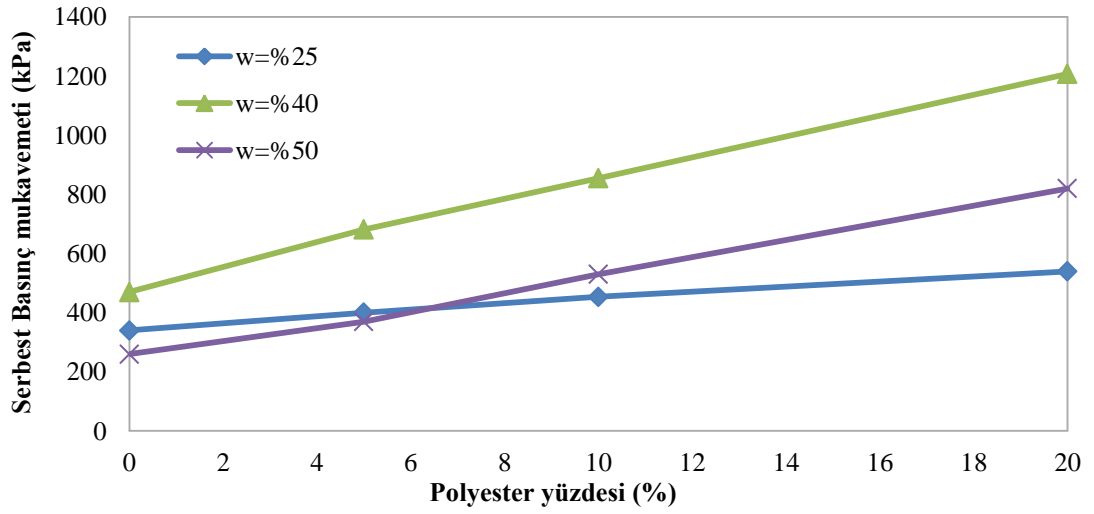


Şekil 4.6. %50 su muhtevası ve %10 polyester oranında CL kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetine H/S oranının etkisi

Şekil 4.8’de ise %2 H ve H/S oranı 5 alınarak farklı su muhtevalarında hazırlanan numunelerin serbest basınç mukavemetlerine polyester yüzdesinin etkisi verilmiştir. Deneysel su muhtevası olarak plastik limit (%25), likit limit (%40) ve likit limitin üzerindeki bir su muhtevası (%50) kullanılmıştır. Şekil 4.8’den de görüleceği gibi tüm su muhtevalarında polyester yüzdesinin artması ile serbest basınç mukavemeti artmıştır. Likit limit kıvamında hazırlanan numunelere polyesterin etkisi diğer su muhtevalarında hazırlanan numunelere kıyasla daha fazla olmuştur. Polyester katkısız kil numunelerinin %25, %40 ve %50 su muhtevalarında serbest basınç mukavemetleri sırasıyla 340 kPa, 470 kPa ve 260 kPa olarak elde edilmiştir. Aynı su muhtevaları ve %20 polyester katkısında ise serbest basınç mukavemetleri yine sırasıyla 540 kPa, 1207 kPa ve 820 kPa olarak elde edilmiştir. Likit limit kıvamında ki CL kiline %20 polyester katkısında serbest basınç mukavemeti yaklaşık olarak 4 kat artarak 1 MPa’ı geçmiştir. Şekil 4.9’da CL kili-polyester numunelerinin kırılma şekillerini gösteren iki resim verilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi polyester katkısındaki CL kili gevrek bir şekilde kırılmaktadır.



Şekil 4.7. %40 Su muhtevası ve %10 polyester oranında CL kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetine H/S oranının etkisi



Şekil 4.8. Polyester oranının farklı su muhtevalarında CL kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisi



(a)



(b)

Şekil 4.9. CL kili-polyester numunelerinin kırılması

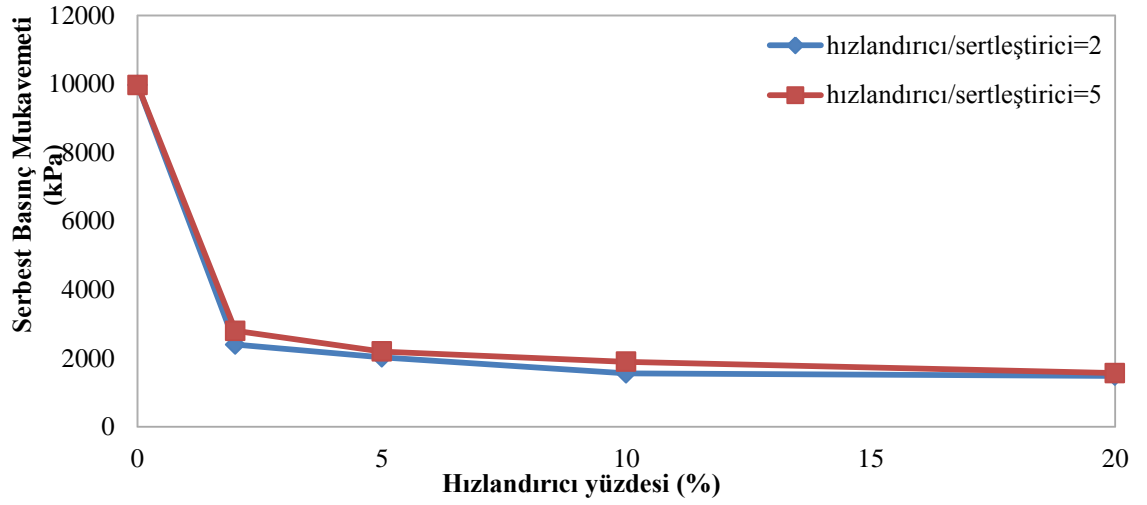
- (a) 45° açısı ile kırılan CL kili-polyester numunesi
- (b) Dikey yönde kırılan CL kili-polyester numunesi

4.2.2. CH Kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetleri

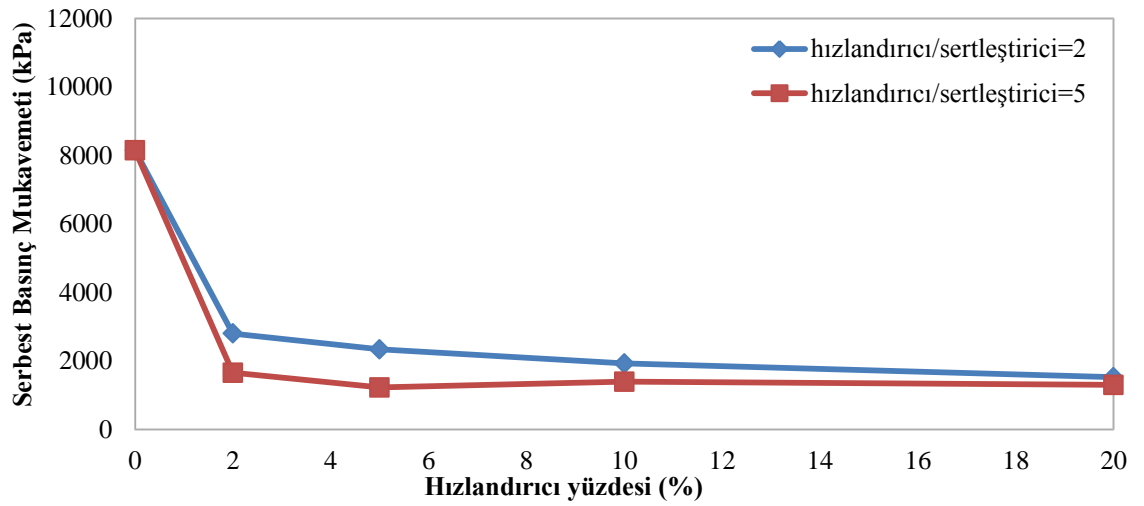
H yüzdesinin ve H/S oranının CH kili-polyester numuneleri üzerinde etkisinin belirlenebilmesi için %50 (plastik limit kıvamında numune hazırlanamadığı için) ve likit limit kıvamında (%90 su muhtevası) ve %10 polyester katkısında hazırlanan numunelere ait serbest basınç mukavemeti deney sonuçları sırasıyla Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de verilmektedir. Serbest basınç deneyleri öncelikle 7 günlük kür sürelerinde denenmiş ama numunelerin tam manasıyla sertleşmemesi sebebiyle 14 günlük kür sürelerinde deneyler yapılmıştır.

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 birlikte incelendiğinde, her iki su muhtevasında (%50 ve %90) ve H/S oranının 2 ve 5 olduğu numunelerde serbest basınç mukavemeti H yüzdesinin artması ile azalmaktadır. Bu deney sonuçları dikkate alınarak sadece polyesterlerle yapılan deneylerde olduğu gibi CH kili-polyester numunelerinde de kullanılacak H'nin %2 (polyestere oranla), H/S oranının ise 5 olması gerektiğine karar verilmiştir.

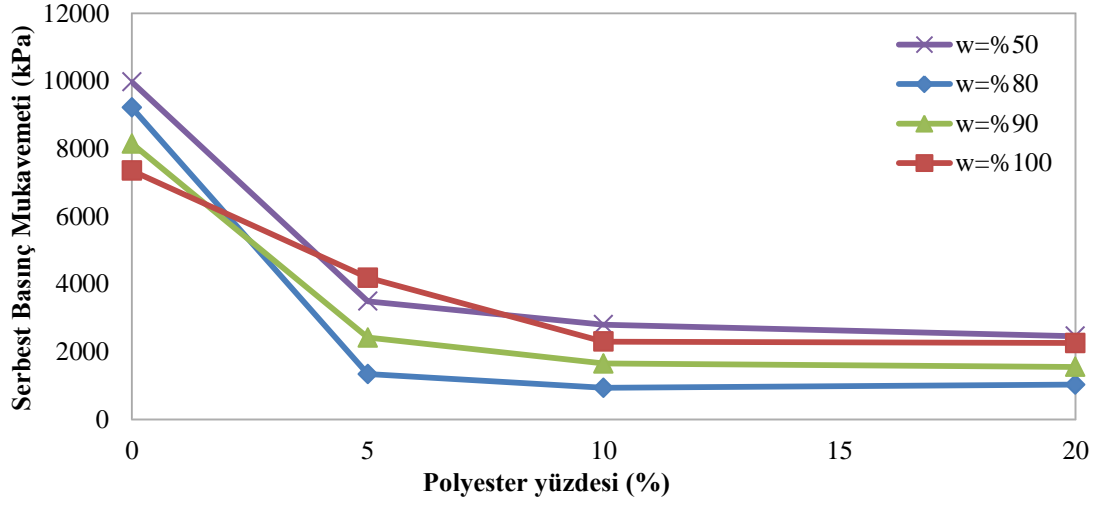
Şekil 4.12'de ise %2 H ve H/S oranı 5 alınarak farklı su muhtevalarında hazırlanan numunelerin serbest basınç mukavemetlerine polyester yüzdesinin etkisi verilmiştir. Deneylerde su muhtevası olarak %50, %80, %90 ve %100 kullanılmıştır. Şekil 4.12'den de görüleceği gibi tüm su muhtevalarında polyester yüzdesinin artması ile serbest basınç mukavemetleri azalmıştır. %5 polyester katkısında polyester katkısız CH kili numunelere kıyasla serbest basınç mukavemetlerinde büyük düşüşler olmuştur. Buna karşın %10 polyester yüzdelerinde azalış kısmen devam etmiş ama bu yüzdeden sonra %20 polyester katkısında %10'a göre bir değişiklik olmamıştır. CL kilinde olduğu gibi CH kilinde de gevrek kırılma görülmüştür (Şekil 4.13).



Şekil 4.10. %50 Su muhtevası ve %10 polyester oranında CH kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetine H/S oranının etkisi



Şekil 4.11. %90 Su muhtevası ve %10 polyester oranında CH kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetine H/S oranının etkisi



Şekil 4.12. Polyester oranının farklı su muhtevalarında CH kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisi



(b)

Şekil 4.13. CH kili-polyester numunelerinin kırılması

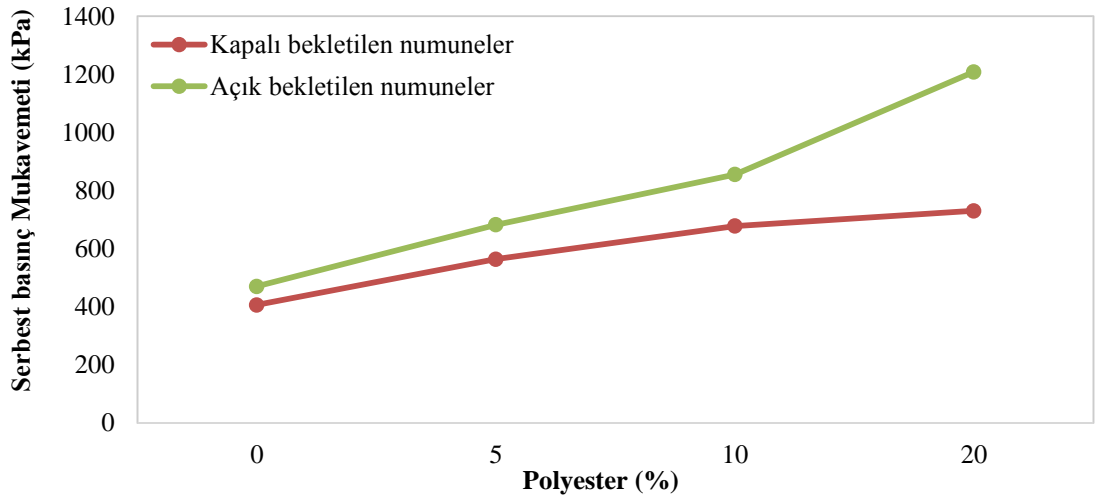
CH kili CL kilinden farklı davranarak polyester katkısı ile serbest basınç mukavemeti düşmüştür (Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12). Bu farklı davranışın sebebi olarak polyester katkısında CH kilinin daha boşluklu bir yapıya dönüşmüş olabileceği düşünülmektedir.

4.2.3. Kapalı kalıpta bekletilen kil-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetleri

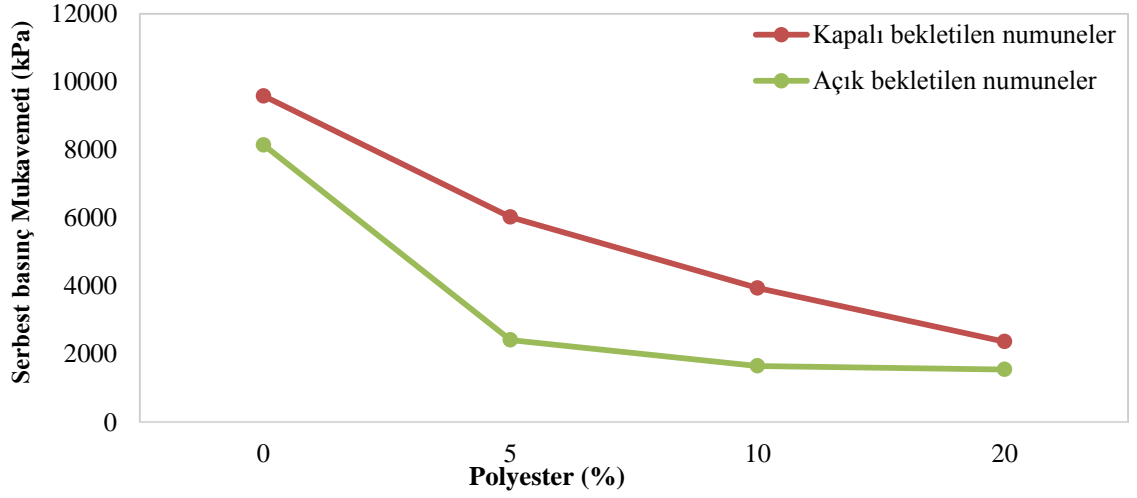
Kapalı olarak bekletilen ve likit limit kıvamında hazırlanan doğal kil ve polyester katkılı kil numuneleri 7 gün sonunda genel olarak sertleşmelerini tamamlayamamışlardır.

Sadece %20 polyester katkılı CL kili numuneleri kalıptan çıkarılacak sertliğe ulaşmıştır. Tüm numuneler 25 gün sonunda kalıptan çıkarılacak duruma geldikleri için, bu süre sonunda kalıptan çıkarılmışlardır ve 28 günlük serbest basınç mukavemet deneyleri yapılmıştır. Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te CL ve CH kili-polyester numunelerinin açıkta bekletilen ve kapalı olarak bekletilen numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin kıyaslaması verilmektedir. En yüksek değerler %20 polyester katkılı CL kili numunelerinden elde edilmiştir.

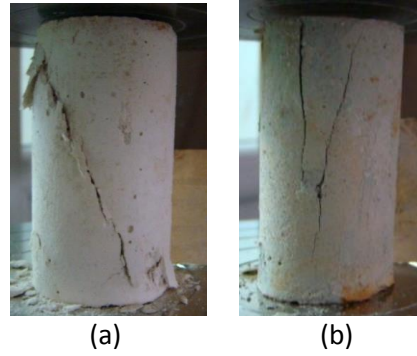
Şekil 4.14'te görüldüğü gibi açıkta bekletilen numunelerin mukavemeti kapalı halde bekletilenlere göre %20 polyester katkısı hariç yaklaşık %20 olmuştur. %20 polyester katkısında ise yaklaşık %60'lık mukavemet kaybı elde edilmiştir. Buna karşın, CH kili üzerinde yapılan deneylerde kapalı olarak bekletilen numuneler daha yüksek serbest basınç mukavemeti değerleri vermiştir (Şekil 4.15). Ayrıca CH kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetleri hem açık bekletilenlerde hem de kapalı bekletilenlerde katkısız CH kiline göre azalmıştır. Şekil 4.16'da numunelerin kırılma şekillerini gösteren fotoğraflar incelendiğinde görüleceği gibi kapalı bekletilen numuneler de yine açık bekletilenler gibi gevrek kırılmıştır.



Şekil 4.14. Polyester oranının kapalı ve açıkta bekletilen CL kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisi



Şekil 4.15. Polyester oranının kapalı ve açıkta bekletilen CH kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisi



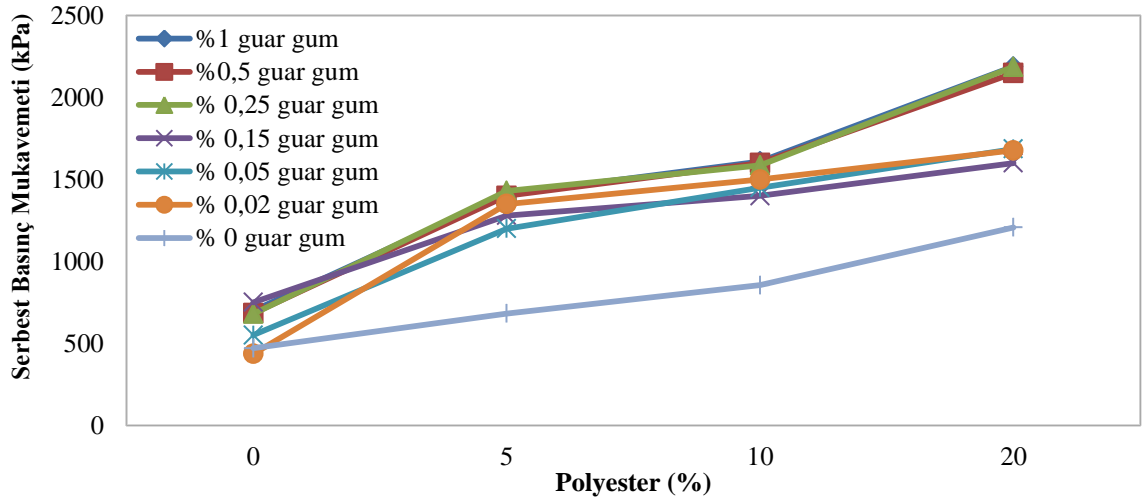
Şekil 4.16. Kapalı halde bekletilen numunelerin kırılması

- (a) Kapalı halde hazırlanan CL kili-polyester numunesinin kırılması
- (b) Kapalı halde hazırlanan CH kili-polyester numunesinin kırılması

4.3. Kil-Polyester-Biyopolimer Numunelerinin Serbest Basınç Mukavemetleri

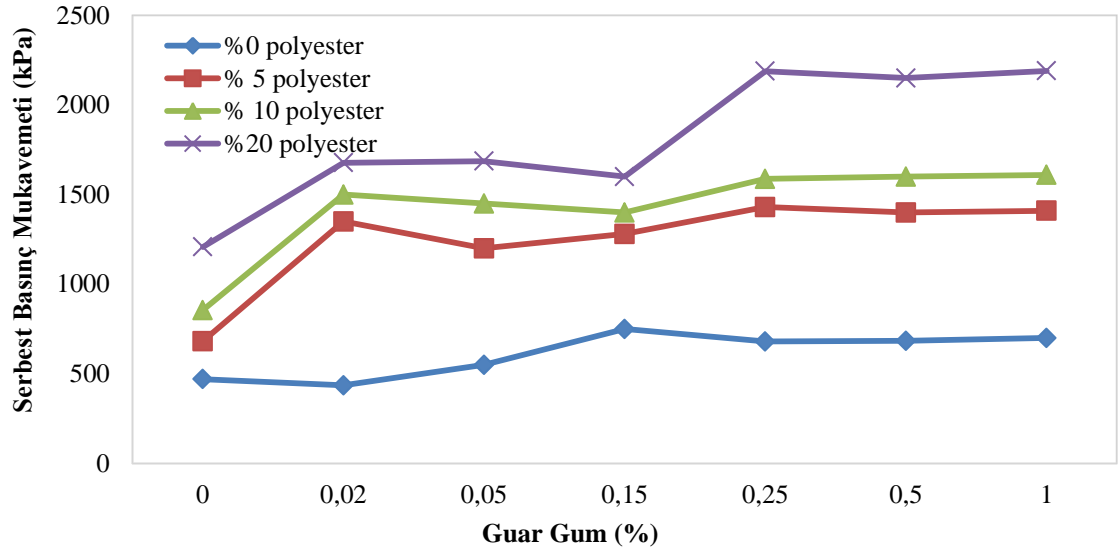
4.3.1. CL kili-polyester-biyopolimer numunelerinin serbest basınç mukavemetleri

CL kili-polyester numunelerine biyopolimer katkısının etkisini incelemek amacıyla kil su karışımının toplam ağırlığın %1, 0.5, 0.25, 0.15, 0.05 ve 0.02 oranlarında GG biyopolimeri numunelere katılmıştır. Şekil 4.17 incelendiğinde görüleceği gibi tüm GG yüzdeleri CL kili-polyester katkılarının serbest basınç mukavemetini artırmıştır. Yine Şekil 4.18 incelendiğinde doğal CL kilinin serbest basınç mukavemetine GG'in önemli bir etkisinin olmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.17. Polyester oranının CL kili-polyester-GG numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisi

Şekil 4.18'e göre GG %0.02 ve %0.25 oranlarında CL kili polyester karışımlarının serbest basınç mukavemetine önemli miktarlarda artırmıştır. Diğer GG oranlarda ise önemli değişiklikler olmamıştır. %20 polyester katkılı CL kilinin biyopolimersiz serbest basınç mukavemeti 1207 kPa iken %0.02 GG katkısında %39 artarak 1678 kPa olmuştur. Benzer şekilde %0.25 GG katkısında ise serbest basınç mukavemeti %81 artarak 2188 kPa olmuştur. Bu artışlara benzer artışlar %5 ve %10 polyester katkılarında da elde edilmiş ve tüm polyester yüzdeleri ile biyopolimer yüzdelerinde numunelerin serbest basınç mukavemetleri 1 MPa'ı geçmiştir (Şekil 4.17 ve Şekil 4.18). Ayrıca biyopolimer katkısı numunelerin kırılma şeklini değiştirmemiş ve gevrek kırılma elde edilmiştir (Şekil 4.19). Biyopolimerin çok düşük yüzdeler kullanıldığı halde büyük serbest basınç mukavemeti artışları vermesi sebebiyle polyester ve biyopolimerin CL kilinin derin karıştırma ile iyileştirmesinde birlikte kullanılabilceği söylenebilir.



Şekil 4.18. GG oranının CL kili-polyester-biopolimer numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisi

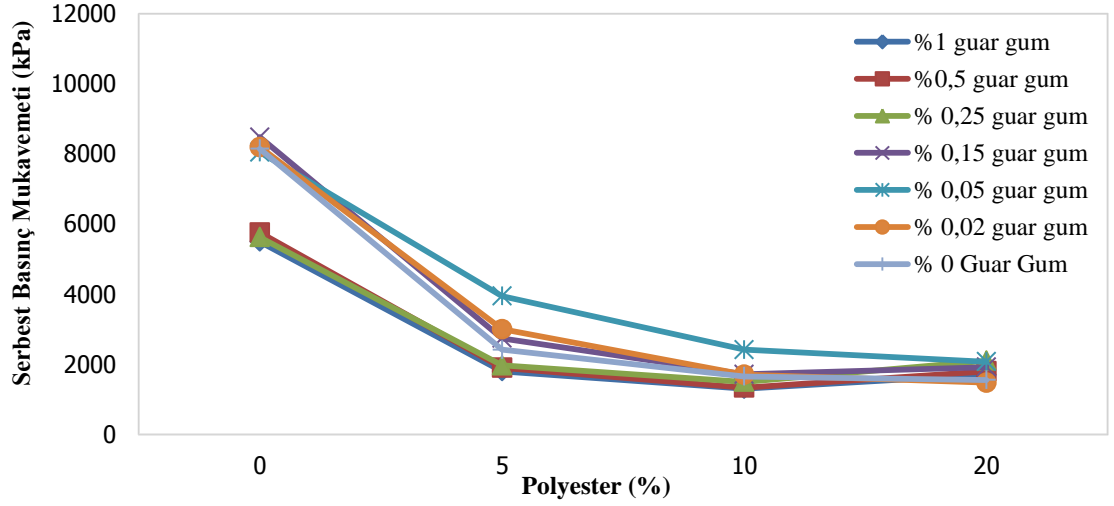


Şekil 4.19. CL kili-polyester-biopolimer numunesinin kırılması

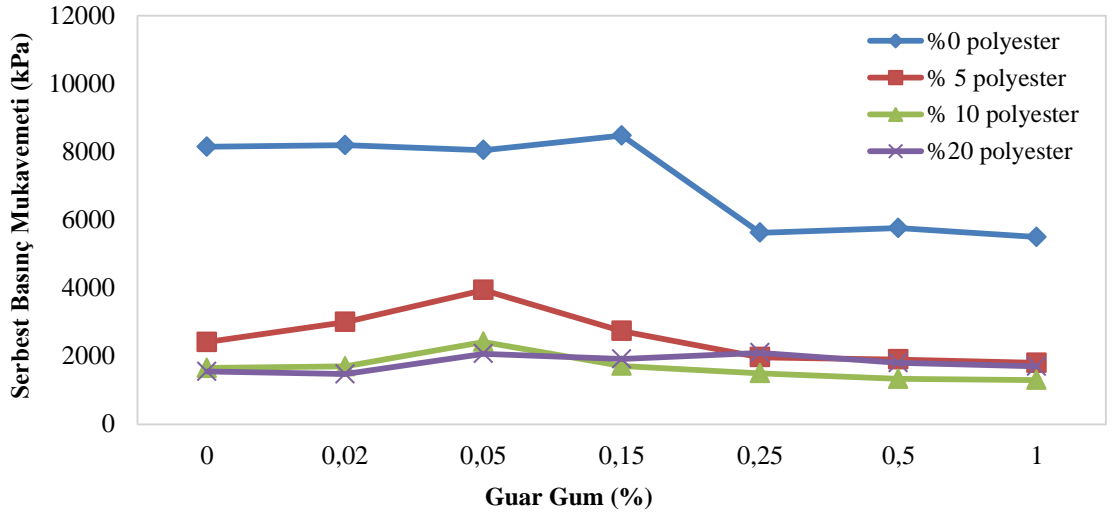
4.3.2. CH kili-polyester-biopolimer numunelerinin serbest basınç mukavemetleri

CH kili-polyester numunelerine biyopolimer katkısının etkisini incelemek amacıyla kil su karışımının toplam ağırlığın %1, 0,5, 0,25, 0,15, 0,05 ve 0,02 oranlarında GG biyopolimeri numunelere katılmıştır. Şekil 4.20 incelendiğinde görüleceği gibi tüm GG yüzdeleri CH kili-polyester katkılarının serbest basınç mukavemetini düşürmüştür. Yine Şekil 4.21 incelendiğinde doğal CH kilinin serbest basınç mukavemeti %0,25, %0,05 ve

%1 GG katkılarında azalmıştır. Her iki grafik incelendiğinde GG'nin CH kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetine önemli bir etkisinin olmadığı söylenebilir. Ayrıca biyopolimer katkısı numunelerin kırılma şeklini değiştirmemiş ve yine gevrek kırılma elde edilmiştir (Şekil 4.22).



Şekil 4.20. Polyester oranının CH kili-polyester-biyopolimer numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisi

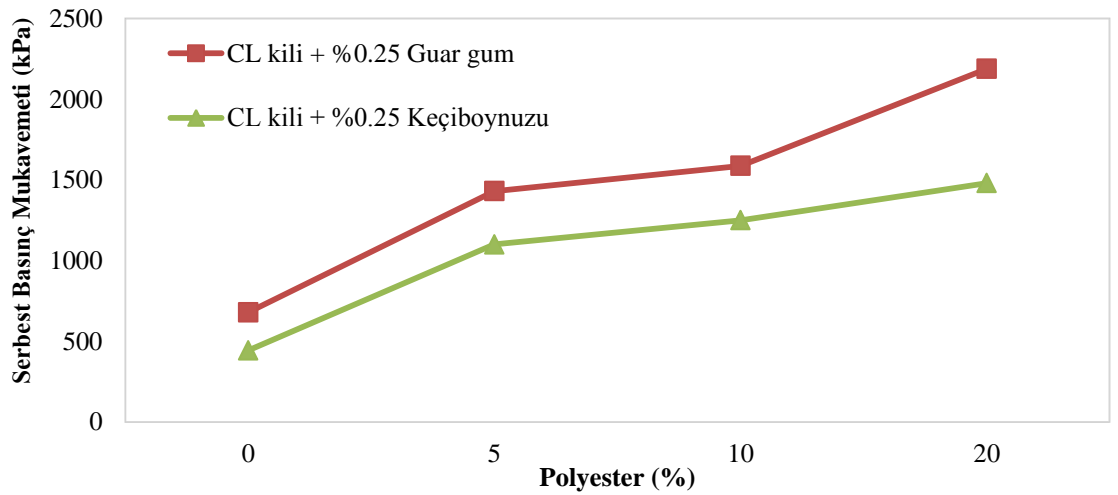


Şekil 4.21. GG oranının CH kili-polyester-biyopolimer numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisi



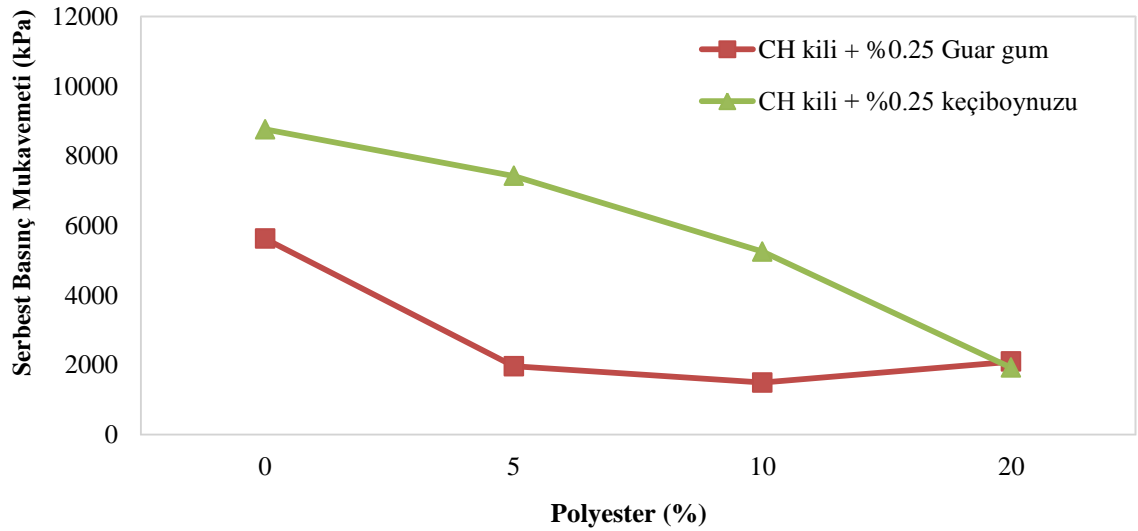
Şekil 4.22. CH kili-polyester-biyopolimer numunesinin kırılması

Biyopolimer çeşidinin kil-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisini inceleyebilmek için %0.25 oranında KG ile GG ayrı ayrı kil-polyester karışımlarına (likit limit kıvamında) katılarak 14 günlük serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.23 ve Şekil 4.24 verilmektedir. Şekil 4.23 incelendiğinde KG'ı katkısının da GG gibi CL kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetini artırdığı anlaşılmaktadır. GG keçiyoynuzuna guma göre ortalama %30 daha yüksek serbest basınç mukavemeti değerleri vermiştir.



Şekil 4.23. GG ile KG oranının CL kili-polyester-biyopolimer numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisi

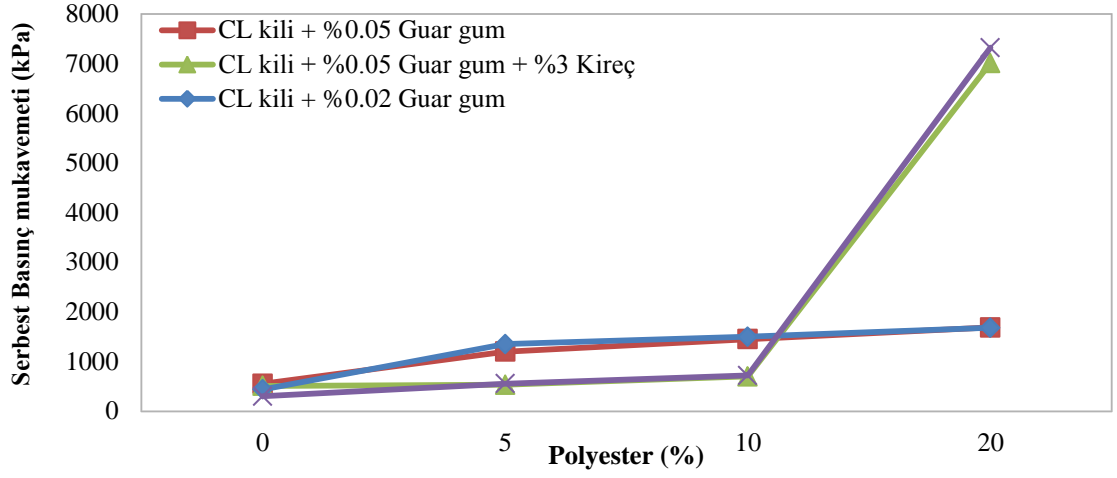
KG'ı da GG gibi CH kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetini düşürmüştür (Şekil 4.24). Polyester katkısız CH kiline KG'ı katılınca yaklaşık olarak GG'a kıyasla serbest basınç mukavemetinde yaklaşık %50 artış olmuştur. Yine, keçiyoynuzu gamı guar gama kıyasla %5 ve %10 polyester katkılı CH kili numunelerinde daha yüksek serbest basınç mukavemeti değerleri vermiştir. Buna karşın %20 polyester katkılı numunelerde ise her iki gumda aynı serbest basınç mukavemetini vermektedir (Şekil 4.24). Bu sonuçlara göre kil-polyester numunelerinde biyopolimer çeşidinin çok önemli olmadığı söylenebilir.



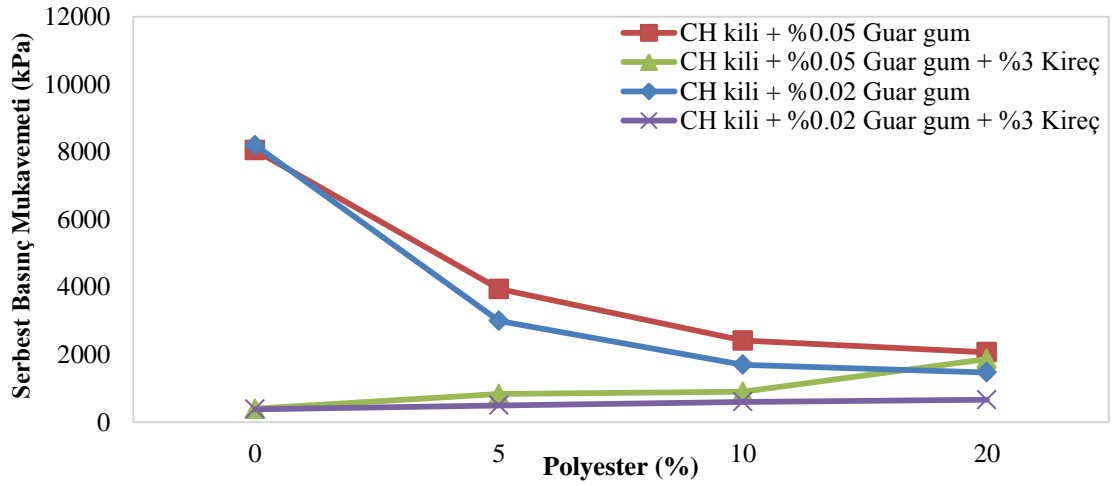
Şekil 4.24. GG ile KG oranının CH kili-polyester-biyopolimer numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisi

4.4. Kil-Polyester-Biyopolimer-Kireç (PBK) Numunelerinin Serbest Basınç Mukavemetleri

Önceki bölümlerde elde edilen sonuçlar dikkate alınarak polyester ve biyopolimer katkılarına, daha yüksek serbest basınç mukavemetleri elde edilmek için ek olarak kil zeminlerin iyileştirmesinde sıklıkla kullanılan kireç %3 oranında numunelere katılmıştır. Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da sırasıyla GG ve kireç katkılı CL ve CH killerinin serbest basınç mukavemetine polyester oranının etkisi verilmiştir.



Şekil 4.25. Polyester oranının GG ve kireç katkılı CL kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisi



Şekil 4.26. Polyester oranının GG ve kireç katkılı CH kili-polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisi

Şekil 4.25'te görüldüğü gibi %5 ve %10 polyester oranlarında kireç katkısının önemli bir etkisinin olmamasına rağmen %20 polyester oranında kireç katkısız numuneye kıyasla serbest basınç mukavemeti yaklaşık 5 kat artarak 7323 kPa olmuştur. Yine Şekil 4.25 incelendiğinde GG yüzdesinin %0.05 olmasının olumlu bir katkısının olmadığı görülmektedir. %0.05 GG katkısında CL kili-polyester-kireç katkılı numunenin serbest basınç mukavemetide 7012 kPa olarak elde edilmiştir. Ayrıca, Şekil 4.26'dan görüleceği gibi kireç katkısı, CH kili-polyester-biyopolimer numunelerinin serbest basınç mukavemetine olumlu bir etki göstermemiştir.

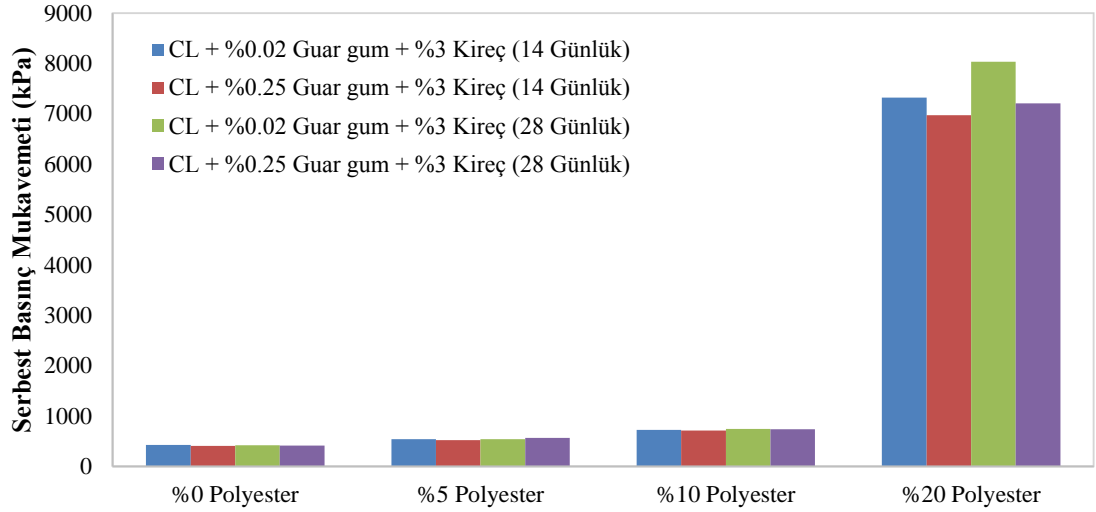
7 MPa ve üzeri serbest basınç mukavemetlerinin elde edilmesi derin karıştırma ile iyileştirmede beklenen değerlerin çok üzerindedir. Literatürde, derin karıştırma ile iyileştirmede beklenen serbest basınç mukavemetleri 0.5-5 MPa arasındadır (Bruce and Bruce 2003). Ayrıca diğer zemin iyileştirme yöntemleri (enjeksiyon, Jetgrot v.b.) de düşünüldüğünde bu çalışma da CL kili için elde edilen serbest basınç mukavemetlerinin çok yüksek olduğu söylenebilir.

Polyester, biyopolimer ve kireç katkılı CL ve CH killeri üzerinde yapılan serbest basınç mukavemeti deneylerinden elde edilen sonuçlara göre CL kili bu katkıların birlikte kullanıldığı durumlarda yüksek mukavemet değerleri vermektedir. Bunun aksine, CH polyester, polyester-biyopolimer ve polyester-biyopolimer-kireç katkılı tüm numunelerde serbest basınç mukavemetinin düştüğü belirlenmiştir. Bu sebeple deneylerin CL kili üzerinde devam ettirmesine karar verilmiştir.

4.5. CL Kili-Polyester-Biyopolimer-Kireç (PBK) Numunelerinin Serbest Basınç Mukavemetlerine Kür Süresinin Etkisi

Kür süresinin polyester, biyopolimer, kireç katkılı CL kili numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisini inceleyebilmek için 14 ve 28 günlük kür sürelerine tabi tutulan 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 polyester yüzdesinin etkisi ise Şekil 4.27’de verilmiştir. Gerilme-deformasyon grafikleri ve Şekil 4.27 incelendiğinde kür süresinin numunelerin serbest basınç mukavemetleri üzerinde kısmen etili olduğu görülmektedir. %0.02 GG katkılı %20 polyester numunelerinin 28 günlük serbest basınç mukavemetleri 14 günlük serbest basınç mukavemetlerine göre sadece %10 artarak 7323 kPa’dan 8034 kPa’a yükselmiştir. Benzer şekilde %0.25 GG katkılı %20 polyester numunelerinin 28 günlük serbest basınç mukavemetleri yaklaşık olarak %3 artarak 6973 kPa’dan 7207 kPa’a yükselmiştir. Bu sonuçlar dikkate alındığında CL Kili-PBK numunelerinin 14 günlük kürden sonra önemli bir mukavemet artışı göstermedikleri söylenebilir. Bu bağlamda,14

günlük gibi kısa bir sürede 8 MPa üzerinde serbest basınç mukavemetine ulaşması sebebiyle %20 polyester katkılı CL Kili-PBK numunesi düşük plastisiteli kil zeminlerin derin karıştırma ile iyileştirmesinde kullanılabileceği söylenebilir.



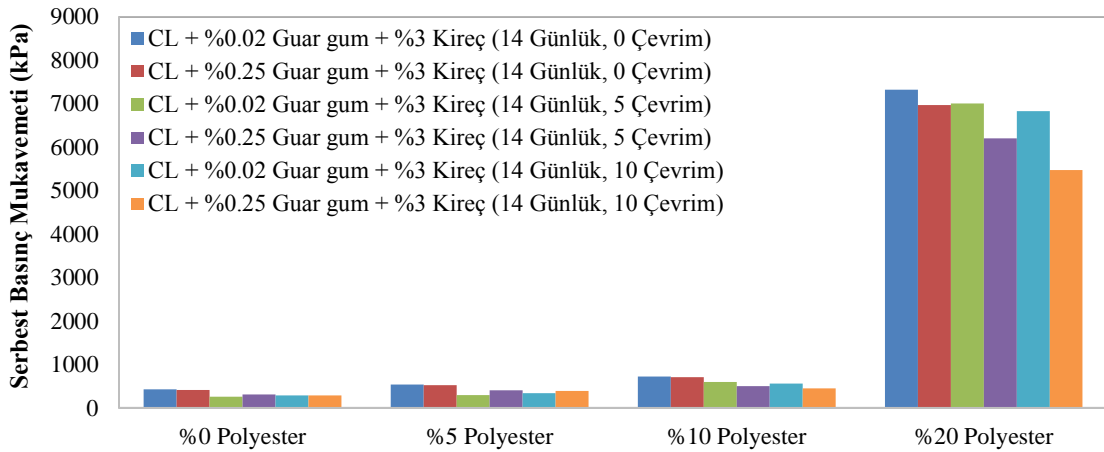
Şekil 4.27. 14 ve 28 günlük CL Kili-PBK numunelerinin serbest basınç mukavemetine polyester oranının etkisi

4.6. CL Kili-Polyester-Biyopolimer-Kireç (PBK) Numunelerinin Donma-Çözülme Davranışı

Donma-çözülmenin polyester, biyopolimer, kireç katkılı CL kili numunelerinin serbest basınç mukavemetine etkisini inceleyebilmek için 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 sayısı ve polyester yüzdesinin etkisi Şekil 4.28 ve Şekil 4.29’da verilmiştir. Gerilme-deformasyon grafikleri ve Şekil 4.28 incelendiğinde 14 günlük numunelere uygulanan donma-çözülme çevriminin serbest basınç mukavemetleri üzerinde kısmen etkili olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, Şekil 4.29 incelendiğinde 28 günlük numunelere uygulanan donma-çözülme çevriminin

serbest basınç mukavemetleri üzerinde kısmen etkili olduğu görülmektedir. Yine şekillerden %0.02 GG katkılı numunelerin %0.25 GG katkılı numunelere oranla donma-çözülme çevriminden daha az etkilendiği anlaşılmaktadır.

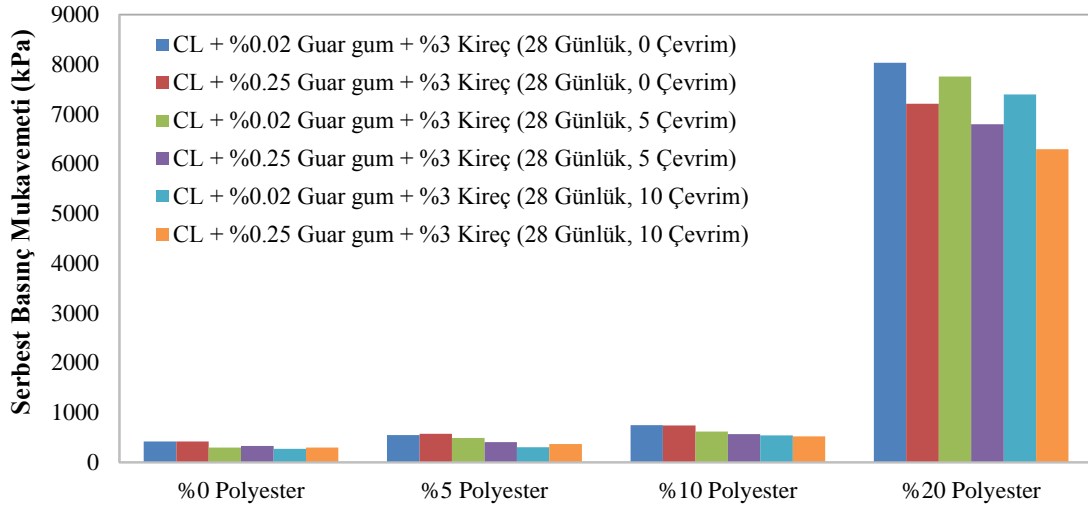
Şekil 4.28’de verilen 14 günlük numunelerin serbest basınç mukavemetleri incelendiğinde, %0.02 GG katkılı %20 polyester numunelerini serbest basınç mukavemetleri donma-çözülmenin 5 ve 10 çevrimi sonrasında sırasıyla yaklaşık %3 ve %7 azalarak 7323 kPa’dan 7008 kPa ve 6830 kPa’a düşmüştür. %0.25 GG katkılı %20 polyester numunelerini serbest basınç mukavemetleri ise donma-çözülmenin 5 ve 10 çevrimi sonrasında sırasıyla yaklaşık %10 ve %20 azalarak 6973 kPa’dan 6202 kPa ve 5475 kPa’a düşmüştür.



Şekil 4.28. 14 günlük CL Kili-PBK numunelerinin serbest basınç mukavemetine donma-çözülmenin etkisi

Şekil 4.29’da verilen 28 günlük numunelerin serbest basınç mukavemetleri incelendiğinde, %0.02 GG katkılı %20 polyester numunelerini serbest basınç mukavemetleri donma-çözülmenin 5 ve 10 çevrimi sonrasında sırasıyla yaklaşık %4 ve %8 azalarak 8033 kPa’dan 7754 kPa ve 7396 kPa’a düşmüştür. %0.25 GG katkılı %20 polyester numunelerini serbest basınç mukavemetleri donma-çözülmenin 5 ve 10 çevrimi sonrasında sırasıyla yaklaşık %6 ve %13 azalarak 7207 kPa’dan 6794 kPa ve

6292 kPa'a düşmüştür. 28 günlük %0.25 GG katkılı numuneler 14 günlük numunelere oranla donma-çözülme çevrimlerinde daha az etkilenmiştir.



Şekil 4.29. 28 günlük CL Kili-PBK numunelerinin serbest basınç mukavemetine donma-çözülmenin etkisi

Bu sonuçlar dikkate alındığında %0.02 GG katkılı CL Kili-PBK numunelerinin donma-çözülme çevrimlerinden kısmen etkilendiği söylenebilir. Bu bağlamda, 28 günlük donma-çözülmenin 10 çevrimine tabi tutulmuş %0.02 GG ve %20 polyester katkılı CL Kili-PBK numunelerinin 7 MPa üzerinde serbest basınç mukavemetine ulaşması sebebiyle bu numunenin donma-çözümeye maruz düşük plastisiteli kil zeminlerin derin karıştırma ile iyileştirmesinde kullanılabileceği söylenebilir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, düşük plastisiteli (CL) ve yüksek plastisiteli (CH) killerin derin karıştırma ile iyileştirilmesinde doymamış polyestere ve biyopolimerlerin kullanılabilirliği araştırılmak amacıyla serbest basınç mukavemeti ve donma-çözülme deneyleri yapılmıştır. Doymamış polyester için en uygun H ve S oranlarının belirlenmesinden sonra doymamış polyester toplam ağırlığın %5, %10 ve %20'si miktarlarında kullanılmıştır. Ayrıca, daha yüksek serbest basınç mukavemetleri elde edebilmek için farklı yüzdelerde biyopolimer ve %3 kireçte deneylerde kullanılmıştır. Deneylerden elde olunan sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

Doymamış polyester deneylerinde, %2 H (polyestere oranla) ve H/S oranının 5 olduğu numuneler 117 MPa ile en yüksek serbest basınç mukavemetini vermiştir. H yüzdesinin azalması ve H/S oranının artmasıyla serbest basınç mukavemeti artmıştır. H miktarının azalmasıyla numunelerin kırılma şekilleri sünekten gevreye dönmüştür. Su içerisinde yapılan polyester deneylerinde serbest basınç mukavemeti %58 azalarak yaklaşık 50 MPa olmuştur. Mukavemette düşüş olmasına rağmen elde edilen 50 MPa'lık değer sebebiyle suya doymamış zemin durumlarında da polyestere kullanılabilmesi söylenebilir.

H, S, polyester, biyopolimer ve kirecin kullanıldığı CH kili üzerinde yapılan serbest basınç mukavemeti deneylerinin tümünde olumlu sonuçlar alınamamış ve serbest basınç mukavemetlerinin azaldığı belirlenmiştir. Bu sebeple, doymamış polyester kullanılarak yüksek plastisiteli killerin derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilemeyeceği söylenebilir.

H yüzdesinin ve H/S oranının CL kili-polyester numuneleri üzerinde etkisinin belirlenebilmesi için likit limit kıvamında (%40 su muhtevası) ve %50 su muhtevası ile %10 polyester katkısında hazırlanan numuneler üzerinde yapılan serbest basınç mukavemeti deneyleri sonucunda, %2 H (polyestere oranla) ve H/S oranının 5 olduğu numunelerin en yüksek değerleri verdikleri belirlenmiştir. Bu oranlar kullanılarak hazırlanan likit limit kıvamında ki CL kiline %20 polyester katkısında serbest basınç mukavemeti yaklaşık olarak 4 kat artarak 1 MPa'ı geçmiştir.

Numunelerin açık veya kapalı bekletilerek kür edilmelerinin serbest basınç mukavemeti üzerinde önemli bir katkının olmadığı belirlenmiştir.

GG biyopolimerinin farklı yüzdelerinde CL kili-polyester numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç mukavemeti deneyleri sonucunda, %0.02 ve %0.25 GG miktarının serbest basınç mukavemetini sırasıyla 1678 kPa ve 2188 kPa'a yükselttiği belirlenmiştir. Biyopolimerin çok düşük yüzdeler kullanıldığı halde büyük serbest basınç mukavemeti artışları vermesi sebebiyle polyester ve biyopolimerin CL kilinin derin karıştırma ile iyileştirmesinde birlikte kullanılabilceği söylenebilir.

Farklı biyopolimerler (GG ve KG) kullanılarak CL kili-polyester numuneleri üzerinde yapılan deneylerden biyopolimer çeşidinin serbest basınç mukavemeti üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

%0.02 GG katkısında CL kili üzerinde yapılan deneylerden, %5 ve %10 polyester oranlarında kireç katkısının önemli bir etkisinin olmadığı ama %20 polyester oranında kireç katkısız numuneye kıyasla serbest basınç mukavemetinin yaklaşık 5 kat artarak 7323 kPa olduğu belirlenmiştir. %0.05 GG katkısında CL kili-polyester-kireç katkılı numunenin ise serbest basınç mukavemeti 7012 kPa olarak elde edilmiştir.

7 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 0.2-5 MPa arasındadır (Bruce and Bruce 2003). Ayrıca diğer zemin iyileştirme yöntemleri (enjeksiyon, Jetgrot v.b.) de düşünüldüğünde bu çalışma da CL kili için elde edilen serbest basınç mukavemetlerinin çok yüksek olduğu söylenebilir.

Kür süresinin numunelerin serbest basınç mukavemetleri üzerinde yaklaşık olarak %10 miktarında kısmen etkili olmaktadır. Diğer bir ifade ile CL Kili-PBK numunelerinin 14 günlük kürden sonra önemli bir mukavemet artışı göstermedikleri söylenebilir. Bu bağlamda, 14 günlük gibi kısa bir sürede 8 MPa üzerinde serbest basınç mukavemetine ulaşması sebebiyle %20 polyester katkılı CL Kili-PBK numunesi düşük plastisiteli kil zeminlerin derin karıştırma ile iyileştirmesinde kullanılabilceği söylenebilir.

CL kili-PBK numunelerinin serbest basınç mukavemeti üzerinde donma-çözülme çevriminin kısmen etkili olduğu hem 14 günlük hem de 28 günlük numunelerden tespit edilmiştir. Ayrıca, %0.02 GG katkıli numunelerin %0.25 GG katkıli numunelere oranla donma-çözülme çevriminden daha az etkilendiği belirlenmiştir. %0.02 GG katkıli 14 günlük %20 polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetleri donma-çözülmenin 5 ve 10 çevrimi sonrasında sırasıyla yaklaşık %3 ve %7 azalırken, 28 günlük numunelerde bu oran sırasıyla %4 ve %8 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, %0.25 GG katkıli 14 günlük %20 polyester numunelerinin serbest basınç mukavemetleri donma-çözülmenin 5 ve 10 çevrimi sonrasında sırasıyla yaklaşık %10 ve %20 azalırken, 28 günlük numunelerde bu oran sırasıyla %6 ve %13 olarak belirlenmiştir. Sonuçta, 28 günlük donma-çözülmenin 10 çevrimine tabi tutulmuş %0.02 GG ve %20 polyester katkıli CL Kili-PBK numunelerinin 7 MPa üzerinde serbest basınç mukavemetine ulaşması sebebiyle bu numunenin donma-çözümeye maruz düşük plastisiteli kil zeminlerin derin karıştırma ile iyileştirmesinde kullanılabileceği söylenebilir.

Doymamış polyester ve biyopolimerlerin killerin (özellikle düşük plastisiteli killerin) iyileştirilmesinde kullanımında daha kesin yargılar varabilmek için hidrolik iletkenlik, şişme ve konsolidasyon deneyleride yapılmalıdır. Ayrıca söz konusu polimer ile killerin davranışını açıklayabilmek için bazı elektrokinetik (pH, EC, zeta potansiyeli, BET gibi) deneyler, XRD, SEM ve TGA analizlerinin yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2010. <http://www.tekstilokulu.net/smfforum/index.php?topic=39.0>
- Anonim, 2012. <http://biyoplastik.blogspot.com/2012/12/biyopolimerlere-giris-biyopolimer-nedir.html>
- Anonim, 2013a. <http://tr.wikipedia.org/wiki/Kil>
- Anonim, 2013b. <http://polimer.nedir.com/#ixzz2UILKNTha>
- Anonim, 2013c. www.hammaddeler.com
- Anonymous, 2012. Deep soil mixing, Brochure 32-01 E
- Anonymous, 2013. <http://en.wikipedia.org/wiki/Freeze-thaw>
- 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 dependent parameters of cement and lime stabilized soils", Proc. 2nd International Conference on ground Improvement Geosystems-IS Tokya 96, Grouting and Deep Mixing, Tokyo 1996, Vol. 1, 387-392.
- Ahnberg, H., Holm G. 1996. "Stabilization of some Swedish organic soils with different types of binder" Dry mix methods for Deep soil stabilization, Brendenberg, Holm and Broms, eds. Balkema, Rotterdam, 101-108.
- 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.
- 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.
- Akın, E., 2007. "Mermer tozları ve uçucu kül ile polimer esaslı kompozit malzeme üretimi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Altun, S., 2010. "Zemin iyileştirme yöntemleri, derin temeller ve uygulama örnekleri", Ege Üniversitesi, İnşaat mühendisleri odası İzmir şubesi.
- 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.
- Aoi, M., 2002. Execution procedure of Japanese dry method (DJM). Proc. Tokyo Workshop 2002 on Deep. Mixing, Tokyo, 91-101.
- 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 storage tanks using deep mixing", GEODENVER 2000 Denver, Colorado, USA.
- Bergado, D.T., Lorenzo, G.A., 2005. "Economical mixing method for cement deep mixing", GSP 136 Innovations in Grouting and Soil Improvement.
- 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.A., Bruce, M.E.C., Dimileo, A., 1998. "Deep mixing method: A global perspective", ASCE Geotechnical Special Publication, No,81, 1-15.

- Bruce, D., Bruce, M., 2003. "The Practitioner's guide to deep mixing", Grouting and Ground Treatment, 474-488.
- 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 and macrostructure of soils", Proc., Int. Symp. on Frozen Soil Impacts of Agric., Range, and Forest Lands, Spokane, Wash., 1990; 145-155.
- DJM Association, 2002. DJM-Dry Jet Mixing Method Bulletin as of 2002.
- 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.
- Durmuşoğlu, E., Çorapçioğlu, M.Y., "Experimental study of horizontal barrier formation by colloidal silica", *Journal of Environmental Engineering*, 126: 833-841 (2000).
- Gupta, S.C., Hooda, K.S., Mathur, N.K., Gupta, S., 2009. "Tailoring of Guar gum for desert sand stabilization", *Indian Journal of Chemical Technology*. Vol. 16, 507-512
- Gürü, M., Tekeli, S., Akin, E., 2007. "Manufacturing of polymer matrix composite material using marble dust and fly ash", *Key Engineering Materials*, Volume 336-338 II, 1353-1356.
- Hartlen, J., Holm, G. 1995. "Deep Stabilization of Soft Soils With Lime-Cement Columns" *Proceedings of Bellgt B. Broms Symposium on Geotechnical Ellgilleerillg*, 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.
- Kaya, F., 2004. Ana Hatları ile Yapıştırıcılar. Birsen Yayınevi, 318 sayfa.
- Karol, R., "Chemical Grouting and Soil Stabilization", *Marcel Decker Inc*, New York, 135-140, 145-163, 166-239 2003.
- Lewsley, 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., 2006. "Fundamental Characteristics of Cement-Admixed CLay in Deep Mixing", *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18, 2, 161-174.
- 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.
- 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.
- Mitchell, J.K., Soga, Wiley, J., Sons, "Soil Formation and Soil Deposits".
- Moseley, M.P., and Kirsch, K., "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.
- Önalp, A., 1983. İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi. Cilt II Karadeniz Üniversitesi Yayın No: 3, Trabzon, 1225s.
- 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.
- 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 Engineering*, Bangalore, India, I, pp 69- 75.
- Pakbaz, M.S., Alipour, R., 2012. "Influence of cement addition on the geotechnical properties of an Iranian clay", Department of Civil Engineering, Shahid Chamran Univ., Ahvaz, Iran. *Geotechnical Engineering*, Sazabpardazan Consulting Engineers Co., Ahvaz, Iran.
- Pathivada, S.P., 2005. "Effects of water-cement ratio on deep mixing treated expansive CLay characteristics", Maste Thesis, The University Of Texas At Arlington.
- Persoff, P., Apps, J., Moridis, G., and Whang, J.M. "Effect of dilution and contaminants on sand grouted with colloidal silica", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125 (6), 461-469 (1999).
- Pye, N., O'Brien, A., Essler, R., and Adams, D., "Laboratory and field trials for deep dry soil mixing to stabilize a live railway embankment across thrandeston bog", Associate Geotechnical Engineer, Mott MacDonald Limited, 8 – 10 Sydenham Road, Croydon, CR0 2EE, United Kingdom.
- Porbaha, A., 1998. State of the Art in Deep Mixing Technology: Basic Concepts. *Ground Improvement*, 2(2), 81–92.
- Porbaha, A., 1999. "Deep mixing technology for liquefaction mitigation", *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.5, No.1.
- Porbaha, A., Tanaka, H., Kobayashi, M., 1998. "State of the art in deep mixing technology, Part II: Applications", *Ground Improvement*, J. ISSMGE, 2(3), 125-139.
- Pousette, K., Macsik, J., Jacobsson, A., Andersson R., Lahtinen P., Peat soil samples

- stabilised in the laboratory – Experiences from manufacturing and testing. Dry mix methods for Deep Soil Stabilisation. Brenderberg, Holm, and Broms, eds. Balkema, ---Rotterdam. 1999; 85-92.
- Ratherford, C.J., 2004. "Design manual for excavation support using deep mixing technology", Master Thesis, Texas A&M University.
- 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 in 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.
- Scheffer, H., and Schachtschabel, H., 1970. Lehrbuch der Bodenkunde (7. Baskı). Ferdinand Enke Verlag. Stuttgart-Fed. Almanya.
- Şengör, M.Y., 2011. "The deformation characteristics of deep mixed columns in soft CLayey soils: a model study", Doctoral Thesis, METU, Turkey.
- Shrestha, R., Al-Tabbaa, A., 2012. "Development of predictive models for cement stabilized soils", Department of Engineering, University of Cambridge. UK.
- Shrestha, R., 2008. "Soil Mixing: A Study on 'Brusselian Sand' Mixed with Slag Cement Binder", Master Dissertation, University of Ghent, University of Brussle.
- Siva, P.P., 2005. "Effects of water-cement ratio on deep mixing treated expansive clay characteristics", Master of science in civil engineering, The university of texas at arlington.
- Soğancı, A.S., Yıldız, M., 2011. "Tekrarlı donma ve çözülmenin kireç ile stabilize edilmiş kil zeminlerin mukavemet ve permeabilitesine etkisi", Selçuk Üniversitesi, teknik bilimler meslek yüksekokulu teknik-online dergi cilt 10, sayı:3-2011.
- Sukontasukkul, P., and Jamsawang, P., "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. 2002a. 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.
- 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.
- Ті́твич, Александрович, N., 1975. The mechanics of frozen ground. Scripta Book Co. pp. 78–79. ISBN 978-0-07-065410-5.

- Uğur, F.A., 2005. “Kil minerallerinin radyoaktif maddeleri tutma özelliklerinin, kilin yapısına ve işlem koşullarına bağlılığının incelenmesi”, Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Adana.
- Wong, L.C., Haug, M.D., Cyclical Closed-system freeze-thaw permeability testing of soil liner and cover materials, *Can. Geotech. Jour.* 28, 1991; 784-793
- 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

1984 yılında Tebriz şehrinde doğdu. İlkokul, ortaokul ve liseyi Tebrizde okudu. Ön Lisans eğitimine 2003 yılında Azade-e Larestan Üniversitesi Genel Yapı İşleri Bölümüne başladı ve 2005'te mezun oldu. 2006 yılında Reşt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümüne başladı ve Üniversiteden 2008 yılında mezun oldu. 2011 yılında Erzurum Atatürk Üniversitesinin Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans öğrenimine başladı.