



**DOĞAL/SENTETİK LİF VE UÇUCU KÜL  
KATKILI KİLLERİN BAZI GEOTEKNİK  
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Bahattin ÖZDEMİR**

**Yüksek Lisans Tezi  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Geoteknik Bilim Dalı  
Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK  
2019**

**Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DOĞAL/SENTETİK LİF VE UÇUCU KÜL KATKILI KİLLERİN  
BAZI GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Bahattin ÖZDEMİR**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
Geoteknik Bilim Dalı**

**ERZURUM  
2019**

**Her hakkı saklıdır**



T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

DOĞAL/SENTETİK LİF VE UÇUCU KÜL KATKILI KİLLERİN BAZI  
GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK danışmanlığında, Bahattin ÖZDEMİR tarafından hazırlanan bu çalışma 15/05/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı – Geoteknik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak ~~oybirliği/oy çokluğu~~ (3./3.) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç.Dr.Semet ÇELİK

İmza :

Üye : Dr.Öğr.Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK

İmza :

Üye : Dr.Öğr.Üyesi Şevki ÖZTÜRK

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 30.10.2019 tarih ve 23 / 38 nolu kararı ile onaylanmıştır.

**Prof. Dr. Mehmet KARAKAN**  
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

### DOĞAL/SENTETİK LİF VE UÇUCU KÜL KATKILI KİLLERİN BAZI GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Bahattin ÖZDEMİR  
Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Geoteknik Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK

Killer geoteknik mühendisliğinde sıklıkla karşılaşılan zeminlerdir. Kil zeminler özellikle suyla etkileştiklerinde şişme, oturma davranışları sergileyebilmekte; donma çözülmeye maruz kaldıklarında ise mukavemet kaybı meydana gelebilmektedir. Kil zeminlerin özelliklerinin iyileştirilebilmesi için çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri kullanılabilir. Bu yöntemlerden yaygın olanı çeşitli katkıları kullanılmasıdır. Çalışma kapsamında; Erzurum Oltu yöresine ait doğal bir kile farklı yüzdelerde (%0,5, %1, %1,5) ve farklı uzunluklarda (2 mm, 5 mm) doğal (saman, kendir) ve sentetik (monolif polyester iplik) lifler katılarak elde edilen lif katkıli kil numunelerin kıvam, kompaksiyon, serbest basınç ve donma çözülme özellikleri araştırılmıştır. İlâveten lif katkıli kil numunelere %10 uçucu kül ilave edilerek lif katkıli uçucu küllü numuneler elde edilmiş; bu numunelerin de kıvam, serbest basınç ve donma çözülme özellikleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda; lif yüzdesindeki artışla numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin arttığı, donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde de doğal kile göre iyileşmeler meydana geldiği görülmüştür. Donma çözülmeye karşı en olumlu davranışı kendir katkıli numuneler sergilemiştir.

**2019, 101 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Kendir, kil, monolif polyester iplik, saman, serbest basınç, uçucu kül

## **ABSTRACT**

MS Thesis

### **INVESTIGATION OF SOME GEOTECHNICAL PROPERTIES OF SYNTHETIC/NATURAL FIBER AND FLY ASH REINFORCED CLAYS**

Bahattin ÖZDEMİR

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

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK

Clays are frequently encountered in geotechnical engineering. Clay soils can exhibit swelling and settlement behaviors especially when they interacted with water; loss of strength can occur when they exposed to freeze-thaw. Various soil stabilization methods could be used to improve the properties of clay soils. The most common of these methods are using of various additives. In this study; the consistency limits, unconfined uncompressive strengths and freeze thawing properties of fiber added clay samples have been determined. The natural (hay, hemp) and synthetic (monolithic polyester yarn) fibers have been added in different percentages (%0,5, % 1, % 1,5) and different lengths (2 mm, 5 mm) to a natural clay obtained from Oltu Erzurum. In addition, 10% fly ash was added to fiber added clay samples to obtain fiber reinforced fly ash samples. Then, the consistency limits, unconfined uncompressive strengths and freeze thaw properties of these samples were investigated. The results showed that; according to the natural clay, with increasing fiber percentage the unconfined compressive strengths have been increased, the unconfined compressive strengths after freeze thaw cycles have been increased similar to unconfined compressive strengths. The hemp added clay samples showed the most improved freeze thaw feature.

**2019, 101 pages**

**Keywords:** Clay, fly ash, hay, hemp, monolithic polyester yarn, unconfined uncompressive strength

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ile yüksek lisans tezimin her aşamasında; değerli vaktini, bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK'a gösterdiği ilgi, sabır anlayış ile yaptığı yardımlardan dolayı en içten teşekkür ve saygıyı borç bilirim.

Çalışmalarında bilgi ve tecrübeleri ile yardımcı olan Sayın Arş. Gör. Fatih ARTUK'a, Sayın İnş. Müh. Emrah TURAN'a, Sayın Öğr. Görevlisi Gamze GENCER'e ve Sayın Teknisyen Mevlüt ALBAYRAK'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her döneminde, en zor anlarımda yanımda olan ve yardımına koşan, destekleriyle başarılarımı temellendiren eşim Aybike ÖZDEMİR'e ve biricik oğlum Harun Mete'ye;

Bugün bunları yazabiliyorsam; başta teşekkür etmem gereken çok özlediğim annem Gülhanım ÖZDEMİR ile babam Harun ÖZDEMİR'e sevgi ve minnetlerimi sunarım.

**Bahattin ÖZDEMİR**

**Nisan, 2019**

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xi
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1. Amaç ve Kapsam.....	1
1.2. Literatür Özeti .....	2
<b>2. KURAMSAL TEMELLER.....</b>	<b>14</b>
2.1. Kil Mineralleri .....	14
2.1.1. Killerin özellikleri .....	14
2.1.2. Killerin kullanıldığı alanlar .....	166
2.1.3. Killerin sınıflandırılması .....	16
2.1.4. Kil zeminlerin mineral yapısı .....	17
2.1.5. Bazı kil mineralleri .....	19
2.1.6. Kil minerallerinin tanımlanması.....	24
2.2. Kil Zeminlerin İyileştirilmesi.....	25
2.3. Uçucu Kül (UK) .....	26
2.3.1. Uçucu küllerin özellikleri .....	300
2.3.2. Uçucu küllerin sınıflandırılması.....	322
2.3.3. Uçucu küllerin kullanım alanları .....	333
2.4. Saman .....	33
2.5. Kendir.....	35
2.6. Monolif Polyester İplik .....	38
2.6.1. Polyester liflerinin özellikleri.....	38
2.6.2. Polyester lifinin kullanım alanları .....	39
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>	<b>400</b>
3.1. Materyal.....	40

3.1.1. Kil Numuneler .....	400
3.1.2. Uçucu Kül.....	43
3.1.3. Saman .....	455
3.1.4. Kendir.....	466
3.1.5. Monolif polyester iplik.....	466
3.2. Yöntem .....	47
3.2.1. Katkılı kil numunelerin elde edilmesi .....	47
3.2.2. Özgül Ağırlık Deneyi .....	49
3.2.3. Hidrometre deneyi .....	50
3.2.4. Kıvam limitleri deneyi.....	511
3.2.5. Standart proktor deneyi .....	522
3.2.6. Serbest basınç deneyi .....	533
3.2.7. Donma-Çözülme deneyi.....	555
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI .....</b>	<b>57</b>
4.1. Kıvam Limitleri Deney Sonuçları .....	57
4.1.1. Likit limit (LL) .....	57
4.1.2. Plastik limit (PL) .....	611
4.1.3. Plastisite indisi (PI) .....	633
4.1.4. Zemin sınıfları .....	644
4.2. Standart Proktor Deney Sonuçları .....	66
4.3. Serbest Basınç Deney Sonuçları.....	67
4.4. Donma Çözülme Deney Sonuçları .....	777
<b>5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....</b>	<b>91</b>
KAYNAKLAR .....	966
ÖZGEÇMİŞ .....	102



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

$A_f$	Enkesit alanı
CBR	Kaliforniya taşıma oranı
CH	Yüksek plastisiteli inorganik kil
CL	Düşük plastisiteli inorganik kil
$c_u$	Drenajsız kayma mukavemeti
D	Doğal kil
DÇ	Donma çözülme
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
K	Kendir
KDK	Katyon değişim kapasitesi
LL	Likit limit
MH	Yüksek plastisiteli silt
MT	Mermer tozu
MTA	Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü
OH	Yüksek plastisiteli organik kil
P	Monolif polyester iplik
PI	Plastisite indisi
PL	Plastik limit
$P_{max}$	Kırılma anında uygulanan en yüksek basınç
$q_u$	Serbest basınç mukavemeti
S	Saman
SPT	Standart Proktor Testi (Kompaksiyon Deneyi)
TUİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UK	Uçucu kül
USCS	Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi
V	Silissi uçucu kül
$w_{opt}$	Optimum su muhtevası
W	Kalkersi uçucu kül
XRF	X ışını fraksiyonu

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Tetrahedral tabakası a) Tetrahedron yapıtaşı b) Silikat tabakası.....	18
Şekil 2.2. Oktahedral tabakası a) Oktahedron yapıtaşı b) Alümina tabakası.....	18
Şekil 2.3. Kaolinitin yapısı .....	19
Şekil 2.4. Kaolinit kil mineralinin atomik yapısı ve şematik gösterimi .....	20
Şekil 2.5. Montmorillonit kil mineralinin yapısı ve şematik gösterimi .....	21
Şekil 2.6. İllit kil mineralinin atomik yapısı ve şematik gösterimi.....	22
Şekil 2.7. 2018 yılı mayıs ayı sonu itibariyle lisanslı elektrik kurulu gücünün kaynak bazında dağılımı.....	29
Şekil 2.8. Türkiye termik santrallerinde tüketilen kömür miktarı .....	29
Şekil 2.9. Kesilmiş saman örneği.....	33
Şekil 2.10. Saman balyalarıyla ev yapım örneği .....	34
Şekil 2.11. Kendir bitkisi .....	355
Şekil 2.12. Türkiye'de kenevir yetiştiriciliğine izin verilen iller .....	37
Şekil 2.13. a) Kesilmiş monolif polyester iplik b) Monolif polyester iplik.....	38
Şekil 3.1. Etüv.....	400
Şekil 3.2. Öğütülmüş kil örneği .....	411
Şekil 3.3. Los Angeles aşındırma cihazı.....	411
Şekil 3.4. Deneylerde kullanılan doğal kilin granülometri eğrisi .....	422
Şekil 3.5. a) Uçucu kül b) Uçucu kül-kil karışım örneği.....	44
Şekil 3.6. Seyitömer Termik Santrali uçucu külü dane çapı dağılım eğrisi.....	455
Şekil 3.7. a) Saman süpürgesi b) Kesilmiş saman örneği.....	466
Şekil 3.8. a) Kesilmiş kendir örneği b) Kendir-kil karışım örneği .....	466
Şekil 3.9. a) Kesilmiş monolif polyester iplik örneği b) Monolif polyester iplik-kil karışım örneği.....	47
Şekil 3.10. Özgül ağırlık deneyi .....	49
Şekil 3.11. Hidrometre deney okuma düzeneği .....	50
Şekil 3.12. İnce daneli zeminlerin kıvam limitleri.....	511
Şekil 3.13. Koni penetrometre deney aleti.....	522
Şekil 3.14. Otomatik kompaktör.....	53

<b>Şekil 3.15.</b> a) Serbest basınç deney aleti b) Hidrolik krika ile numune çıkarma.....	544
<b>Şekil 3.16.</b> Serbest basınç deneyinin bilgisayar programı aracılığıyla uygulanişı.....	555
<b>Şekil 3.17.</b> Donma çözülme kabini .....	566
<b>Şekil 3.18.</b> Donma çözülme kabiniinde folyoya sarılmış numuneler .....	566
<b>Şekil 4.1.</b> Saman katkılı kil numunelerin likit limitlerinde meydana gelen değişim.....	57
<b>Şekil 4.2.</b> Kendir katkılı kil numunelerin likit limitlerinde meydana gelen değişim.....	58
<b>Şekil 4.3.</b> Monolif polyester iplik katkılı kil numunelerin likit limitlerinde meydana gelen değişim .....	59
<b>Şekil 4.4.</b> 2 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı numunelerin likit limitlerinin değişimi.....	600
<b>Şekil 4.5.</b> 5 mm uzunluğunda saman kendir ve monolif polyester iplik katkılı numunelerin likit limitlerinin değişimi.....	611
<b>Şekil 4.6.</b> 2 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı numunelerin plastik limitlerinin değişimi .....	622
<b>Şekil 4.7.</b> 5 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı numunelerin plastik limitlerinin değişimi .....	622
<b>Şekil 4.8.</b> 2 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı numunelerin plastisite indislerinin değişimi.....	633
<b>Şekil 4.9.</b> 5 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı numunelerin plastisite indislerinin değişimi.....	64
<b>Şekil 4.10.</b> Doğal kilin ve %10 uçucu kül katkılı kilin kompaksiyon eğrileri.....	666
<b>Şekil 4.11.</b> 2 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı kil numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim.....	69
<b>Şekil 4.12.</b> 5 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı kil numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim.....	69
<b>Şekil 4.13.</b> Saman katkılı kil numunelerde samanın uzunluk ve yüzdesinin artışı ile serbest basınç mukavemeti değişimi .....	700
<b>Şekil 4.14.</b> Kendir katkılı kil numunelerde samanın uzunluk ve yüzdesinin artışı ile serbest basınç mukavemeti değişimi .....	711
<b>Şekil 4.15.</b> Monolif polyester iplik katkılı kil numunelerde samanın uzunluk ve yüzdesinin artışı ile serbest basınç mukavemeti değişimi.....	711

<b>Şekil 4.16.</b> 2 mm uzunluğunda saman katkılı kil numunelerin serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri .....	722
<b>Şekil 4.17.</b> 5 mm uzunluğunda saman katkılı kil numunelerin serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri .....	722
<b>Şekil 4.18.</b> 2 mm uzunluğunda kendir katkılı kil numunelerin serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri .....	733
<b>Şekil 4.19.</b> 5 mm uzunluğunda kendir katkılı kil numunelerin serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri .....	73
<b>Şekil 4.20.</b> 2 mm uzunluğunda monolif polyester iplik katkılı kil numunelerin serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri .....	733
<b>Şekil 4.21.</b> 5 mm uzunluğunda monolif polyester iplik katkılı kil numunelerin serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri .....	744
<b>Şekil 4.22.</b> %10 uçucu kül katkılı kil numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim .....	755
<b>Şekil 4.23.</b> 2 mm uzunluğunda kendir/saman/monolif polyester iplik ile %10 uçucu kül katkılı kil numunelerin serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri .....	766
<b>Şekil 4.24.</b> 5 mm uzunluğunda kendir/saman/monolif polyester iplik ile %10 uçucu kül katkılı kil numunelerin serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri .....	777
<b>Şekil 4.25.</b> Saman katkılı kil numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim .....	79
<b>Şekil 4.26.</b> Kendir katkılı kil numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim .....	79
<b>Şekil 4.27.</b> Monolif polyester iplik katkılı kil numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim.....	80
<b>Şekil 4.28.</b> 2 mm uzunluğunda saman katkılı kil numunelerin 4 çevrim donma çözülme sonrasında serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri .....	81
<b>Şekil 4.29.</b> 5 mm uzunluğunda saman katkılı kil numunelerin 4 çevrim donma çözülme sonrasında serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri .....	81

<b>Şekil 4.30.</b> 2 mm uzunluğunda kendir katkılı kil numunelerin 4 çevrim donma çözülme sonrasında serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri .....	81
<b>Şekil 4.31.</b> 5 mm uzunluğunda kendir katkılı kil numunelerin 4 çevrim donma çözülme sonrasında serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri .....	822
<b>Şekil 4.32.</b> 2 mm uzunluğunda monolif polyester iplik katkılı kil numunelerin 4 çevrim donma çözülme sonrasında serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri .....	822
<b>Şekil 4.33.</b> 5 mm uzunluğunda monolif polyester iplik katkılı kil numunelerin 4 çevrim donma çözülme sonrasında serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri .....	822
<b>Şekil 4.34.</b> 2 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim .....	833
<b>Şekil 4.35.</b> 5 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim .....	833
<b>Şekil 4.36.</b> %10 uçucu kül katkılı kil numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim .....	855
<b>Şekil 4.37.</b> 2 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı %10 uçucu kül ilaveli numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri .....	866
<b>Şekil 4.38.</b> 5 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı %10 uçucu kül ilaveli numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri .....	866
<b>Şekil 4.39.</b> Uçucu kül katkısız numunelerin serbest basınç ve donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim .....	887
<b>Şekil 4.40.</b> Uçucu kül katkılı numunelerin serbest basınç ve donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim.....	888

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Killerin sınıflandırılması.....	166
Çizelge 2.2. Bazı kil minerallerin özellikleri .....	222
Çizelge 2.3. Bazı kil minerallerinin tabaka yapıları ve tabaka yapılarının gösterimi...	233
Çizelge 2.4. 2016-2017 yıllarında Türkiye’de lisanslı kurulu gücün kaynak bazında ve 2017 yılı mayıs ayı değeriyle karşılaştırılması .....	28
Çizelge 2.5. Kendirin diğer bitkisel liflerle karşılaştırmalı özellikleri .....	377
Çizelge 2.6. Polyester lifinin fiziksel özellikleri.....	39
Çizelge 3.1. Kile ait bazı geoteknik özellikler .....	422
Çizelge 3.2. Deneylerde kullanılan doğal kil numunenin kimyasal bileşimi .....	433
Çizelge 3.3. Seyitömer Termik Santrali uçucu külü fraksiyonel kimyasal analizi .....	44
Çizelge 3.4. Deney numuneleri.....	48
Çizelge 4.1. Kıvam limitleri deney sonuçları .....	65
Çizelge 4.2. Doğal kil ve %10 uçucu kül katkılı kile ait kompaksiyon parametreleri.....	66
Çizelge 4.3. Saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı kil numunelerin serbest basınç mukavemetleri.....	68
Çizelge 4.4. %10 uçucu kül katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri.....	75
Çizelge 4.5. Saman/kendir/monolif polyester iplik katkılı numunelerin 4 çevrim donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri.....	788
Çizelge 4.6. %10 uçucu kül katkılı numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri.....	844
Çizelge 4.7. Donma çözülme deneyi öncesi ve sonrasında uçucu kül katkısız numunelerin kütlelerinde meydana gelen değişim .....	899
Çizelge 4.8. Donma çözülme deneyi öncesi ve sonrasında uçucu kül katkılı numunelerin kütlelerinde meydana gelen değişim .....	89

## 1. GİRİŞ

### 1.1. Amaç ve Kapsam

Var olduğu günden bu yana insanoğlu barınma ve ulaşım ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik zeminleri temel malzemesi veya yapı malzemesi olarak kullanmaktadır.

Yerin yüzey veya yüzeye yakın kısmı ve doğal malzemeyle geoteknik mühendisi ilgilenir. Çeşitli ihtiyaçları karşılamaya yönelik olarak yapılan bina, yol, baraj, köprü ve buna benzer yapılar zemin üzerine inşa edilir. Mühendislik yapılarının hizmet ömürleri süresince güvenli hizmet verebilmeleri için üzerine inşa edildikleri zeminin mühendislik özelliklerinin iyi analiz edilmesi gerekmektedir.

Mühendislik yapılarının üzerine inşa edildiği ve sorunlu zeminler olarak bilinen killer; 2 mikrondan daha küçük dane boyutuna sahip; şişme potansiyeli olan, yapısındaki suyu kaybettiği zaman büzölen ve oturma eğilimi gösteren, mineral danecikleri ile kil daneciklerinden oluşın zeminlerdir. Killer; kayaçların fiziksel ve kimyasal yollarla taşınması ve taşınma sonrasında çeşitli nedenlerle ayrışması ile oluşur. Kayacın minerolojisi, suyun kimyasal birleşimi ve suyun kayaç içerisinde ilerleme miktarı bu taşınma ve ayrışma olayı üzerinde etkilidir.

Problemlili kil zeminlerin olumsuzluklarının (şişme, oturma, büzölme vb.) giderilip, mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi geoteknik mühendisliğinde önemli bir yer teşkil etmektedir.

Bu çalışma kapsamında Erzurum ili Oltu ilçesi sınırlarından elde edilen bir kilin bazı geoteknik özellikleri araştırılmıştır. Kile farklı uzunluk ve yüzdelerde lif (saman, kendir, monolif polyester iplik) ve %10 uçucu kül ilave edilmiş ve liflerin ve uçucu külün kilin geoteknik özelliklerine olan etkisi ortaya konulmuştur.

Çalışma kapsamında kil numunesine özgül ağırlık, kıvam limitleri, hidrometre ve standart proktor deneyleri yapılmıştır. Daha sonra hazırlanan lif ve uçucu kül katkılı numuneler üzerinde kıvam limitleri, serbest basınç ve donma-çözülme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

## 1.2. Literatür Özeti

Sera *et al.* (1990) gevrek malzemelerin süneklik ve dayanımının doğal lif katkısı ile iyileştirilebilirliğini incelemiştir. Çalışma sonucunda doğal liflerin, süneklik ve dayanımı artırdığını gözlemiştir. Yalıtım ve dayanım maksatlı doğal lif kil karışımının tahıl saklama silolarında kullanılabileceğini ifade etmiştir.

Crockford *et al.* (1993) çalışmalarında polipropilen lif ile karıştırılan kil zeminlerin yol kaplama malzemesi olarak kullanılmaları durumunda ömürlerinin arttığını ileri sürmüştür. Lif katkısının; malzeme davranışını deformasyon bazında yumuşamadan pekleşmeye doğru değiştirdiğini gözlemiştir.

Maher and Ho (1994) çalışmalarında kaolinit ile lif zemin kompozitinin mekanik özelliklerini bir dizi laboratuvar deneyleriyle araştırmışlardır. Kaolinit kilinin; süneklik, maksimum basınç dayanımı ve eğilme tokluğunun lif katkısı ile belirgin bir şekilde arttığını gözlemiştir. Kaolinit ve lif kompozitinin dayanım ve sertlik artışının lif uzunluğu ve içeriği ile kompozitin su içeriğinin bir fonksiyonu olduğunu belirtmişlerdir. Lif içeriğinin artışıyla saf kilin, basınç ve çekme dayanımı ile sertlik indeksinin arttığını, bu durumun özellikle düşük su muhtevalarında daha belirgin olduğunu gözlemiştir. Lif uzunluğunun artmasıyla lifin çekme dayanımı ile maksimum basınç dayanımına olan etkisi azalırken süneklik üzerine olan etkisinin ise arttığını belirtmişlerdir. Kompozitin hidrolik iletkenliği özellikle yüksek su muhtevalarında lif katkısı ile belirgin şekilde artmaktadır.



Al Wahab and El-Kedrah (1995) çalışmalarında polipropilen liflerin killi zeminlerde, şişme ve büzülme ile çekme çatlaklarının azaltılmasına yönelik olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda lif içeriğinin artmasıyla permeabilitenin arttığı görülmüştür.

Vallejo and Yoo (1995) çalışmalarında deneysel ve teorik analizler ile kısa çelik liflerin fisürlü killerin kesme dayanımına etkisini araştırmışlardır. Liflerle takviye edilmiş ve takviye edilmemiş kil örnekler için direkt kesme deneyleri uygulamışlardır. Mevcut çatlakların fisürlü killerde ilerleme yönünü doğrusal elastik kırılma mekaniği teorileri ile ilişkilendirmişlerdir. Araştırma sonucunda; fisürlü killerin kesme dayanımının kısa çelik lifler eklenmesi ile arttığını saptamışlardır.

Keskin ve Çimen (1997) çalışmalarında ponzanın killi zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda ponza katkılı düşük plastisiteli kil zemin numunelerin serbest basınç mukavemeti değerlerinde önemli bir değişim olmadığını; ponza katkılı yüksek plastisiteli kil zemin numunelerinin serbest basınç mukavemeti değerlerinin ise arttığını, şişme basıncı ve plastisite indisinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Ponza-kil karışımı için ideal oranı %20-%30 şeklinde ifade etmişlerdir.

Puppala and Musenda (2000) çalışmalarında şişebilen zeminlerin iyileştirilmesi için polipropilen lifinin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Deneyde 2 farklı şişebilen zemin türü, 2 çeşit lif (%0.0-0.9 aralığında 4 farklı oranda) kullanılmıştır. Hazırlanan katkısız ve lif katkılı zemin numuneleri üzerinde üç eksenli serbest şişme, tek eksenli basınç, hacimsel rötre ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Şişen killerin dayanım, şişme ve rötre karakteristiklerinin lif katkısı ile değişimini incelemişlerdir. Sonuç olarak lif katkısının tek eksenli basınç dayanımını artırıp şişme basıncı ve hacimsel rötreyi ise azalttığını saptamışlardır.

Boominathan and Hari (2002) çalışmalarında uçucu kül ve lif karışımının sıvılaşmaya karşı direncinin değişimini incelemişlerdir. Sıvılaşmaya karşı direncin uçucu küle lif

katılmasıyla önemli ölçüde arttığını gözlemlemişlerdir. Katkılı kil numuneler üzerinde modifiye ve standart proktor deneyleri yapılmış, deney sonucunda katkı maddesinin numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlıklarını düşürdüğü, katkı maddesi oranı arttıkça kil zemininin serbest basınç mukavemetinin sürekli düştüğünü, karışımın kayma mukavemetinin ise %4 katkı oranı ilavesine kadar düştüğünü ve sonrasında ise katkı oranı arttıkça karışımın kayma mukavemetinin değişmediğini belirlemişlerdir.

Iasbik *et al.* (2002) çalışmalarında polipropilen lif ile kil karışımlarının geoteknik özelliklerini araştırmışlardır. Deney sonucunda kil-polipropilen lif karışımının mekanik özelliklerinin lif içeriği ile lif uzunluğuna bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Lif katkısının zeminin tek eksenli basınç dayanımını artırdığını saptamışlardır. Sonuç olarak lif kullanılarak elde edilen kompozitin yol mühendisliği uygulamalarında kullanılmasının faydalı olacağını ileri sürmüşlerdir.

Kalkan (2003) Erzurum-Oltu bölgesine ait montmorillonit tipi killerin iyileştirilerek yapı temelleri ile atık depo tabanlarında şilte olarak kullanılabilirliğini incelemiştir. Yüksek şişme kapasiteli montmorillonitin geçirimsizlik ve stabilite problemi zemin içerisine silis dumanı eklenerek ortadan kaldırılmıştır. Silis dumanı katkılı kil zeminin şişme ve geçirimsizliğinin önemli oranda azaldığını, kayma gerilmesinin arttığını deneysel çalışmalar sonucunda saptamıştır. Silis dumanı ilavesiyle kil zeminin kuru halindeki çatlakların azaldığı belirlenmiş, montmorillonit-silis dumanı karışımının alternatif geçirimsiz şilte malzemesi olarak değerlendirilebileceği belirtilmiştir.

Ang and Erik (2003) çalışmalarında tek eksenli basınç deneyleri ile sıkıştırılmış siltli killerin lifle güçlendirilmesinde numune boyutunun dayanım ve gerilme-birim deformasyon özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Deney sonucunda numune boyutlarının ölçülen dayanımın büyüklüğünü önemli oranda etkilediğini belirlemişlerdir. Boyut etkisinin, optimum su içeriğinin kuru tarafında sıkıştırılan numunelerde daha belirgin olduğunu; lifle güçlendirilmiş zemin numunelerinin 70 mm den daha büyük çapta olması halinde dayanımın daha doğru bir şekilde temsil edilebileceğini yaptıkları deneyler ile ortaya koymuşlardır.

Kalkan and Akbulut (2004) çalışmalarında silis dumanının hidrolik bariyer şeklinde sıkıştırılmış kil şiltelerin serbest basınç mukavemeti, şişme basıncı ve geçirimsizlikleri üzerinde etkisini incelemişlerdir. Silis dumanı ile sıkıştırılmış kil numunelerin doğal kil numunelere nazaran düşük geçirimsizlik, düşük şişme basıncı ve önemli ölçüde yüksek basınç mukavemeti gösterdiğini tek eksenli basınç laboratuvar deneyleri ile belirlemişlerdir.

Kumar *et al.* (2006) çalışmalarında polyester lifleri yumuşak kil zeminlerle karıştırarak tek eksenli basınç dayanım artışlarını araştırmışlardır. Ağırlıkça %0, %0,5, %1 %1.5 ve %2 oranlarda düz ve kıvrıkcık liflerle hazırlanan numunelere tek eksenli basınç deneyleri yapmışlardır. Lif katkısı ile kilin tek eksenli basınç dayanımının arttığını ve lifin kil-kum karışımına katılması durumunda dayanımın daha çok arttığını deney sonucunda gözlemlemişlerdir. Liflerin numune içerisinde rastgele dağıtılmış olması durumunda da deney sonuçlarının makul doğrulukta tekrarlanabileceğini belirtmişlerdir.

Cai *et al.* (2006) çalışmalarında kireç ve polipropilen lif katkılarının killi zeminlerin mühendislik özelliklerine olan etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında; 3 farklı oranda lif (%0,05, %0,15 ve %0,25) ve 3 farklı oranda kireç (%2, %5 ve %8) kullanmışlardır. Hazırlanan karışımlara; şişme, tek eksenli basınç, direkt kesme ve çekme deneyleri uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda karışımdaki lif içeriğinin artmasının dayanımı ve büzülme arttırdığını, şişme potansiyelini ise azalttığını saptamışlardır.

Kalkan (2006) çalışmasında kırmızı çamurun hidrolik bariyer olarak sıkıştırılmış kil tabakalarında; hidrolik iletkenlik, serbest basınç mukavemeti ve şişme yüzdesi üzerindeki etkisini incelemiştir. Deney sonuçlarında; kırmızı çamur ve çimento katkı maddeleri içeren sıkıştırılmış kil numunelerin doğal kil numunelerine nazaran yüksek basınç mukavemeti, düşük hidrolik iletkenlik ve şişme oranı gösterdiğini belirlemiştir. Kırmızı çamur ve çimentonun kil tabakalarının iyileştirilmesinde kullanılabileceğini ifade etmiştir.

Özkul and Baykal (2006) çalışmalarında kısa liflerin; killerin süneklik, sertlik ve çekme çatlaklarına karşı dirençlerinin iyileştirilebilirliğine yönelik olarak kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Lastik talaşından üretilen lif katkısı ile güçlendirilen killerin basınç ve kesme dayanımı davranışlarını araştırmışlardır. Düşük plastisiteli saf kil ve ağırlıkça %10 lastik talaş lif katkısı içeren karışımlar standart ve modifiye proktor deneylerine tabi tutulmuş; drenajlı ve drenajsız dayanımları direkt kesme deneyleri yapılarak saptanmıştır. Lastik talaşından üretilen lif içeriğiyle veya sıkıştırma enerjisinin yükseltilmesiyle kilin drenajlı kesme dayanımının değişmediği; standart proktor enerjisiyle sıkıştırılması halinde ise drenajsız dayanımının değişmediği ancak modifiye proktor enerjisi ile hazırlanan numunelerin drenajsız kayma dayanımının çok az düştüğü ve numunelerin daha çok sünek kırılma gösterdiği gözlemlenmiştir.

Kim *et al.* (2007) çalışmalarında değişik doğal liflerin (örneğin Hindistan cevizi, pirinç kamışı ve Hint kenevirinden elde edilen lifler) saha uygulamalarında kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Doğal liflerin çekme dayanımı hususunda başarılı olduğu sonucuna yapılan deneysel çalışmalar ile varmışlardır. Ayrıca doğal lif güçlendirmesinin uzun süreli çekme dayanımı değişikliklerini; deniz suyu ve killi zeminler üzerinde araştırmışlar; doğal liflerin, deniz suyu ve killi zeminlerde aktif bozulmalara uğradığını saptamışlardır.

Rafalko *et al.* (2007) çalışmalarında kısa ve uzun liflerin kimyasal stabilizatörlü veya stabilizatörsüz olarak kilin dayanımına olan etkisini incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre uzun liflerin tek başına kullanılması halinde (kimyasal stabilizatör kullanılmadan) kilin sertliği ve dayanımının en yüksek seviyede olduğu; diğer yandan lifin yanı sıra kimyasal stabilizatörün de kullanılmasının kısa lifli kilin sertliğini maksimum oranda arttırdığı fakat dayanım artışının çok az olduğu gözlemlenmiştir. %1'den daha fazla orandaki lif katkısının efektifliği arttırırken karıştırma işlemini ise zorlaştırdığı belirlenmiştir.

Naeini and Sadjadi (2008) çalışmalarında atık polimer materyallerin güçlendirme amaçlı olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Saf zemin ağırlığının değişik plastisite

indekslerine sahip zeminlere ağırlıkça %0 ile %4 aralığında atık polimerden üretilen lif katılarak hazırlanan doygun olmayan killi zeminlerin dayanım davranışları direkt kesme deneyi ile araştırılmıştır. Deney sonuçları; atık lif katkısının zeminlerin mukavemet parametrelerinde önemli artış oluşturduğunu ve lif içeriğinin artışıyla zeminlerde dayanım artışının da olduğunu ortaya koymuştur.

Kalhor (2008) çalışmasında iki farklı su içeriğinde hazırlanan ve metal liflerle güçlendirilen saf kil üzerinde eksenel basınç deneyleri yapmıştır. Deney sonucunda metal liflerin rastgele dağıtılmasının saf kilin eksenel basınç dayanımını artırdığını gözlemlemiştir. Dayanım artışının aspect oranına (lifin boyunun çapına oranı), lif uzunluğuna, eğilme açısına ve liflerin karışım içindeki ağırlıkça yüzdelerine bağlı olduğunu ileri sürmüştür. Açılı metal liflerin düz liflere göre eğilme dayanımı daha fazla etkilediğini, su muhtevası artışının da eksenel dayanımı azalttığını ifade etmiştir.

Aksoy vd (2008) çalışmalarında, kil zemin içerisine %10'a kadar belirli oranlarda uçucu kül karıştırarak karışımın optimum su muhtevasını, plastisitesini ve serbest basınç dayanımını araştırmışlardır. Uçucu kül ilavesi ile karışımın optimum su muhtevası ve serbest basınç dayanımının arttığını, plastisitesinde ise herhangi bir değişiklik olmadığını gözlemlemişlerdir.

Babu and Vasudevan (2008) çalışmalarında Hindistan cevizi lifi ile güçlendirilmiş zeminlerin dayanım ve rijitlik davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmalarında, katkısız ve farklı oranlarda Hindistan cevizi lifi katkılı silindirik numunelere üç eksenli kesme deneyini uygulamışlardır. Deney sonucunda; kum-kil karışımına ağırlıkça %1,0-2,0 oranında Hindistan cevizi lifi eklenmesiyle karışımın dayanım ve rijitliğinin arttığı saptanmıştır.

Kalkan (2009) çalışmasında sıkıştırılmış kil tabakası ve şilte sistemlerinin içindeki kuruma çatlaklarının büyümesini azaltmak için silis dumanının stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Doğal kil zemin ve kil zemin-silis dumanı karışımı optimum su muhtevasında sıkıştırılmış, akabinde zeminler laboratuvar deneylerine tabi

tutulmuştur. Deneysel sonuçları silis dumanının sıkıştırılmış örneklerin yüzeyindeki kuruma çatlaklarında oluşan büyümeyi azalttığı sonucunu ortaya koymuştur.

Başer ve Çokca (2010) çalışmalarında şişen zemin numunelerine atık mermer tozu ve kireç taşı tozu karıştırarak zeminlerin iyileştirilebilirliğini araştırmışlardır. Bu katkı maddelerinden %5 ile %30 arasında değişen oranlarda ekleyerek zeminlere geçirimsizlik, serbest şişme hacim değişimi ve kıvam limitleri deneylerini uygulamışlardır. 7 ve 28 günlük kürlü numuneler hazırlayarak numunelerin serbest şişme değerlerini belirlemişlerdir. Şişme oranlarının kür ile birlikte %58'e kadar düştüğünü göstermişlerdir.

Aydın (2010) çalışmasında kil zeminlerin geoteknik özelliklerinin uçucu kül ve kireç kullanılarak iyileştirilebilirliğini araştırmıştır. Şişme deneyi sonuçlarına göre kireç katkısının aksine uçucu külün CH kil örnekleri üzerinde şişmede sınırlı iyileştirme sağladığı gözlemlenmiştir. Deneysel sonucunda; CH killerin iyileştirilmesinde kirecin, uçucu kül katkısına nazaran daha etkili olduğunu ve kil zeminlerinde, şişme ve serbest basınç dayanımı parametrelerinde iyileştirme için optimum kireç katkısının %7 olarak kullanılabileceğini saptamıştır.

Kızılcılık (2010) çalışmasında Kocaeli Uzunçiftlik yöresinden alınan yüksek plastisiteli ve yüksek su muhtevasına sahip killi zeminin kireç ile iyileştirilebilirliğini araştırmıştır. Kil numuneler üzerinde kıvam limitleri, elek analizi ve kompaksiyon deneylerini yapmıştır. Uygun kireç karışım oranı bulunarak kireç karışımı ve kireç karışimsız serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Deneylerde katkı malzemesi olarak doğal su muhtevasında hem sönmüş hem de sönmemiş kireç kullanılmıştır ve sonuçlar optimum su muhtevasında kireçli durum ve doğal durumda bulunan mukavemetler ile karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda 28 gün kür edilen kireç katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde artışlar gözlemlenmiştir. Yapılan yaş CBR deneylerinde CBR değerinin %4'ten %23'e kadar arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca deneylerde kireç katkılı numunelerdeki boy kısalma oranının %15'ten %1,5'e azaldığı saptanmıştır. Sönmüş ve sönmemiş kireç ile yapılan deneysel sonuçları birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Ayrıca kireç stabilizasyonu için

yapılan çalışmalarda su muhtevası optimum su muhtevasından yüksek killi zeminlerde sönmüş kireç yerine sönmemiş kirecin kullanımının daha efektif olacağı sonucuna varılmıştır.

Orhan (2010) çalışmasında Bolu ili Yeniçağa ilçesinde bulunan göl civarındaki mevcut yerleşim bölgesini inceleme alanı olarak ele almıştır. İnceleme alanındaki zeminin şişme yüzdesi, şişme basıncı ve serbest basınç dayanımı belirlenmiş ve zemine sönmüş kireç ile Çayırhan termik santralinden alınan uçucu kül katılarak zeminde iyileştirme çalışması yapılmıştır. Kile %1, %3, %5, %7 ve %9 oranlarında sönmüş kireç ile %5 ve %10 oranında uçucu kül katılarak şişme potansiyeli ile serbest basınç dayanımındaki değişim incelenmiştir. Kireç oranının %7 ile %9 olduğu durumlarda şişme potansiyelinin önemli ölçüde azalma gösterdiği izlenmiştir.

Kalay (2010) çalışmasında yüksek plastisiteli bir kile mermer tozu, ponza ve kireç karıştırarak katkı maddelerinin kilin mühendislik özelliklerine olan etkisini incelemiştir. Bu kapsamda belirli oranlarda kireç, ponza ve mermer tozu katkısı ile kıvam limitleri, serbest basınç ve şişme deneyleri uygulanmıştır. Her bir katkı için optimum miktarlar belirlendikten sonra, bu şartlardaki maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerlerinde hazırlanan numuneler 7 ve 28 günlük küre tabi tutulmuş ve küre tabi tutulan numuneler için serbest basınç deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca optimum katkı miktarları belirlenen numuneler üzerinde CBR deneyleri yapılmış, deney sonuçları karşılaştırılarak en iyi iyileştirmenin elde edildiği durumlar belirlenmiştir.

Bilge (2011) çalışmasında fırın cürufunun bentonit kilinde iyileştirme malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bentonit kiline %10 kireç, %5-10-15 oranlarında yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve zeolit katılmıştır. Karışım homojen olarak karıştırıldıktan sonra elde edilen numuneler üzerinde özgül ağırlık, kıvam limitleri, hidrometre, kompaksiyon ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Yüksek fırın cürufu, kireç, uçucu kül ve zeolit CH sınıfı yüksek plastisiteli killi zeminlerin iyileştirilmesine yönelik alternatif bir malzeme olarak kullanılabileceğini ifade etmiştir.

Gücek (2011) çalışmasında mermer tozu (MT) ve uçucu külün (UK) kil zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabilirliğini araştırmıştır. Kil zemin kuru ağırlığına göre belli oranlarda mermer tozu (%5, %10 ve %15) ve uçucu kül ile (%10, %20 ve %30) karıştırılarak numuneler elde edilmiştir. Karışımlar %15 ve %20 su muhtevalarında standart proktor sıkıştırma enerjisinde hazırlanmış; hazırlanan numuneler; CBR, eksenel basınç, şişme, donma-çözülme ve donma-çözülme sonrası eksenel basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda mermer tozu ve uçucu kül katkısının dayanımı artırdığı, şişmeyi ise azalttığı sonucuna varılmıştır.

Ayhan (2011) çalışmasında biyopolimer katkılı kil zeminlerin mühendislik özelliklerini incelemiştir. Hazırlanan karışımlar üzerinde kıvam limitleri, konsolidasyon, şişme basıncı ve geçirimsizlik deneyleri uygulanmıştır. Ksantan gam ve kitosan biyopolimerleri %0,25, %0,5 ve %0,75 oranlarında kullanılıp oluşturulan çözeltiler ile deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda; kullanılan biyopolimerlerin killerin likit limit değerlerini artırdığı, şişme potansiyelini azalttığı, ayrıca ksantan gam oranı arttıkça kil numunelerin konsolidasyon ve geçirimsizlik katsayılarının aynı yük kademesinde azaldığı sonucuna varılmıştır. Geçirimsiz kil bariyer oluşturulmasında biyopolimerlerin kullanabileceğini ifade etmiştir.

Kalkan (2011) çalışmasında silis dumanı kullanarak şişen killi zemin örneklerinin şişme davranışının donma-çözülme döngüsü üzerindeki etkilerini incelemiştir. Doğal kil zemin ve kil zemin-silis dumanı karışımları optimum su muhtevasında sıkıştırılmış ve tüm numuneler donma-çözülme döngüsüne ve şişme testlerine tabi tutulmuştur. Deney sonucunda; silis dumanının donma-çözülme döngüsündeki şişen kil zeminlerin sürekli deformasyonunu azalttığı saptanmıştır.

Tan vd (2012) çalışmalarında çimento ve uçucu kül ile stabilize edilmiş, donma-çözülme çevrimi etkisindeki şişen bir zeminin davranışına etki eden parametreleri araştırmışlardır. Donma-çözülme çevrim sayıları ve çimento yüzdesinin daha az etkili olduğunu belirlemişlerdir. Uçucu kül miktarının artışı ile birlikte numuneler üzerinde donma-çözülme çevrimlerinin etkilerinin oldukça azaldığını saptamışlardır



Zaimoğlu vd (2012) alışmalarında ince daneli zemin içerisine rastgele dağıtılmış farklı boydaki (3 mm, 6 mm ve 12 mm) polipropilen liflerin donma-çözölme davranışı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Donma-özölme çevrim sayısının artması ile serbest basınç dayanımının azaldığını yaptıkları deneysel çalışmalarla saptamışlardır.

Özgan vd (2012) alışmalarında kohezyonlu zeminlerin donma-özölmeye maruz kalmadan önceki ve donma özölmeye maruz kaldıktan sonraki fiziksel özelliklerini incelemişlerdir.

Zaimoğlu vd (2013) alışmalarında donma-çözölme deneyini geleneksel yöntemden farklı olarak numune üzerine yük uygulayarak gerçekleştirmişlerdir. Deneysel alışmalar ile üzerinde yük olan zeminlerin donma-çözölme sonrası serbest basınç dayanımlarının geleneksel yöntem ile elde edilen serbest basınç dayanımlarına göre daha düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Mohamed (2013) alışmasında saman lifi kullanarak killi zeminin şişme özelliklerini araştırmıştır. Kil zeminin ağırlıkça %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında saman ilave edilip indeks, dayanım ve şişme deneyleri yapılmıştır. Kayma dayanımının %1 saman katkı oranına kadar arttığını gözlemlemiştir. Ayrıca şişme deformasyonunun azalıp çekme dayanımının ise arttığını ifade etmiştir.

Ontürk ve Fırat (2014) alışmalarında uçucu kül ve mermer tozunun temel tabakalarının stabilizasyonunda serbest basınç dayanımı ve rijitlikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Uçucu kül ve mermer tozu doğal zemine %5, %10 ve %15 gibi farklı oranlarda ilave edilip hazırlanan numuneler 7 ve 14 gün boyunca küre tabi tutulmuş, kür süresi biten bütün numunelerin standart kompaksiyon ve CBR değerleri belirlenmiştir. Uçucu kül ve mermer tozunun etkisi ile zeminin CBR değerlerinde artışlar olduğu gözlemlenmiştir.

Ünver (2015) alışmalarında düşük plastisiteli killi bir zeminin uçucu kül ile iyileştirilebilirliğini araştırmıştır. Katkısız ve %5, %10, %15, %20, %25, %30 uçucu kül katkılı numuneler üzerinde serbest basınç, şişme ve dispersibilite deneyleri yapılmıştır.

Deneyleer sonucunda kil zeminin dayanım, şişme ve dispersibilite özelliklerinin katkı ile birlikte iyileştiğini gözlemlemişlerdir.

Zaimoğlu vd (2015) çalışmalarında yüksek plastisiteli (CH) kil zemin içerisine rastgele dağıtılmış atık tavuk tüyünün zemin iyileştirilmesinde kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla donma-çözölmeye maruz bırakılmış ve bırakılmamış numuneler üzerinde bir dizi serbest basınç deneyleeri yapmışlardır. Atık tavuk tüyü; telek ve tüy lifi olmak üzere iki kısma ayrılmış, telek ve tüy lifi %1.0 ve %2.0 oranlarında kil zemine ilave edilerek numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 5 ve 10 donma-çözölme çevrimine bırakılmıştır. Tüy lifi ile donatlandırılmış numunelerin serbest basınç mukavemeti değeri tüm donma-çözölme çevrimlerinde artmıştır.

Sharma *et al.* (2015) çalışmasında Kuzey Hindistan eyaletinin Himaşal Pradeş eyaletinin Hamirpur ilçesinde kırsal evlerde yaygın olarak kullanılan kerpicein basınç dayanımı özelliklerinin geliştirilmesine yönelik olarak Grewia Optivia (Beul) ve Pinus Roxburghii (Chir Pine) doğal fiberleri ile killi toprağın stabilizasyonunu araştırmışlardır. % 0,5, % 1, % 1,5 ve % 2 oranlarında liflerle hazırlanan numuneler farklı sürelerde küre tabi tutulmuş ve sonrasında sıkıştırma testi uygulanmıştır. Sonuç olarak doğal elyafın; killi toprağın basınç dayanımı artırdığı saptanmıştır.

Keskin vd (2017) çalışmalarında hem katkısız hem de katkı malzemeleri kullanılarak iyileştirilmiş ince daneli zeminlerin donma-çözölmeye maruz kalmadan ve maruz kaldıktan sonraki serbest basınç mukavemeti değışimlerini incelemişlerdir. Numuneler hem katkısız olarak hem de ağırlıkça %5 ve %10 oranlarında katkılı olarak hazırlanmıştır. Katkı malzemesi olarak mermer tozu, ponza tozu ve kireç tozu kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler; anında, 48 saat, 1 hafta ve bir ay olmak üzere farklı kür süreleri ile 1 ve 2 donma-çözölme çevrimlerinden sonra serbest basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Deney sonucunda serbest basınç mukavemetini mermer tozunun %25 seviyelerine kadar düşürdüğü, ponza tozunun %123 ve kireç tozunun %389 seviyelerine kadar yükselttiği görölmüştür. Donma çözölmeye maruz bırakılan numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde ise katkısız durumda %81 seviyelerine, mermer tozu katkılı durumda

%37, ponza tozu katkılı durumda %56 ve kireç taşı katkılı durumda %73 seviyelerine kadar azalma gözlemlenmiştir.

Yarbaşı (2018) çalışmasında; mermer tozu ve atık lastik parçalarıyla iyileştirilmiş düşük plastisiteli kırmızı kilin dayanımındaki değişimleri incelemiştir. Kırmızı kil birimine %0,5, %1, %2 atık lastik ve %5, %10, %15, %20 mermer tozu ilave edilerek 0 (3 saat), 1, 7, 28 gün ve +21°C'deki dayanımlarını belirlemiştir. 28 günlük kür sonrası %0.5 ( 2 mm) atık lastik ve %5 mermer tozu katkısıyla iyileştirilen kilin en yüksek dayanım değeri gösterdiğini gözlemlemiştir. Ayrıca karışıma donma çözülme deneyi uygulanmıştır. Mermer tozu ve atık lastik parçaları ile iyileştirilen killi zeminin dayanımında, ana malzeme ile mukayese edildiğinde belirgin bir iyileşme sağlandığını belirtmiştir.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Kil Mineralleri

Zeminler, kayaçların çeşitli yollarla (taşınma-yıkanma-kimyasal reaksiyon) ayrışmasıyla oluşur. Zeminler; ince ve kaba daneli olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre 0,075 mm dane çapı sınırı ince ve kaba daneli zeminlerin sınırı olup 200 No'lu ( $<0,075$  mm) eleğin altına geçen kısım ince daneli zeminler olarak isimlendirilir. İnce daneli zeminler kil ve silt birimlerinden oluşmaktadır.

Killer; dane boyutu 0,002 mm'den küçük, alümina ve silis içeriği yüksek, ince daneli sedimanlar olup, toprağımsı, su katılınca genellikle plastikleşen, kuruma veya pişmeyle sertleşebilen mineral malzemedir. Kilin içerisinde alüminyum silikatlarla beraber, demir, magnezyum, potasyum, kalsiyum, sodyum, kuvars gibi mineraller; kil minerali dışında kuvars, kalsit, feldispat ve prit gibi kil olmayan yabancı maddeler ile organik maddeler ve suda çözünebilen tuzlar da bulunur. Kristalimsi yapıya sahip olan killer yalnızca elektron mikroskobu ile görülebilirler (Holtz and Kovacs 1981). Kil minerallerinin çoğu asitte çözünmez, hidrofiliktir ve ıslakken elastiktir (Cernica 1995).

#### 2.1.1. Killerin özellikleri

**Renk:** Yapılarında bulunan metal oksitler sebebiyle killer doğada farklı renklerde bulunur. Killerin yapısında organik maddeler de yer almaktadır. Saf kil beyaz renktedir ve kaolin olarak isimlendirilir. Ayrıca killer sarı, pembe, kırmızımsı, mavimsi, gri, yeşil ve siyahımsı renklerde de bulunabilirler. Renk kilin içerisinde bulunan maddeler hakkında fikir verir. Limonit bulunması halinde kilin rengi esmer, demir peroksit bulunması halinde kilin rengi kırmızı, manganez bioksit bulunması halinde kilin rengi siyah, organik madde bulunması halinde ise kilin rengi menekşedir.

**Plastisite:** Kil içerisinde yeterli miktarda su katıldığında işlenebilir ve şekil verilebilir. Bu plastisite özelliğidir.

**Kohezyon:** Zemin danelerinin birbirini tutması kohezyon olarak adlandırılır. Kil bu özelliği su ile yoğrulduğu zaman gösterir.

**Rötre:** Kilin su ile yoğrulup sonrasında kurumaya bırakılması durumunda hacimsel olarak küçülmesidir.

**Özgül yüzey:** Birim kütleye düşen yüzey alanıdır ( $\text{mm}^2/\text{gr}$ ). Dane boyutu küçüldükçe özgül yüzey artacağından dolayı kilin su tutma özelliği artar.

**Elektriksel iletkenlik:** Ortamın elektrik taşıma kapasitesinin bir ölçüsüdür. Karışımdaki iyonların sayısı ve tipi ile alakalıdır. Kil-su sisteminde dane konsantrasyonu artarsa, kil yüzeyindeki iyonlar solüsyona karışır. Kolloidal danelerin hareketi ile elektriksel alan altındaki katyon iyonlarının iletkenliği solüsyonun iletkenliğini arttırmaktadır. Danenin yüzey alanı ile danedeki elektriksel yükün değeri ilgili olduğundan dolayı danenin davranışına etki eden elektriksel kuvvetlerin kitle kuvvetlerine göre değeri de danelerin birim kütlesine düşen yüzey alanı ile ilgilidir (Vural 2012).

**pH değeri:** Ortamda  $\text{OH}^-$  veya  $\text{H}^+$  iyonlarının bulunma derecesidir. Yüksek pH değeri dispersiyonu ve sıkı zemini, düşük pH değeri ise toprakta flokülasyonu ve gevşek zemini belirtir (Vural 2012; Demiral 2013).

**Katyon değişim kapasitesi (KDK):** Katyon değişim kapasitesi, izomorfik yer değiştirme kapasitesinin bir ölçüsü olup kristal yapıda herhangi bir değişiklik olmadan iyonların yerlerine eşit veya farklı değerli başka iyonlara bırakması izomorfik yer değiştirme olayı olarak ifade edilir.

İzomorfik yer değiştirme kil danelerine negatif yük sağlamakta olup bu dengesizliği önlemek için ortamdaki katyonlar kil danelerinin kenarlarına ve bloklar arasına girmektedir. Birçok durumda bu katyonlar yerlerini bir başka katyona da bırakabilmektedir. Oluşan yük dengesizliğini telafi edebilmek için gerekli katyon miktarına katyon değişim kapasitesi (KDK) denir. Katyon değişim kapasitesi spesifik yüzey alanının artması ile doğru orantılıdır. Katyon değişim hızı; kil mineraline, katyon ve anyonlarına bağlıdır (Ergene 1987). Killerde katyon değişiminin sebepleri; silika-alümina birimlerinin kenarlarındaki kırık bağlar ve örgü içi yer değiştirmelerdir (Ünver 2015).

### 2.1.2. Killerin kullanıldığı alanlar

Killer yapı malzemesi olarak kerpiç, tuğla, kiremit, fayans, seramik yapımı ile karayollarında, toprak baraj çekirdeklerinde ve drenaj kanallarında kullanılmaktadır. Ayrıca killer kağıt, plastik, tekstil, boya, cam, çimento, ilaç, kozmetik, deri, yağ sanayii gibi farklı birçok alanda daha kullanılmaktadır.

### 2.1.3. Killerin sınıflandırılması

Killer; minerolojik özelliklerine, geometrik yapılarına, kimyasal içeriklerine ve kullanım alanlarına göre sınıflandırılabilir. Çizelge 2.1'de killerin sınıflandırılması görülmektedir.

**Çizelge 2.1.** Killerin sınıflandırılması (Malayoğlu ve Akar 1995)

Minerolojik Özelliklerine Göre Killer	•Kaolin grubu
	•Smektit (Montmorillonit) grubu
	•Mika grubu
	•Klorit grubu
	•İllit grubu
Geometrik Yapılarına Göre Killer	•Attapulgit grubu
	•Amorf grup
	•Kristal grup

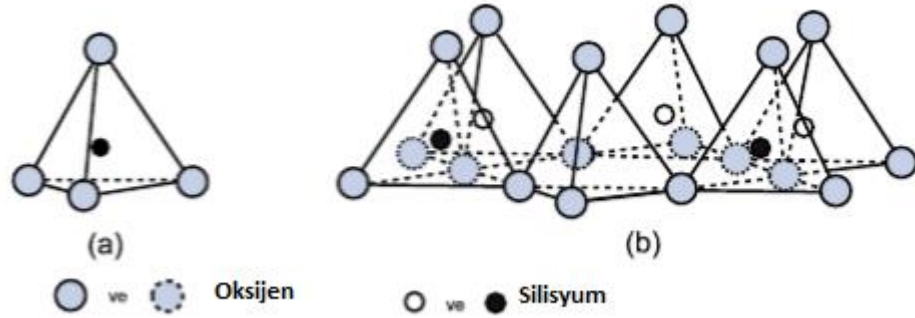
**Çizelge 2.1.** (devam)

Kimyasal İçeriklerine Göre Sınıflandırma	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Yüksek alüminyum içerikli</li> <li>•Boksit içerikli</li> <li>•Silikat içerikli</li> <li>•Demir içerikli</li> <li>•Kalsit içerikli</li> <li>•Karbonat içerikli</li> </ul>
Fiziksel Sınıflandırma	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Plastik özelliğine göre</li> <li>•Dane boyutuna göre</li> <li>•Refrakter özelliğine göre</li> <li>•Renk özelliğine göre</li> </ul>
Kullanım Alanlarına Göre Sınıflandırma	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Kaolinler</li> <li>•Bağlama Kili</li> <li>•Halloysit Türü Kil Grubu</li> <li>•Şamot Killeri</li> <li>•Bentonitler</li> <li>•Yıkama Killeri</li> <li>•Diğer Killer</li> </ul>
Üretildikleri Yatak veya Bölgeye Göre Sınıflandırma	

#### 2.1.4. Kil zeminlerin mineral yapısı

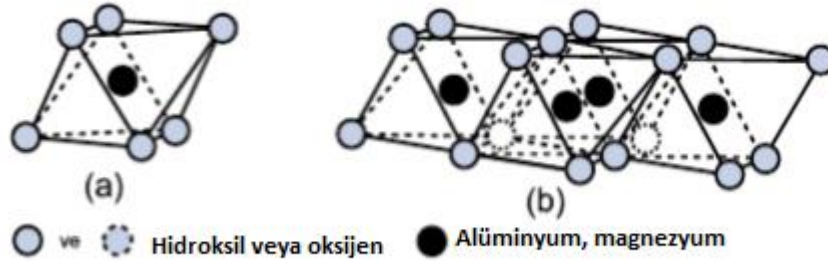
Kil mineralleri, kayaçları oluşturan esas minerallerin ayrışmasıyla oluşmuş, alüminyum, magnezyum ve demirin kompleksleri olan ikincil silikatlardır. Kil mineralleri tabakaların dizilişi ve düzenine göre tetrahedral (düzgün dört yüzlü) ve oktahedral (düzgün sekiz yüzlü) olmak üzere iki basit kristal yapıdan oluşur.

Tetrahedrallerde, silisyum ve oksijenlerden oluşan atom grupları 4 oksijen atomunun her biri bir köşeyi oluşturacak şekilde dört yüzlü geometrik bir yapıda ve bir aradadırlar. Tetrahedral oksijenlerinin diğer tetrahedral birimler tarafından paylaşımı ile silikat tabaka yapıları oluşur (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Tetrahedral tabakası a) Tetrahedron yapıtaşı b) Silikat tabakası (Fell et al. 1992)

Oktahedrallerde ise, alüminyum (Al), demir (Fe) ve magnezyum (Mg) gibi iyonların etrafında 6 oksijen (O) ve hidroksil (OH<sup>-</sup>) iyonları olacak şekilde sekiz yüzlü geometrik bir yapı tabakası mevcuttur. Oktahedral oksijenlerinin diğer oktahedral birimler tarafından paylaşımı ile alümina tabaka yapıları oluşur (Şekil 2.2).



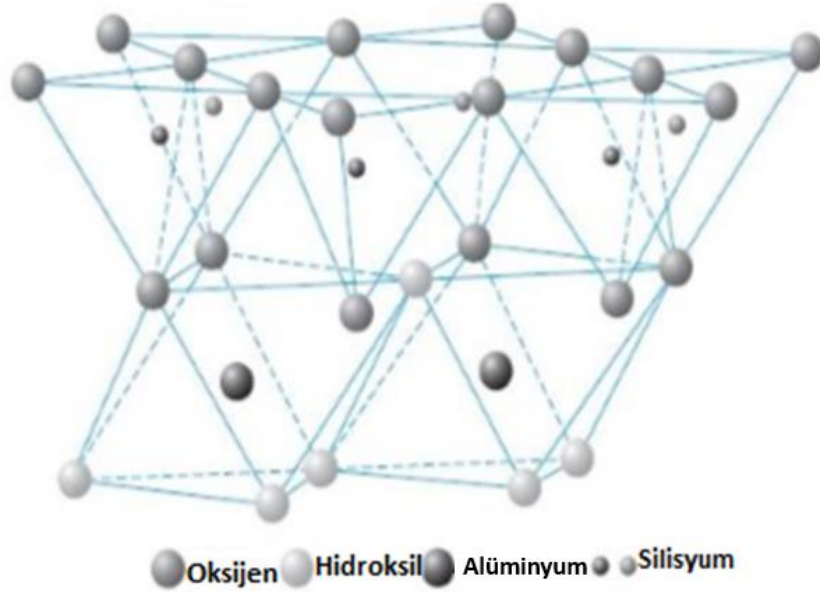
Şekil 2.2. Oktahedral tabakası a) Oktahedron yapıtaşı b) Alümina tabakası (Fell et al. 1992)

Tetrahedral ve oktahedral tabakaların farklı kombinasyonlar oluşturmasıyla farklı kil mineralleri oluşur. Kil minerallerinin sınıflandırılmasında göz önünde bulunan hususlar: Tabaka kalınlığı, tabakanın iyonik özelliği ve tabakaların üst üste diziliş düzenidir.

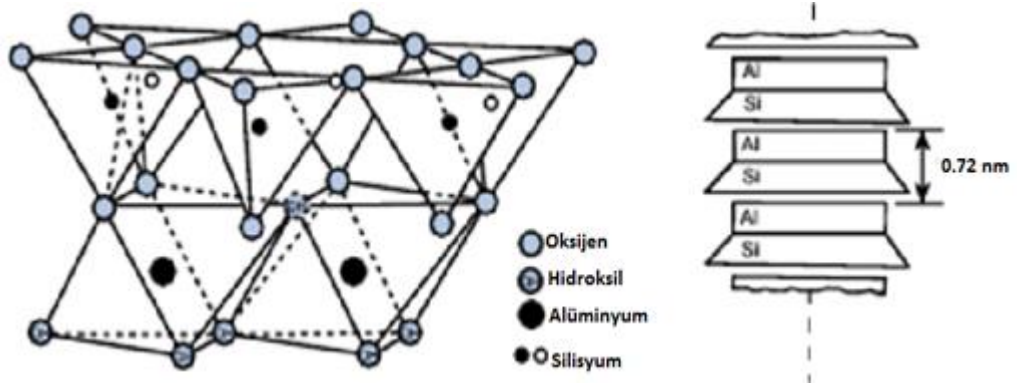


### 2.1.5. Bazı kil mineralleri

**Kaolinit;** bir dörtyüzlü (silika) ve bir sekizyüzlü (alümina ve gibsit) levhanın tekrarlı katmanlarından oluşmuş olup partikülleri yaklaşık 0,1 µm kalınlığında ve 1µm çapındadır (Şekil 2.3). Magmatik kayalarda bulunan feldispatların ayrışması sonucunda meydana gelmiş olan kaolinitlerin şişme özelliği çok az olup optik mikroskop ve X ışınları ile ayırt edilebilir ve asitlerde erimezler. İki levhanın (bir dörtyüzlü bir sekiz yüzlü) birer tanesinin bir katman oluşturmasından dolayı kaolinit 1:1 minerali olarak adlandırılır (Holtz and Kovacs 1981). Kaoliniti oluşturan tabakalar arasında bağ kuvvetleri güçlü olup tabakalar arasına su iyonları giremez. Suya karşı duruşunu muhafaza edebilmelerinden dolayı seramik sanayiinde tercih edilirler. Kaolinitin atomik yapısı Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te görülmektedir.



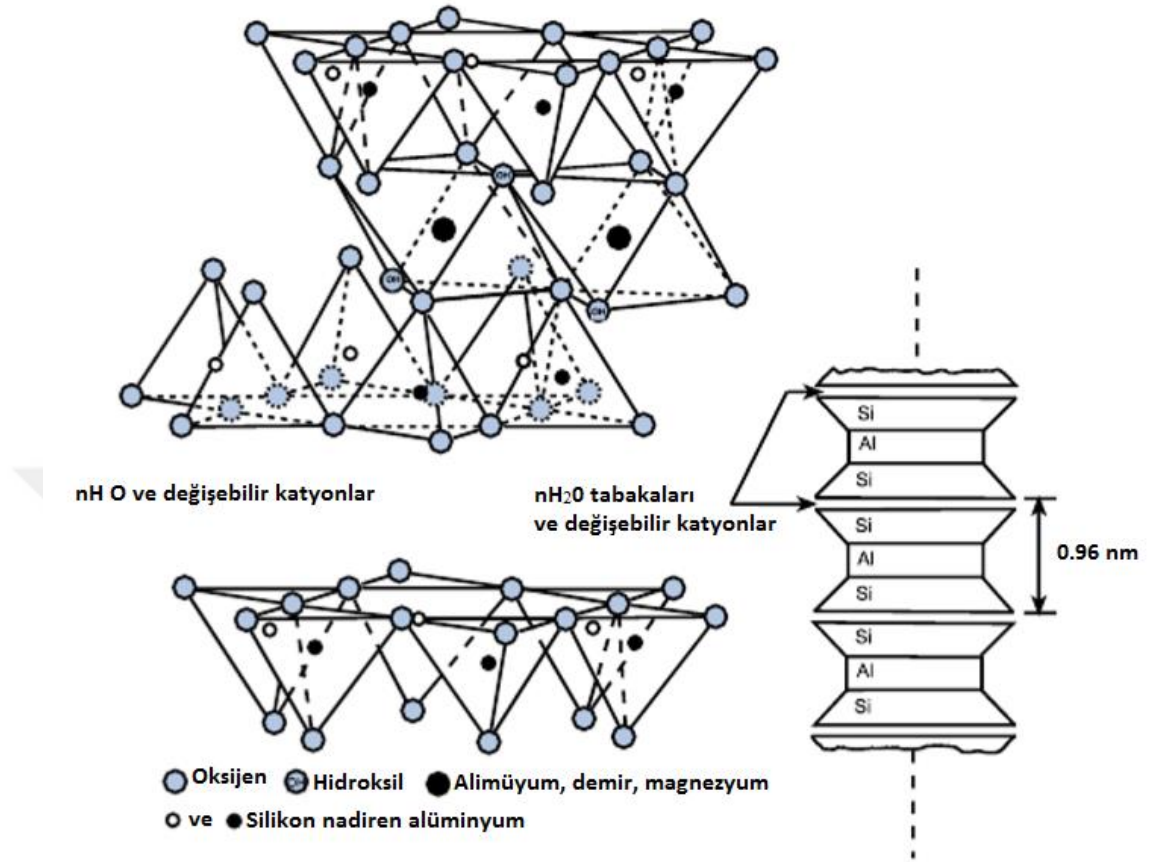
Şekil 2.3. Kaolinitin yapısı (Das and Sobhan 2014)



**Şekil 2.4.** Kaolinit kil mineralinin atomik yapısı ve şematik gösterimi (Fell *et al.* 1992)

**Montmorillonit;** iki dörtyüzlü (silika) levhanın ve bir sekizyüzlü (alümina) levhasının birleşiminden oluşmuş olup 2:1 tabakalıdır (Şekil 2.5). İki Si tetrahedralinin arasına Al oktahedralinin girmesiyle oluşan üç tabakalı, 0,5µm'den daha küçük dane büyüklüğüne sahip bir mineraldir. Birim hücreleri birbirine çok zayıf Van der Waals bağlarıyla bağlıdır ve bu bağlar kolayca ayrılabilirler.

Montmorillonit içeren killer yüksek plastiklik özeliğine sahip olup su ile birleştiklerinde fazlasıyla şişerler. Bentonit bir montmorillonit grubu kil minerali olup fazlasıyla su alıp şişme özelliği dolayısıyla sondaj çamuru olarak kullanılmaktadır.

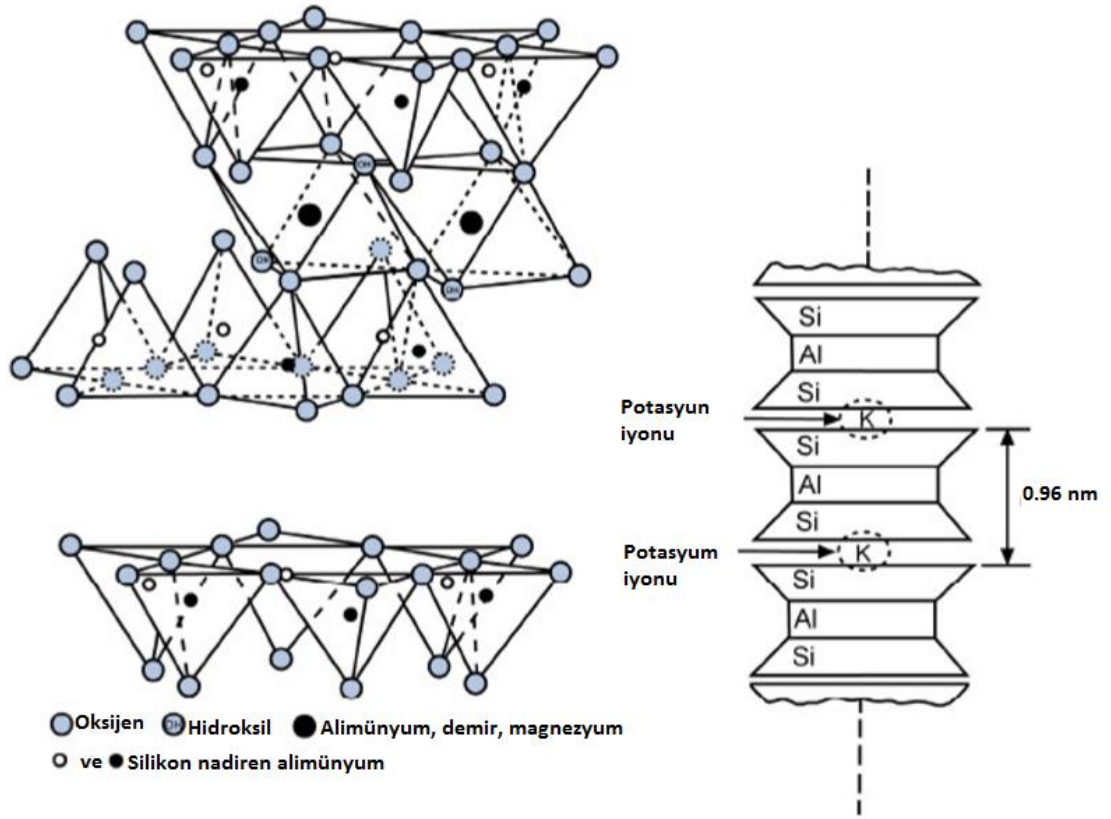


Şekil 2.5. Montmorillonit kil mineralinin yapısı ve şematik gösterimi (Fell *et al.* 1992)

**Klorit** minerali; 2:1:1 minerali olarak da isimlendirilen ve silika levha, alümina levha, başka bir silika levha ve gipsit ( $Al^{+++}$ ) veya brusit ( $Mg^{++}$ ) levhasından oluşmuştur. İllit ve montmorillonit mineralleri ile kıyaslanırsa klorit daha az aktiftir (Holtz and Kovacs 1981).

**İllit** minerali, mikaya benzer bir kil minerali olup yapısı montmorillonit ile aynı olmakla beraber yapı blokları arasına giren potasyum iyonları bağın bir miktar kuvvet kazanmasını sağladığından su moleküllerinin bağlar arasına girmesi bir nebze önlenmiş olur (Şekil 2.6). İllit su ile etkileştiği zaman genişleme özelliği gösterir.

Bazı kil minerallerin özellikleri Çizelge 2.2’de, yine bazı kil minerallerinin tabaka yapıları Çizelge 2.3’te verilmiştir.



Şekil 2.6. İllit kil mineralinin atomik yapısı ve şematik gösterimi (Fell *et al.* 1992)

Çizelge 2.2. Bazı kil minerallerin özellikleri (Önalp 1983)

	Montmorillonit	Kaolinit	İllit
Dane büyüklüğü	10 A-1	0.1-5	0.1-2
Dane şekli	Eş boyutlu yaprak	Altı köşeli pul	Pul
Özgül yüzeyi (m <sup>2</sup> /g)	50-800	10-20	65-100
Dane kalınlığı	10A	0.05-2	30A
Likit limit	110-710	30-70	60-120
Plastisite indisi	51-100	26-38	34-60
Şişme-büzülme yeteneği	Yüksek	Düşük	Orta
Özgül ağırlık	2.35-2.70	2.60-2.95	2.60-3.0

**Çizelge 2.3.** Bazı kil minerallerinin tabaka yapıları ve tabaka yapılarının gösterimi (Cernica 1995; Mitchell and Soga 2005; Kurt Albayrak 2014)

Kil minerali	Tabaka yapısı	Tabaka yapısının gösterimi	Kimyasal formülü
<b>Kaolinit</b>	1:1	<p>0,72 nm</p>	$(OH)_8Al_4Si_4O_{10}$
<b>İllit</b>	2:1	<p>1 nm</p>	$(OH)_4K_y(Al_4Fe_4Mg_4)(Si_8-yAl_y)O_{20}$ (y:1'den 1,5'e kadar değer alabilir)
<b>Montmorillonit Smektit</b>	2:1	<p>0,96 nm</p>	$(OH)_4Al_4Si_8O_{20.n}H_2O$
<b>Klorit</b>	2:1:1	<p>1,4 nm</p>	2:1 tabakası: $(OH)_4(SiAl)_8(Mg.Fe)_6O_{20}$ Ara tabaka: $(MgAl)_6(OH)_{12}$

Oluşan kil minerallerinin türünün tayininde; killerin oluşturdukları ortamın basınç değeri, ısısı ve ortamın asit dengesi etkindir.

Düşük ısı ve basınç altında ve asidik ortamda kaolinit tipi mineraller; alkali iyonu olarak potasyum mevcutsa ve bunun konsantrasyonu belli bir miktarın üzerinde ise

montmorillonit minerali oluşmaktadır. 350°C'nin üstündeki sıcaklıklarda ve orta dereceli bir basınç altında kaolinit yerine pyrofit, daha yüksek sıcaklık ve basınçlarda ise diğer alüminyumlu killer oluşur. Killerin kimyasal analizleri ile nadiren kil mineralleri birbirinden ayırt edilebilir fakat X ışınları difraksiyonu ve diferansiyel termal analiz gibi yöntemlerle kil mineralleri birbirinden ayırt edilebilmektedir.

Nadir olarak saf halde bulunan killer yabancı maddelerle karışık halde bulunmaları durumunda killerin fiziksel özellikleri bu maddelerin etkisi sonucunda daha karmaşık bir hal alır. Fiziko kimyasal özellikler bakımından toprak alkalileri, alkali bazlar, asitler killerin karakterlerini değiştirirler. Montmorillonit ve bentonitlerde belirgin şekilde görülen kolloidlik karakterini dikkate almak gerekmektedir. Bentonitler kendi ağırlıklarının 6-7 katı su ile şişip jelliklerini artırırlar. Ayrışmalar sonucunda kolloidal şekiller altında silisyum ve alüminyumun serbest kalması mümkün olup alüminyum pozitif silisyum negatif bir kolloid meydana getirir. Alüminyum ve silisyumun serbest kalması sonucunda karşılıklı pıhtılaşma oluşur ve pıhtı git gide yavaş fakat sürekli olarak alüminyum hidrosilikat kristaline dönüşür (Ünver 2015).

#### **2.1.6. Kil minerallerinin tanımlanması**

Killerin kristal yapıları gözle veya normal laboratuvar mikroskoplarıyla görülemez. Dolayısıyla kil minerallerinin tanımlanması; diferansiyel termik analiz, X-ışınları, elektron saçımı, elektron mikroskobu ve kızıl ötesi ışınları emme yöntemlerinden biriyle yapılmaktadır.

**Diferansiyel termik analizde;** zemin oda sıcaklığının 1100°C'nin üzerinde yaklaşık 10°C/dak hızla ısıtılır. Bu esnada deney örneğinin gösterdiği tepkime özelliklerinden faydalanılıp kil minerali tanımlanır.

**X-ışını kırılma deneyinde;** kristal içinde atomların dizildiği düzlemler arasındaki uzaklıklar ve X-ışınlarının bu düzlemlerden yansıma şiddeti ölçülür, her kristalin atom yapısı farklı olduğundan dolayı emilen ve yansıyan ışın yoğunluğu farklıdır. Kil

minerallerin tanımlanması için en çok kullanılan yöntem olan X-ışını difraktometresinde dalga uzunlukları 0,71-1,54-2,29 Å ( $1\text{Å}=10^{-7}$  mm) ayarlanmış ışınlar çok ince öğütülmüş kil numune üzerine gönderilir. Kil kristallerinde atomik düzlem aralıkları 1Å civarındadır. Işınlarla uyum sağlandığında düzenli olarak yansıyan ışınlar bir fotoğraf kağıdına yansıtılarak ya da sayaçta ölçülür.

**Elektron mikroskopu** ile kil minerallerinin kristal şekilleri, biçimleri ve büyüklükleri 20.000 büyütülerek belirlenebilir.

Ayrıca benzidin, safranin ve malachite yeşili gibi kimyasal maddelerle kil mineralleri boyanır ve mineraller aldıkları renklerle birbirinden ayırt edilebilir.

## 2.2. Kil Zeminlerin İyileştirilmesi

İnşaat mühendisliği uygulamalarında zeminler ya taşıyıcı tabaka ya da inşaat malzemesi olarak işlev görmektedir. Zemin koşulları tasarım ve yapım yöntemleri üzerinde önemli bir etken teşkil etmektedir. İnşaat mühendisi; güvenli, fonksiyonel ve ekonomik yapılar tasarlamak ve inşa etmekle görevlidir.

Zeminin mühendislik özellikleri ise zeminin cinsi ve arazi koşullarına bağlı olarak (su muhtevası, konsolidasyon basıncı, sıklık derecesi, yükleme ve drenaj koşulları gibi) geniş bir aralık içinde değişkenlik göstermektedir. Zeminler istenilen özelliklere her zaman sahip değildir. İnşaat yapılacak alanın değiştirilmesi veya istenilen özelliklere sahip olmayan zeminlerin atılarak yerine istenilen özelliklere uygun zeminlerin kullanılması çeşitli sebeplerle (teknolojik, ekonomik, uygulama zorluğu vb.) çoğu kere uygun çözümler olarak kabul edilmediğinden dolayı bu gibi durumlarda arazideki zemin özelliklerinden kaynaklanan sınırlamaları belirlemek ve uygun tasarım sağlayacak şekilde zemin iyileştirilmesi yoluna gidilmektedir. Zemin iyileştirmede asıl amaç zeminin boşluk oranının azaltılması, boşluklarının uygun karışımlarla doldurulmasıdır (Ünver 2015).

Problemliler zeminler olarak; taşıma gücü düşük, sıkışabilirliği yüksek, sıvılaşıma yeteneği fazla olan zeminler gösterilebilir. Biraz daha açık ifade edilirse normal konsolide killler, aşırı konsolide killler, killi siltler, gevşek kumlu zeminler, ve rastgele yerleştirilmiş dolgular problemliler zeminlerdir.

Killer; plastik davranış göstermesi, su emme, büzülme, şişme, oturma, gibi özellikleri dolayısıyla problemliler zeminler olarak değerlendirilmektedir. Hem kohezif hem de plastik özelliğe sahip olan killler ıslandığında şişen, kurduğunda büzülen ve yükleme durumunda konsolide olup suyunu dışarı atabilen çok ince dane boyutuna sahip zemin olarak tanımlanır (Kızılçelik 2010). Kil; su ile karşılaştığı zaman bünyesinde bulunan boşluklara su alıp şişer, su kaybettiğinde ise büzülür. Bu şişme ve büzülme davranışı üzerine yapılan yapıların güvenli bir şekilde taşınması anlamında emniyetsiz bir durum oluşturmaktadır.

Şişen kil; kaplamalara (havaalanı, kaldırım vb.), hafif yapılara, dayanma duvarlarına vb. olumsuz etkiler uygular. Genel olarak zeminin plastisitesi arttıkça sıkışma ve şişme potansiyeli artmakta, su geçirgenliği azalmakta, arazi kazı ve dolgu işlemleri sırasında ise zorluklarla karşılaşmaktadır (Palalı 2006).

Bu kapsamda kil zeminlerin; çimento, kireç, uçucu kül, cam tozu, mermer tozu, silis dumanı, doğal/sentetik liflerle iyileştirilmesi yoluna gidilmektedir.

### **2.3. Uçucu Kül (UK)**

Uçucu kül (UK), termik santrallerde düşük kalorili linyit kömürün ince dane boyutunda öğütülerek yakılması sonucu oluşan ve baca gazları ile taşınarak siklon veya elektro filtrelerde toplanan ve boyutu 1-150 µm arasında değişen kül danecikleridir.

Uçucu kül termik santrallerde pulvarize kömürün yanması sonucu; bacadan çıkan duman içindeki çok ince zerrecikler halinde bulunan ve atık malzemelerin %75– 80 ini oluşturan



uçucu kül ile kazanın dibinde oluşan ve kazan külü olarak adlandırılan taban külüdür (Özdemir 2001).

TS 639'a göre uçucu kül, toz halinde veya öğütülmüş taş kömürü veya linyit kömürünün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucunda oluşan ve baca gazları ile sürüklenen, silis ve alümino-silisli toz halinde bir yanma kalıntısıdır (Güvercin 2002). Uçucu kül; rengi kremden koyu griye doğru değişir, renk olarak çimento tozundan farklı değildir (Cripwell 1992).

Ülkelerin ekonomik olarak büyümesi beraberinde enerji tüketimlerinin de artmasına neden olmaktadır. Enerji tüketimindeki artış ve endüstriyel gelişim artan atıklar ile birlikte çevre sorunlarını beraberinde getirmektedir. Enerji tüketiminin sonucu oluşan ve çevre sorunu haline gelen uçucu külün dönüşümü bu noktada büyük önem arz etmektedir.

Ülkemizde son yıllarda artan hidroelektrik baraj sayısına rağmen elektrik enerjisinin büyük bir bölümü termik santraller yolu ile üretilmektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na göre; 2018 yılı ilk yarısı itibarıyla ülkemiz kurulu gücü 87.139 MW'a ulaşmış olup; kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı; %32,00'si hidrolik, %26,4'ü doğal gaz, %21,4'ü kömür, %7,7'si rüzgâr, %5,4'ü güneş, %1,3'ü jeotermal ve %5,8'i ise diğer kaynaklar şeklindedir.

Yine Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığına göre; ülkemizde elektrik enerjisi üretim santrali sayısı, 2018 yılı ilk yarısı itibarıyla 6886 (lisanssız santraller dahil) olup, mevcut santrallerin 636 adedi hidroelektrik, 41 adedi kömür, 232 adedi rüzgâr, 40 adedi jeotermal, 303 adedi doğal gaz, 5422 adedi güneş, 212 adedi ise diğer kaynaklı santrallerdir.

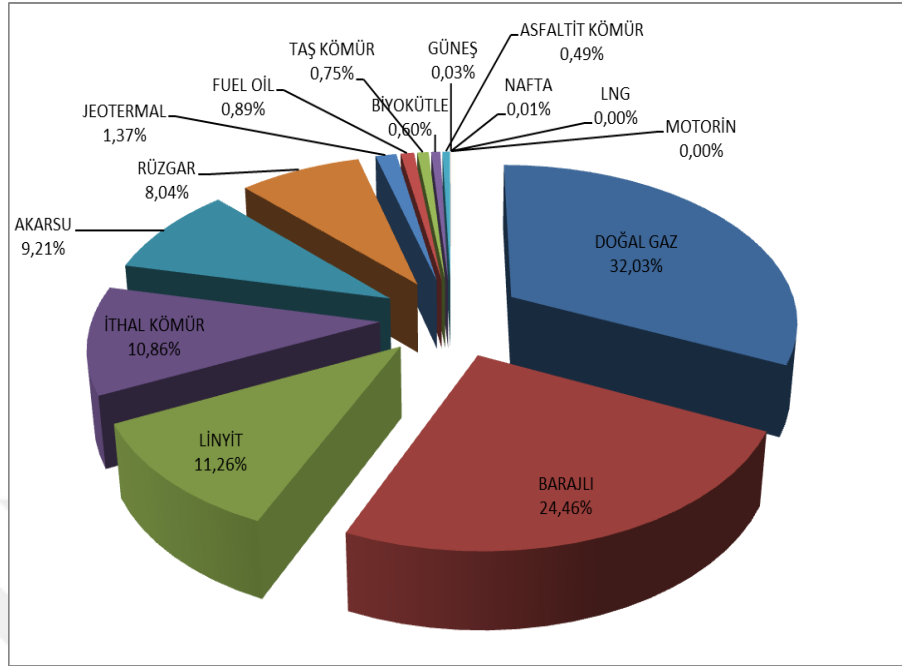
2016 yılında ülkemizde Türkiye İstatistik Kurumu'na göre termik santrallerde 12 bin tonu tehlikeli olmak üzere toplam 19,5 milyon ton atık oluşmuştur. Toplam atığın %87,8'ini kül ve cüruf atıkları, %12,2'sini atıksu arıtım çamurları, kimyasal atıklar, kağıt, plastik, metalik atıklar ile evsel ve benzeri atıklar oluşturmaktadır. Toplam atığın %83,3'ü kül

dağı, kül barajı veya düzenli depolama tesislerinde bertaraf edilmiş; %16,7'si ise atık geri kazanım tesislerine ve maden/taş ocaklarına gönderilmiştir (TUIK 2017). Ülkemizin 2018 yılı mayıs ayı sonu itibariyle lisanslı elektrik kurulu gücünün kaynak bazında dağılımı ve 2017 yılı mayıs ayı değeriyle karşılaştırılması Çizelge 2.4'te gösterilmiştir.

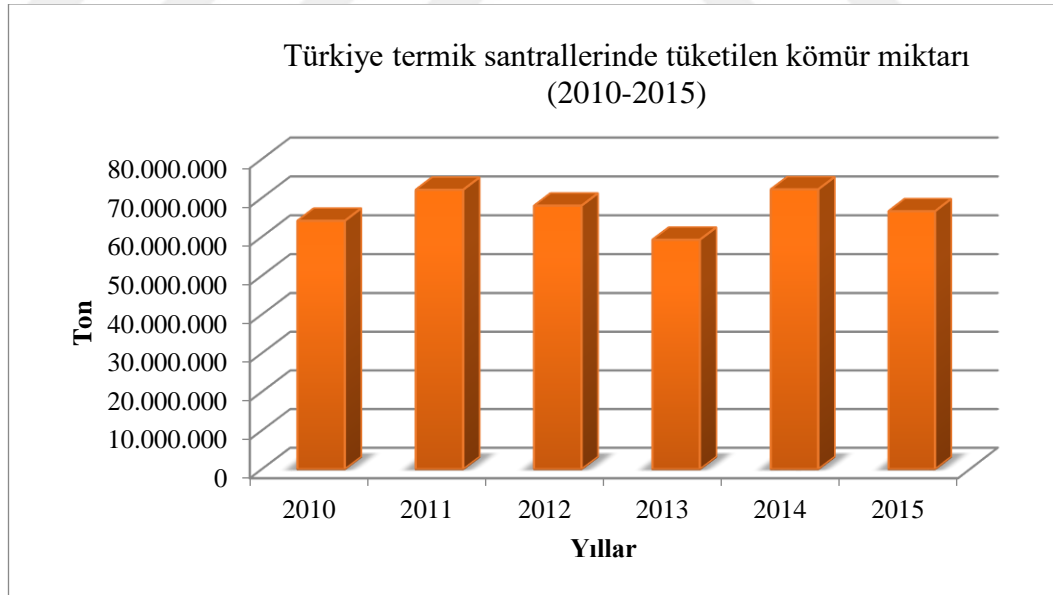
**Çizelge 2.4.** 2018 yılı mayıs ayı sonu itibariyle lisanslı elektrik kurulu gücünün kaynak bazında dağılımı ve 2017 yılı mayıs ayı değeriyle karşılaştırılması (EPDK 2018)

Kaynak Türü	2017		2018		Değişim (%)
	Mayıs Değeri (MW)	Pay (%)	Mayıs Değeri (MW)	Pay (%)	
Doğalgaz	25.808,95	32,80	26.357,06	32,03	2,12
Barajlı hidrolik	19.675,13	25,00	20.125,83	24,46	2,29
Linyit	9.269,56	11,78	9.267,12	11,26	-0,03
İthal kömür	7.616,35	9,68	8.938,85	10,86	17,36
Akarsu	7.252,83	9,22	7.581,47	9,21	4,53
Rüzgar	6.126,41	7,79	6.617,03	8,04	8,01
Jeotermal	850,78	1,08	1.129,24	1,37	32,73
Fuel oil	690,39	0,88	728,31	0,89	5,49
Taş kömürü	597,90	0,76	616,15	0,75	3,05
Biyokütle	371,33	0,47	491,54	0,60	32,38
Asfaltit	405,00	0,51	405,00	0,49	0,00
Güneş	12,90	0,02	22,90	0,03	77,52
Nafta	4,74	0,01	4,74	0,01	0,00
Lng	1,95	0,00	1,95	0,00	0,00
Motorin	1,04	0,00	1,04	0,00	0,00
<b>Genel Toplam</b>	<b>78.685,23</b>	<b>100,00</b>	<b>82.288,23</b>	<b>100,00</b>	<b>4,58</b>

Ülkemizin 2018 yılı Mayıs ayı itibariyle lisanslı elektrik kurulu gücünün kaynak bazında dağılımı Şekil 2.7'de, ülkemizde 2010-2015 yılları arası tüketilen kömür miktarı ise Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.7.** 2018 yılı mayıs ayı sonu itibariyle lisanslı elektrik kurulu gücünün kaynak bazında dağılımı (EPDK 2018)



**Şekil 2.8.** Türkiye termik santrallerinde tüketilen kömür miktarı, 2010-2015 (TEİAŞ)

Bir termik santralde açığa çıkan mineral atıkların çok büyük kısmını uçucu küller oluşturmaktadır. Oluşan atıkların yaklaşık %80'inin uçucu küllerden oluştuğu

varsayılırsa, Türkiye'nin yıllık uçucu kül üretimi yaklaşık 20 milyon ton olarak hesaplanabilir (Tangüler vd 2015).

### 2.3.1. Uçucu küllerin özellikleri

Uçucu kül (UK), termik santrallerde düşük kalorili linyit kömürün ince dane boyutunda öğütülerek yakılması sonucu oluşan, baca gazları ile taşınarak siklon veya elektro filtrelerde toplanan ve boyutu 1-150 µm arasında değişen önemli bir yan üründür. Kömürün yüksek sıcaklıklarda yakılması sonucu meydana gelen ergimiş malzeme soğuyarak gaz akışı ile kısmen veya tamamen küresel şekilli çok ince kül daneciklerine dönüşmektedir. Oluşan kül danecikleri baca gazları ile sürüklendiklerinden dolayı uçucu kül olarak isimlendirilirler (Görhan vd 2008).

SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve CaO uçucu külde bulunan başlıca bileşenler olup bunların miktarları uçucu külün tipine göre değişmektedir. Ayrıca MgO, SO<sub>3</sub> alkali oksitler de uçucu kül içerisinde minor bileşen olarak bulunmaktadır. Uçucu küldeki temel oksitlerden; SiO<sub>2</sub> %25-60, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> %10-30, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> %1-15 ve CaO %1-40 oranlarında bulunmaktadır. Bu farklı aralıklardaki değerler uçucu külün tipini karakterize etmektedir (Türker vd 2003).

Kömürün farklı yerlerden elde edilmesinden dolayı uçucu külün kimyasal yapısı farklılıklar göstermesine rağmen temel bileşenler silis ve alüminadır. Uçucu külün dane şekli yüzey geriliminden dolayı küresel, morfolojisi ve yapısı ise değişken ve komplekstir. Ayrıca dane yapısı ve boyutu soğutma hızından etkilenmektedir (Görhan vd 2008).

Uçucu küller; amorf (camsı yapıda), içi boşluklu veya dolu yapıda kürecikler ile mineral parçacıklar ve yanmamış daneciklerden meydana gelen, çimentodan daha koyu gri renkte, çok küçük daneli, akıcı, elle dokunulduğunda yumuşak bir malzemedir.

Mikroskopla bakıldığında çeşitli şekil ve büyüklükte, genellikle küresel, şeffaf, bazen açık renkli, bir kısmı siyah, çok az esmer, kırmızı daneciklerden meydana gelir. Renginin koyuluğu/açıklığı elde edildiği kömüre ve yanma şekline bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Linyit kömüründen elde edilen uçucu küller daha esmer, iyi yanmış uçucu kül iyi yanmamış olan uçucu külden daha açık renktedir. Yanmamış karbonlar uçucu küle siyah renk veren etkenlerden biridir (Yıldız ve Yıldız 2002).

**İncelik:** Genel olarak ortalama boyutları 20–50 µm arasında olan uçucu külün inceliği genellikle 1–200 µm arasında olup kömürün öğütülme derecesine, kömürün türüne bağlı olarak değişmektedir. Bacadan kaçan uçucu kül miktarı azaldıkça uçucu külün inceliği artar. Taş kömürü uçucu külü, linyit uçucu külünden; elektro filtrelerde toplanan uçucu küller ise siklonlarda toplananlardan daha incedir (Atanur 1971).

**Yoğunluk:** Uçucu külün inceliğine ve mineralojik yapısına bağlı olup yapısında bulunan silikat, alüminat, demir ve yanmamış karbon miktarı ile değişmektedir. Uçucu küllerin incelikleri arttıkça hacimsel yoğunlukları da artmaktadır. Yüksek demir içeriği uçucu külün yoğunluğunu artırırken yüksek miktarlarda alüminat, silikat ve yanmamış karbon ise yoğunluğu azaltmaktadır (Toros 1987; Erşan 1996).

**Karbon Miktarı:** Uçucu küllerdeki karbon, yanıcı olan danelerin üzerinde ince karbon tabakası veya ayrı ayrı daneler olarak bulunmaktadır. Yanma olayının yüksek oranda gerçekleştiği termik santrallerde yanmamış karbon miktarı çok düşüktür. Uçucu külün yapısındaki karbon miktarı kızdırma kaybından az olmalıdır. Uçucu küllerdeki karbon danelerin dane boyutu çoğu zaman diğer danelerden daha büyüktür (Atanur 1971).

**Asitlerin Etkisi:** Uçucu küllere asitlerin etkisi çok azdır. Uçucu külün yapısında bulunan amorf silis daneciklerinin çözünürlüğü pH değeri yükseldikçe artmakta olup amorf silisin çözünürlüğü pH'ın bir fonksiyonudur (Aras 1971).

**Mekanik Dayanım:** Uçucu küllerin mekanik dayanımları bünyelerinde bulunan boşluklu malzeme yüzdesine bağlı olarak değişir (Yıldız ve Yıldız 2002).

### 2.3.2. Uçucu küllerin sınıflandırılması

Uçucu küllerin sınıflandırılması, kimyasal bileşen yüzdesi temelinde ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları temel alınarak yapılır. ASTM C 618 standardına göre uçucu küller, F ve C ; TS EN 197-1 standardına göre ise uçucu küller silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere 2 farklı şekilde sınıflandırılırlar.

#### ASTM C 618'e göre:

**F sınıfı uçucu küller**, bitümlü kömürden veya taş kömüründen elde edilen  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  yüzdesi %70'den fazla olan, CaO yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli uçucu kül olarak da adlandırılan ve puzolanik özellik gösteren uçucu küllerdir.

**C sınıfı uçucu küller** ise, linyit veya yarıbitümlü kömürden elde edilen ve  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  toplam miktarı %50'den fazla olan, CaO oranı %10'da fazla olduğu için yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılan, puzolanik özelliğın yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahip uçucu küllerdir (ASTM C 618 2005).

#### TS EN 197-1'e göre:

**(V) sınıfı uçucu küller**, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel daneciklerden oluşan, esas reaktif olarak  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'den meydana gelen, geri kalanı demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. V sınıfı uçucu küllerde reaktif silis miktarı %25'den fazla, reaktif CaO oranı ise %10'dan az olmak zorundadır.

**(W) sınıfı uçucu küller** ise hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan, esas bileşen olarak reaktif CaO, reaktif  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'den meydana gelen, geri kalanı  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde; reaktif silis miktarı da %25'den fazla, reaktif CaO oranının %10'dan fazla olmak zorundadır (TS EN 197-1 2002).

### 2.3.3. Uçucu küllerin kullanım alanları

Her endüstriyel atık gibi uçucu külün de değerlendirilmesi, artı değer kazandırılmasına yönelik olarak çalışmalar yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Uçucu kül genel olarak; çimento ve betonda, tuğla ve gaz beton üretiminde, problemlili zemin uygulamalarında kullanılmaktadır. Uçucu kül ayrıca agrega olarak da kullanılmaktadır (Kaplan ve Gültekin 2010).

### 2.4. Saman

Saman; buğday, arpa, yulaf, pirinç vb. tahıl bitkilerinin başaklarının saplarından ayrılmasının ardından bitkinin geriye kalan kısımlarının makine aracılığıyla öğütülüp kesilmesiyle elde edilir. Şekil 2.9'da kesilmiş saman örneği görülmektedir.



**Şekil 2.9.** Kesilmiş saman örneği

Saman yıllık olarak yenilenebilen, belli zamanlarda bol ve kolay bulunabilen, çoğu iklim bölgesinde yetiştirilebilen bitkilerden elde edilen bir malzemedir. Saman yüzyıllarca bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Mısır koçanı olarak adlandırılan toprak ve saman karışımı İngiltere'de yüzyıllarca kullanılmıştır. Almanya'da yapı ustalarının buldukları ve 'leichtlehm' olarak adlandırdıkları kile yatırılmış, sonradan ahşap kalıplarda şekillendirilmiş saman karışımı bugün halen köylerde kullanılmaktadır (İrklı

Eryıldız ve Başkaya 2007). Şekil 2.10’da saman balyalarıyla ev yapım örneği görülmektedir.



**Şekil 2.10.** Saman balyalarıyla ev yapım örneği (İrklı Eryıldız ve Başkaya 2007)

Saman besin değeri düşük olmasına rağmen ülkemizde hayvancılıkta yem maddesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca hayvancılıkta ahırlarda hayvanların altlarının kuru tutulması için serilmek suretiyle de kullanılmaktadır. Son yıllarda kültür mantarı yetiştiriciliğinde etkin olarak kullanılmaya başlanmıştır. Hasattan sonra arazide toplanmayan saman erozyon kontrolünü de sağlamaktadır. Saman, besicilikte yem olarak kullanılması haricinde mevsim sonunda artanı yakılan bir üründür. Samanın yakılması yerine son yıllarda balya yapım tekniği ile faydalı bir şekilde kullanılması sağlanmaya başlanmış böylece balya samanından inşa edilen yapılar ortaya çıkmaya başlamıştır. Böylece samanın yakılması sonucu ortaya çıkan karbon monoksit ve diazot monoksit üretiminin önüne geçilmeye başlanmış ve ülkelerin ekonomisine katkıda bulunulmuştur. Samanı sert iken olumsuz olarak etkileyen etkenler; çürüme, ateş ve zararlı böceklerdir.

Türkiye İstatistik Kurumu verilerine göre Türkiye’de 2013 yılı saman üretimi 21,6 milyon ton, 2014 yılı saman üretimi 20,5 milyon ton, 2015 yılı saman üretimi 25,8 milyon ton, 2016 yılı saman üretimi 24,6 milyon ton, 2017 yılı saman üretimi 26 milyon ton tahmini olarak gerçekleşmiştir.



## 2.5. Kendir

Kendir, kenevir sapından çıkarılan liftir (Karaca ve Karaboğa 2017). Kenevir, ısırangillere yakın, cannabinaceae familyasından, odunsu ve tek yıllık bir bitkidir. Yıllık lif verimi oldukça yüksektir. Anavatanı Asya olan bu bitki çeşitli yollar izleyerek tüm dünyaya yayılmıştır (Acar ve Dönmez 2019). Genellikle tek ve kendine özgü yaprakları olan, azot içeriği yüksek topraklarda yetişen, 1-5 metre uzunluğunda yıllık bir bitkidir (Pate 1994). Kendir yoğunluğu 1,5 (g/cm<sup>3</sup>)'tür (Pickering *et al.* 2016). Su emme yüzdesi ise %85-%105 arasındadır (Li *et al.* nonim).

Lif olarak ise kendir; hafif ve dayanıklı olması dolayısıyla geçmişten bu zamana kadar çok çeşitli alanlarda kullanılmıştır: İlaç, kâğıt, yakıt (bio yakıt), kumaş, sabun yapımında; otomotiv, petrol ve petrokimya, kozmetik sanayiinde ihtiyaç duyulan maddelerden biri olarak kullanılmaya devam etmektedir. Şekil 2.11'de kenevir bitkisi görülmektedir.



**Şekil 2.11.** Kenevir bitkisi (Anonim 2019a)

Doğal selüloz lifi olmasına karşın kenevir lifi pamuktan farklı olarak önemli miktarda selüloz dışı maddeler içerir. Lif bileşiminde bulunan maddeler lif özelliklerine ve davranışlarına etki edeceği gibi üretim özelliklerine de etki etmektedir Kendir lifleri selülozun yanında hemiselüloz, lignin ve pektin içermektedir. Kendir lifleri lif demetlerinden oluşur ve her bir lif hücresi 20-35 mikrondur. Parlak olan kendir lifleri sarı-kahverengidir ve lifin enine kesiti poligonaldır. Kendir yüksek mukavemet,

dayanıklılık ve emicilik sağlayan bir doğal liftir. İyi elektrostatik özellikler, UV koruma sağlama ve anti alerjik özellikler gösterir (Gedik 2012).

Kenevir saptarından lif üç farklı yöntem ile elde edilir.

**Biyolojik havuzlama yöntemi:** Bu işlemdede kenevir saptarı çayırlara serilip mikroorganizmaların etkisine bırakılır. Rutubetin yüksek olduğu alanlarda, ilkbahar ile sonbaharda uygulanan bu işlemdede sıcaklık ve rutubetin etkisi mantarların çoğalmasını kolaylaştırır. Bu yöntemde çürüme olayı yavaş yavaş oluşur. Dolayısıyla daha yumuşak ve daha ince lifler elde edilir (Harmancıoğlu ve Yazıcıoğlu 1979).

**Mekanik yöntem:** Kenevir saptarının kırılması, ezilmesi suretiyle lifli kabuklarla odunsu kısımları birbirinden ayıran bir işlem olup; biyolojik havuzlama yöntemine göre daha kısa sürede ve daha ucuza mal edilmesine rağmen daha sert lifler elde edildiğinden, tekstilde kullanılan lif üretimine uygun bir yöntem değildir. Bu yöntemde hücreler arası pektin maddesinin mekanik yolla giderilmesi mümkün olmamaktadır (Harmancıoğlu ve Yazıcıoğlu 1979).

**Kimyasal yöntem:** Kenevirden lif üretimi için en uygun yöntem olup bu yöntemle saptardan ve çöplerden arınmış, temiz, eşit stapel uzunluğunda lifler elde edilir. Önce kenevir saptarı kesilir, sonra alkali banyoda basınç altında pişirilir, daha sonra bol su ile yıkanmak ve çalkalanmak suretiyle pektin maddesinden arındırılır. Daha sonra kurutulan ve fitil haline getirilen kendir lifleri pamukla da karıştırılarak ipliği elde edilir (Harmancıoğlu ve Yazıcıoğlu 1979). Çizelge 2.5'te kendirin diğer bitkisel liflerle karşılaştırmalı özellikleri verilmiştir.

**Çizelge 2.5.** Kendirin diğer bitkisel liflerle karşılaştırmalı özellikleri (Bulut ve Erdoğan 2011)

Lif	Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Kopma Mukavemeti (Mpa)	Young Modülü (GPa)	Kopma Uzaması (%)	Çap (mm)	Nem İçeriği (%)
Pamuk	1,5-1,6	287-800	5,5-12,6	7,0-8,0	11,5-17	8,5
Jüt	1,3-1,45	393-773	13-26,5	1,16-1,5	15,9-20,7	12,6
Keten	1,50	345-1100	27,6	2,7-3,2	17,8-21,6	10,0
Kendir	1,48	690	70	1,6	17,0-22,8	10,8
Rami	1,50	400-938	61,4-128	1,2-3,8	28,1-35,0	8,0
Sisal	1,45	468-640	9,4-22	3-7	18,3-23,7	11,0
Hindistan Cevizi	1,15	131-175	4-6	15-40	16,2-19,5	8,0
Ananas yaprağı	1,52-1,56	413-1627	34,5-82,51	1,6	20-80	11,8

Şekil 2.12’de ülkemizde kenevir yetiştiriciliğine izin verilen iller görülmektedir.



**Şekil 2.12.** Türkiye’de kenevir yetiştiriciliğine izin verilen iller (Resmi Gazete 2016)

## 2.6. Monolif Polyester İplik

Polyester; polimerlerin bir kategorisi veya daha özel olarak ana bağları içinde ester fonksiyonel grupları içeren yoğunlaşma polimerleridir (Ece 2007). Polyesterin hammadesi petrol ürünleri ve taş kömürü katranıdır. Şekil 2.13.a ve Şekil 2.13.b'de monolif polyester iplik örnekleri görülmektedir.



Şekil 2.13. a) Kesilmiş monolif polyester iplik b) Monolif polyester iplik

### 2.6.1. Polyester liflerinin özellikleri

Polyester iplikler tekstilde önemli yere sahip sentetik ipliklerdir. İyi derecede sağlamlık ve dayanıklılık, gerilmeye ve ısınmaya karşı dayanım, güve yemelik, elastiklik gibi özelliklerinin iyi olması, bakım kolaylığı ve yıkama sonrası çabuk kuruma özelliğinden dolayı son derece yaygın kullanım alanlarına sahiptir. Polyester iplik, kesikli sürekli filament iplik şeklinde olmak üzere iki farklı şekilde üretilebilmektedir (Özkan ve Babaarslan 2010).

Ayrıca hidrofob özellikteki polyester liflerin; yoğunluğunun düşük olması ( $1,38 \text{ g/cm}^3$ ), mukavemetinin yüksek olması, ışığa ve açık hava şartlarına karşı dayanıklı olması, içinde bulunduğu kumaşların boyutsal olarak stabil olmasını ve kırışmamasını sağlaması,

yıkama, bakteri ve mikroplara karşı dayanıklı olması gibi avantajlı fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı kumaşların üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır (Bodur 2014). Çizelge 2.6'da polyester lifinin fiziksel özellikleri görülmektedir.

**Çizelge 2.6.** Polyester lifinin fiziksel özellikleri (Bodur 2014)

İpliklerin fiziksel özellikleri		Farklı tipteki polyester iplikler				
		150/48 Standart polyester	150/144 Mikro polyester	150/48 İçi boş (hollow) polyester	150/48 Tekstüre polyester	150/288 Tekstüre mikro polyester
<b>Numara</b>	<b>Ortalama</b>	154,40	152,15	151,98	162,40	165,55
<b>(Denye)</b>	<b>%CV</b>	0,24	0,33	0,80	0,59	0,51
<b>Mukavemet</b>	<b>Ortalama</b>	35,58	38,36	32,51	38,71	30,37
<b>(Rkm)</b>	<b>%CV</b>	5,10	5,18	7,65	3,74	5,81
<b>Uzama</b>	<b>Ortalama</b>	34,50	39,02	31,53	34,03	33,31
<b>(%)</b>	<b>%CV</b>	14,21	14,20	18,68	12,53	11,33

### 2.6.2. Polyester lifinin kullanım alanları

Polyester lifleri; tekstilden, pet şişe, film şerit, fotoğraf filmi, camla güçlendirilmiş (fiberglas) kompozit malzeme, LCD (likit kristal ekran), hologram, filtre, sığaçlar için dielektrik film ve teller için yalıtım filmi, yalıtım bandı, balık ağı, otomobil lastiği, halat, dikiş ipliği ve yelken bezi yapımına kadar birçok alanda kullanılmaktadır.

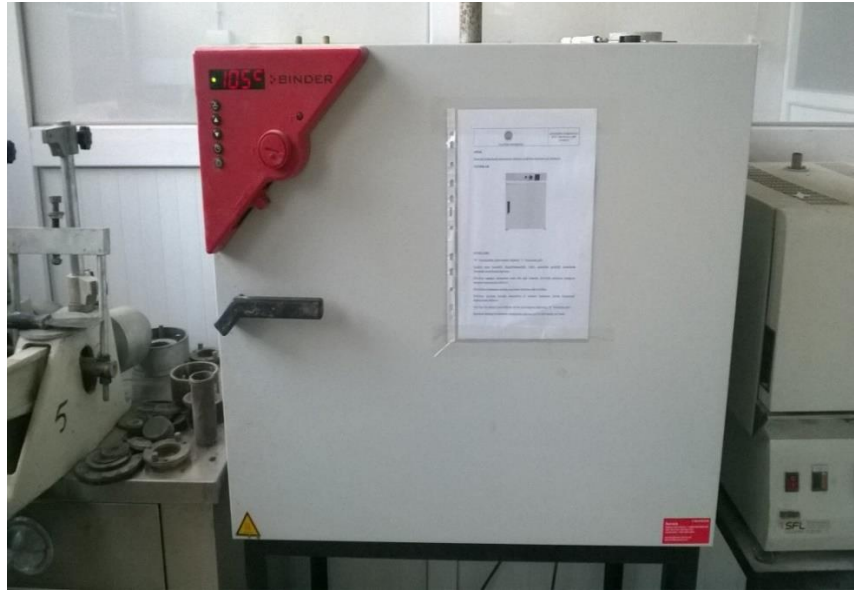
Ayrıca polyester lifleri tekstilde oldukça geniş bir kullanım alanına sahip olup, tek başına kullanılabilirdiği gibi diğer liflerle karıştırılarak da kullanılabilir. En çok pamuk lifiyle karıştırılan polyester lifleri yün, akrilik, ipek, viskoz ve keten lifi ile de kullanılabilir (Anonim 2019b).

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Kil Numuneler

Çalışmada Erzurum ili Oltu ilçesi sınırlarından getirilen doğal kil (D) numune kullanılmıştır. Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarına getirilen killer parçalanıp küçük boyutlar haline getirilmiştir. Uygun boyutlarda kil numuneler tepsi veya tavaların içerisine konulup Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan etüvde 24 saat 105°C'de bekletilmiştir. Kuruyan kil numuneler etüvden çıkarılıp Los Angeles aşındırma cihazına atılıp yeterince ufalanana kadar öğütülmüştür. Öğütülen kil numuneler Los Angeles aşındırma cihazından çıkarılarak yapılacak deneylere esas olmak üzere uygun elekler ile elenmiştir. Şekil 3.1'de etüv, Şekil 3.2'de öğütülmüş kil örneği, Şekil 3.3'te ise Los Angeles aşındırma cihazı görülmektedir.



Şekil 3.1. Etüv

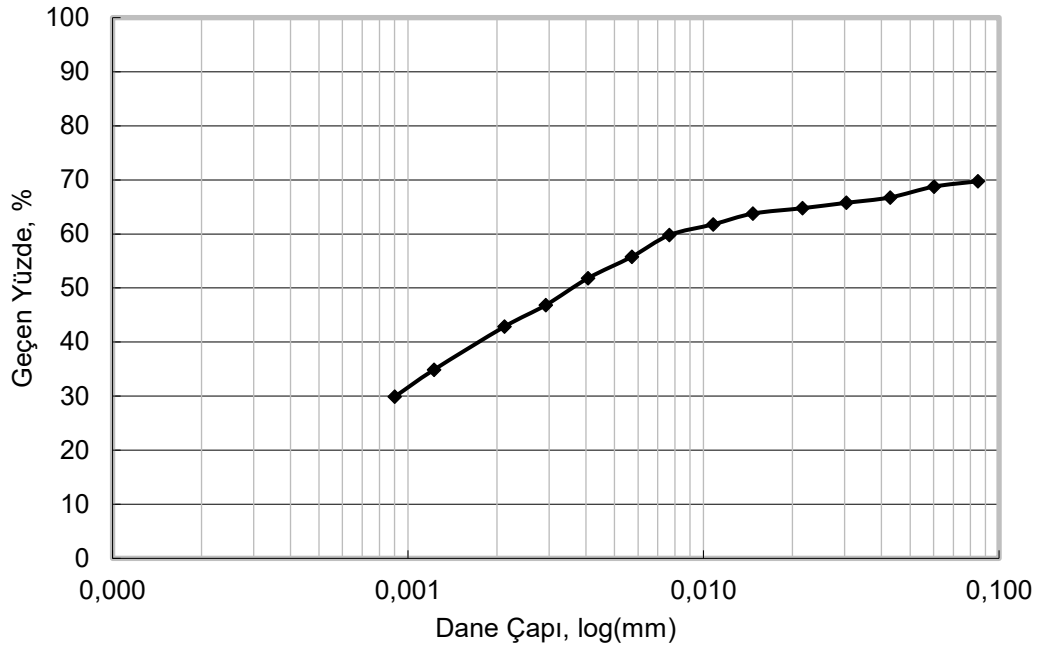


**Şekil 3.2.** Öğütülmüş kil örneği



**Şekil 3.3.** Los Angeles aşındırma cihazı

Öğütülen kil numunesinin bazı bazı geoteknik özellikleri Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda yapılan deneyler sonucunda belirlenmiştir. Kil numuneler için hidrometre deneyi ASTM D 422'ye göre yapılmış olup deney sonucunda kile ait dane çapı dağılım eğrisi bulunup Şekil 3.4'te verilmiştir. Şekil 3.4'te verilen eğriye göre kil numunenin 2 mikrondan (0,002 mm) küçük dane miktarı %42 olarak bulunmuştur. Çizelge 3.1'de ise kil numunesinin bazı geoteknik özellikleri sunulmuştur.



Şekil 3.4. Deneilerde kullanılan doğal kilin granülometri eğrisi

Çizelge 3.1. Kile ait bazı geoteknik özellikler

Geoteknik Özellikler	Doğal Kil
< 0,002 mm, (%)	42
Dane birim hacim ağırlığı, (kN/m <sup>3</sup> )	25,9
Likit limit, (%)	60,8
Plastik limit, (%)	26,5
Plastisite indisi, (%)	34,3
Zemin Sınıfı, (USCS)	CH

Doğal kil numunesinin XRF azalizi Ankara’da bulunan Maden Tetkik Arama (MTA) Genel Müdürlüğü’nde Thermo ARL marka XRF cihazının UQ programında yaptırılmış olup doğal kil numunesine kimyasal bileşimini gösterir XRF analiz verileri Çizelge 3.2’de verilmiştir. Analiz öncesinde kil numuneler 105°C’de kurutulmuştur.



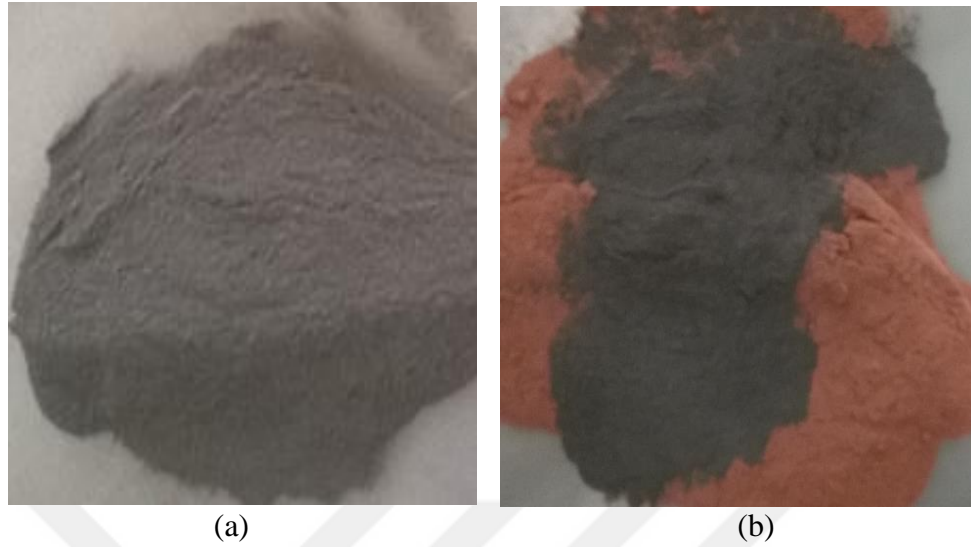
Ayrıca MTA Genel Müdürlüğü'nde yaptırılan deneylerde kil numunesinin mineral analizinde kil numunesinde; kuvars, plajiyoklaz, kil minerali ve kalsit bulunmuştur.

**Çizelge 3.2.** Deneylerde kullanılan doğal kil numunenin kimyasal bileşimi (XRF analizi)

<b>Sembol</b>	<b>Doğal Kil (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	59,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,5
A.Za	8,50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,0
MgO	2,1
K <sub>2</sub> O	1,6
CaO	1,5
Na <sub>2</sub> O	1,4
TiO <sub>2</sub>	0,6
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,2
MnO	<0,1

### 3.1.2. Uçucu Kül

Çalışmada Kütahya ili Seyitömer Termik Santrali'nden temin edilen F sınıfı uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Şekil 3.5.a'da uçucu kül, Şekil 3.5.b'de ise uçucu kül-kil karışım örneği görülmektedir. Kullanılan uçucu külün kimyasal analizi Çizelge 3.3'te verilmiştir.



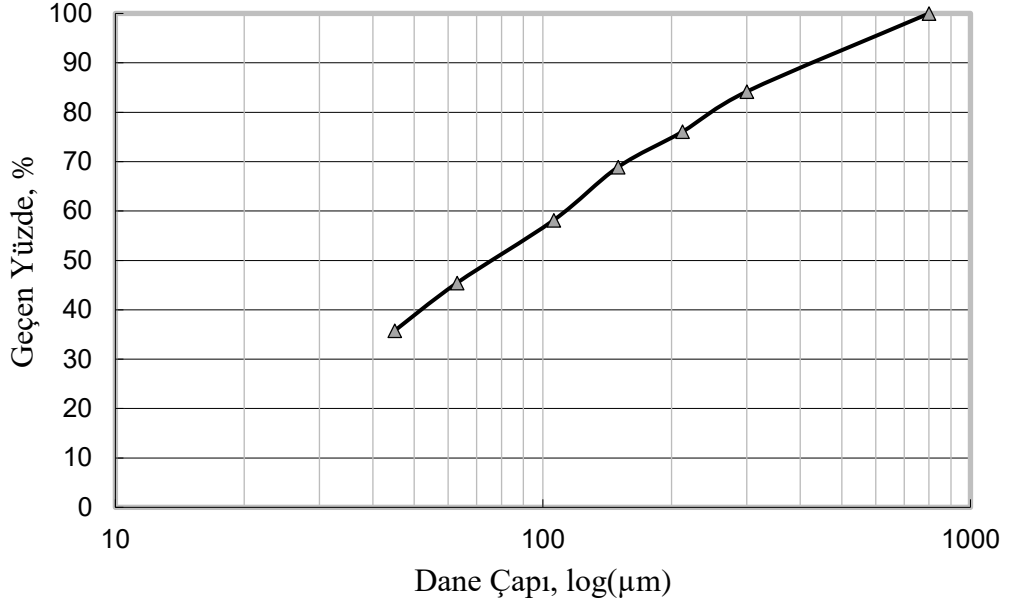
Şekil 3.5. a) Uçucu kül b) Uçucu kül-kil karışım örneği

Çizelge 3.3. Seyitömer Termik Santrali uçucu külü fraksiyonel kimyasal analizi (Çinçin 2015)

Dane boyutu (µm)	Ağırlık (%)	KK (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Serbest CaO (%)
800/300	15,8	10,08	-	-	-	-	-
300/212	8,14	5,17	-	-	-	-	-
212/150	7,15	3,5	58,94	17,27	3,97	8,96	-
150/106	10,75	2,19	57,63	17,56	5,16	9,55	-
106/63	12,7	1,5	55,53	17,42	5,32	9,7	-
63/45	9,7	1,25	57	17,7	5,55	9,59	-
45/0	35,76	1,5	52,97	17,13	5,62	10,53	-
212/0	76,06	1,75	56,67	17,33	5,34	9,99	0,32

Çizelge 3.3 incelendiğinde, serbest kireç oranının %0,32 olduğu görülmektedir. CaO oranının %10'dan az (%5,34) olduğu, SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (S+A+F) toplamının (%83,99) %70'ten fazla olduğu analiz edilen Seyitömer uçucu külünün ASTM C 618 standardına

göre F sınıfı düşük kireçli uçucu kül olduğu belirtilmiştir (Çinçin 2015). Seyitömer Termik Santraline ait uçucu külün dane çapı dağılım eğrisi Şekil 3.6'da verilmiştir (Çinçin 2015).



Şekil 3.6. Seyitömer Termik Santrali uçucu külü dane çapı dağılım eğrisi (Çinçin 2015)

### 3.1.3. Saman

Çalışmada, saman süpürgesinden elde edilen saman (S) kullanılmıştır. Saman süpürgesi piyasadan temin edilmiş, yaklaşık aynı kalınlıktaki saplar ayrıştırılıp 2 mm ve 5 mm uzunluklarında kesilmiş, sap bünyesinde bulunabilecek suyun da tamamen yok olması için güneş ışığında kurutulmuş ve kavanoz içerisinde muhafaza edilmiştir. Şekil 3.7.a'da saman süpürgesi, b'de ise kesilmiş saman örneği görülmektedir.



**Şekil 3.7.** a) Saman süpürgesi b) Kesilmiş saman örneği

### 3.1.4. Kendir

Çalışmada nalburlardan alınan kendir (K) kullanılmıştır. Kendir 2 mm ve 5 mm uzunluklarında kesilmiş ve kendir bünyesinde bulunabilecek suyun da tamamen yok olması için güneş ışığında kurutulmuş ve kavanoz içerisinde muhafaza edilmiştir. Şekil 3.8. a’da kendir-kil karışımı, b’de ise kesilmiş kendir örneği görülmektedir.



**Şekil 3.8.** a) Kesilmiş kendir örneği b) Kendir-kil karışım örneği

### 3.1.5. Monolif polyester iplik

Çalışmada kullanılan parlak monolif polyester iplik (P) Türkiye’de faaliyet gösteren 2H Tekstil San. Tic. Ltd. Şti ile Zorlu Tekstil adlı firmalardan temin edilmiştir. Monolif

Polyester 2 mm ve 5 mm uzunluklarında kesilmiştir. Şekil 3.9.a'da kesilmiş monolif polyester iplik, b'de ise monolif polyester iplik-kil karışım örneği görülmektedir.



**Şekil 3.9.** a) Kesilmiş monolif polyester iplik örneği b) Monolif polyester iplik-kil karışım örneği

### 3.2. Yöntem

Bu bölümde öncelikle lif katkılı kil numunelerin elde edilmesi anlatılmış ardından sırasıyla; özgül ağırlık deneyi, hidrometre deneyi, kıvam limitleri deneyleri, standart proktor deneyi, serbest basınç deneyi ve donma çözülme deneyleri açıklanmıştır.

#### 3.2.1. Katkılı kil numunelerin elde edilmesi

Laboratuvara getirildikten sonra kurutulup öğütülen doğal kil numune 40 nolu elekten elenmiştir. Elenmiş olan kil numunesine ağırlıkça %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında 2 mm ve 5 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik eklenmiştir. Lif katkılı kil numunelere ağırlıkça %10 oranında uçucu kül eklenerek uçucu kül katkılı numuneler elde edilmiştir. Deney numuneleri ve lif katkı yüzdeleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Deney numuneleri

Numune	Saman, %		Kendir, %		Monolif Polyester İplik, %		Kil/Uçucu Kül
	2 mm	5 mm	2 mm	5 mm	2 mm	5 mm	
D	-	-	-	-	-	-	100/0
DUK	-	-	-	-	-	-	90/10
S1	0,5	-	-	-	-	-	100/0
S2	1	-	-	-	-	-	100/0
S3	1,5	-	-	-	-	-	100/0
S4	-	0,5	-	-	-	-	100/0
S5	-	1	-	-	-	-	100/0
S6	-	1,5	-	-	-	-	100/0
S7	0,5	-	-	-	-	-	90/10
S8	1	-	-	-	-	-	90/10
S9	1,5	-	-	-	-	-	90/10
S10	-	0,5	-	-	-	-	90/10
S11	-	1	-	-	-	-	90/10
S12	-	1,5	-	-	-	-	90/10
K1	-	-	0,5	-	-	-	100/0
K2	-	-	1	-	-	-	100/0
K3	-	-	1,5	-	-	-	100/0
K4	-	-	-	0,5	-	-	100/0
K5	-	-	-	1	-	-	100/0
K6	-	-	-	1,5	-	-	100/0
K7	-	-	0,5	-	-	-	90/10
K8	-	-	1	-	-	-	90/10
K9	-	-	1,5	-	-	-	90/10
K10	-	-	-	0,5	-	-	90/10
K11	-	-	-	1	-	-	90/10
K12	-	-	-	1,5	-	-	90/10
M1	-	-	-	-	0,5	-	100/0
M2	-	-	-	-	1	-	100/0
M3	-	-	-	-	1,5	-	100/0
M4	-	-	-	-	-	0,5	100/0
M5	-	-	-	-	-	1	100/0
M6	-	-	-	-	-	1,5	100/0
M7	-	-	-	-	0,5	-	90/10
M8	-	-	-	-	1	-	90/10
M9	-	-	-	-	1,5	-	90/10
M10	-	-	-	-	-	0,5	90/10
M11	-	-	-	-	-	1	90/10
M12	-	-	-	-	-	1,5	90/10

### 3.2.2. Özgül Ağırlık Deneyi

Zemin danelerinin özgül ağırlığını bulmak için ASTM D 854'e göre özgül ağırlık deneyi yapılmıştır. Öncelikle 40 nolu elekten elenmiş kil numune etüvde kurutulmuştur. Kurutulan kil malzemedan alınan bir miktar numune piknometreye konulup üzerine saf su ilave edilip numune içerisinde bulunan havayı dışarı çıkarmak için vakum uygulanmıştır. Havanın dışarı atılmasını kolaylaştırmak için piknometre kabı arada yavaşça sallanmıştır. Havaşı alınmış piknometreye saf su eklenerek içeride hava kalmayınca kadar vakum işlemi tekrarlanmıştır. Hava alma işlemi bittikten sonra piknometre kabı içindeki süspansiyon ile birlikte tartılmıştır. Şekil 3.10'da özgül ağırlık deneyi esnasında tartılan piknometre kabı görülmektedir.



Şekil 3.10. Özgül ağırlık deneyi

### 3.2.3. Hidrometre deneyi

İnce daneli zeminlerin dane çapı dağılımını belirlemek için hidrometre deneyi yapılmıştır. Hidrometre deneyi Stokes Kanununa dayanır (Uzuner 1998). Küre şeklindeki bir danenin durgun bir sıvı içerisindeki çökme hızıyla dane büyüklüğü arasındaki matematiksel ilişki “Stokes Yasası” olarak bilinmektedir.

Kil numuneler için hidrometre deneyi ASTM D 422’ye göre yapılmıştır. Önceden hazırlanan 50 gr kil numune hidrometre deneyinde kullanılmıştır. Etüvde kurutularak hazırlanan 50 gr malzeme, 100-150 ml kadar sodyumhegzametafosfat ( $\text{NaPO}_3$ )<sub>6</sub> içinde 24 saat bekletilerek danelerin birbirlerinden ayrılması sağlanmıştır. Ayrıştırıcı içinde bekletilen numune iyice karıştırıldıktan sonra hidrometre kabına konulmuş ve kabın 2/3’ü doluncaya kadar kaba damıtık su eklenmiştir. Süspansiyon karıştırıcı ile yaklaşık 2 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karıştırıldıktan sonra zemin-su-süspansiyonunun bulunduğu hidrometre kabına 1000 cl’yi tamamlayacak şekilde damıtık su eklenip ağzı bir tıkaç ile kapatılarak iyice çalkalanmıştır. Çalkalamadan sonra hidrometre kabına hidrometre aleti daldırılıp 15, 30 saniye; 1, 2, 4, 8, 16, 30, 60 dakika; 2, 4, 8, 16, 24, 48 saat okumaları ile her okumada termometre ile sıcaklık okumaları eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.11’de hidrometre deney okuma düzeneği görülmektedir.

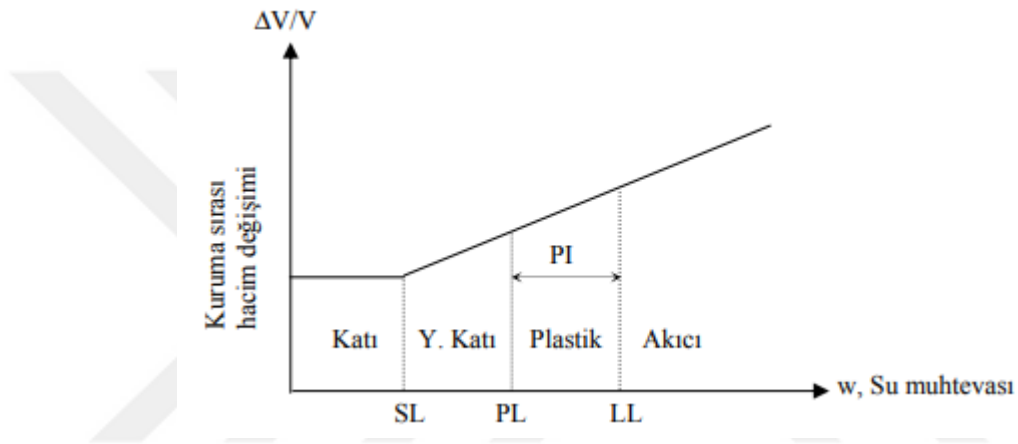


Şekil 3.11. Hidrometre deney okuma düzeneği



### 3.2.4. Kıvam limitleri deneyi

1911’de Atterberg tarafından zeminin su içeriğine bağlı olarak değişen davranışları deneysel olarak tarif edilmiş ve tarif edilen sınır su muhtevaları Atterberg limitleri veya kıvam limitleri olarak isimlendirilmiştir (Orhan vd 2006). Şekil 3.12’de ince daneli zeminler için tanımlanan kıvam limitleri görülmektedir.



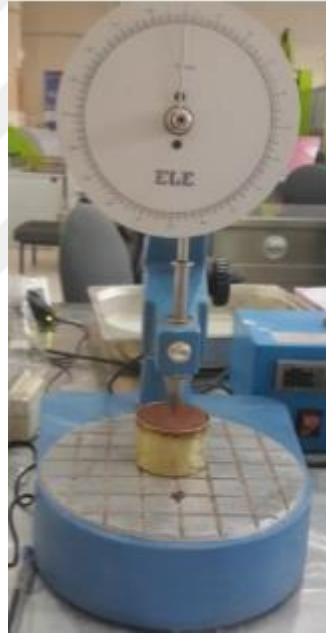
**Şekil 3.12.** İnce daneli zeminlerin kıvam limitleri

Atterberg kıvam limitlerinden likit limit; Casagrande yöntemi, düşen koni penetrasyon yöntemi, tek nokta yöntemi olmak üzere üç farklı şekilde belirlenebilmektedir.

Likit limit; BS 1377, Part 2, 1990 standardına göre, düşen koni yöntemi ile belirlenmiştir. 40 nolu elekten elenmiş kil numunesi üzerine su eklenip homojen olarak karıştırılmıştır. Homojen karışımdan alınan numune penetrasyon kalıbına içinde hava kabarcığı kalmayacak şekilde yerleştirilmiştir. Penetrasyon kalıbının yüzeyi düzeltildikten sonra penetrometre tabanına konulmuş, penetrasyon kalıbına koni uç düşürülerek 5 saniye sonundaki batma miktarı bulunmuştur. Su miktarı her seferinde artırılıp işlemler tekrarlanmıştır. Her batma miktarı için su muhtevası değeri hesaplanmıştır. 20mm lik batmaya denk gelen su içeriği değeri likit limit değeri olarak belirlenmiştir. Şekil 3.13’te koni penetrometre deney aleti görülmektedir.

Plastik limit TS 1900 ve ASTM D 4318 standardına göre belirlenmiştir. Zemin numunesine bir miktar su eklenerek yoğrulmuş, yoğrulan zemin numunesinden bir miktar alınarak cam bir yüzey üzerinde 3 mm çapında çubuklar elde edilinceye kadar elle yuvarlanmıştır. Çubukta kopmaların, kılcal çatlamların oluştuğu an işlem durdurulup o andaki çubuğun su muhtevası plastik limit değeri olarak alınmıştır. Deneyler beşer kez tekrarlanmıştır. Likit limit değerinden plastik limit değeri çıkarılarak plastisite indisi bulunmuştur.

$PI=LL-PL$  (Plastisite indisi=Likit limit-Plastik limit)



**Şekil 3.13.** Koni penetrometre deney aleti

### 3.2.5. Standart proktor deneyi

Kompaksiyon, zeminin mekanik ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi için zemin bünyesindeki su ve dane hacmi sabit iken havanın dışarı atılmasıdır. Kompaksiyonda amaç; maksimum kuru birim hacim ağırlık ile optimum su muhtevasının belirlenmesidir.

Kompaksiyon deneyi laboratuvarında standart proktor ve modifiye proktor olmak üzere iki farklı şekilde yapılmaktadır.

Çalışmada, ASTM D 698 standardına göre standart proktor deneyi yapılmıştır. Numuneler kompaksiyon kalıbına üç tabaka halinde yerleştirilmiş, 117 mm yüksekliğinde ve 102 mm çapındaki otomatik kompaktör ile her tabakaya 25'er vuruş yapıp zemin numunesi sıkıştırılmıştır. Numunelerin su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlıkları belirlenerek kompaksiyon grafiği çizilmiştir. Şekil 3.14'te standart proktor deneyinde kullanılan otomatik kompaktör görülmektedir.



**Şekil 3.14.** Otomatik kompaktör

### 3.2.6. Serbest basınç deneyi

Doygun, doygun olmayan killi ince daneli zeminlerin serbest basınç mukavemetini belirlemek için serbest basınç deneyi yapılmaktadır.

Çalışmada, ASTM D 2166 standardına göre serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Serbest basınç deneyi için standart proktor deneyinde bulunan optimum su muhtevası değerleri

kullanılmıştır. Standart proktor enerjisinde otomatik kompaktörde sıkıştırılan zemin numunelerinden 35 mm çapında ve 70 mm yüksekliğindeki metal silindirik tüplere serbest basınç numuneleri alınmış ve hidrolik numune çıkarma aleti yardımıyla çıkarılan numuneler serbest basınç deney aletinde yatay plakalar arasına yerleştirilmiştir. Şekil 3.15 a’da serbest basınç deney aleti, b’de hidrolik numune çıkarma aleti görülmektedir.



**Şekil 3.15.** a) Serbest basınç deney aleti b) Hidrolik kriko ile numune çıkarma

Deney aletine yerleştirilen numunelere yükleme hızı 0,8 mm/dk belirlenip düşey yönde basınç uygulanmış ve kırılma anındaki en yüksek basınç değerleri ile deformasyon miktarları bilgisayara kurulan test lab basic bilgisayar programı aracılığıyla okunmuştur. Şekil 3.16’da serbest basınç deneyinin bilgisayar programı aracılığıyla uygulanışı görülmektedir.

$A_f$  zemin numunelerin kırılma anındaki en kesit alanı ve  $P_{max}$  kırılma anındaki en yüksek basınç değeri olmak üzere  $q_u$  serbest basınç mukavemeti Eşitlik 3.1. ile hesaplanır.

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



**Şekil 3.16.** Serbest basınç deneyinin bilgisayar programı aracılığıyla uygulaması

### 3.2.7. Donma-Çözülme deneyi

Serbest basınç deneyinde olduğu gibi donma çözülme deneyi için de optimum su içeriğinde, standart proktor enerjisinde sıkıştırılan numunelerden 35x70 mm ölçülerinde silindirik numuneler alınmıştır. Hazırlanan numunelerin su muhtevalarında değişme olmaması için numuneler alüminyum folyo ile sarılmıştır. Folyoya sarılı numuneler otomatik donma-çözülme kabinine yerleştirilmiştir. Şekil 3.17’de otomatik donma çözülme deney aleti, Şekil 3.18’de ise otomatik donma çözülme kabininde alüminyum folyoya sarılı numuneler görülmektedir.

Bu çalışmada donma çözülme çevrim sayısı 4 (Zaimoğlu and Akbulut 2019); sıcaklık değerleri donma için  $-20^{\circ}\text{C}$  çözülme için  $+25^{\circ}\text{C}$  (Ghazavi and Roustae 2010; Zaimoğlu ve Akbulut 2019) ve her bir aralıkta bekleme süresi 6 saat olarak seçilmiştir. Çevrim sonrasında ise kabinden çıkarılan numunelere serbest basınç deneyi uygulanmıştır.



**Şekil 3.17.** Donma çözülme kabini



**Şekil 3.18.** Donma çözülme kabininde folyoya sarılmış numuneler

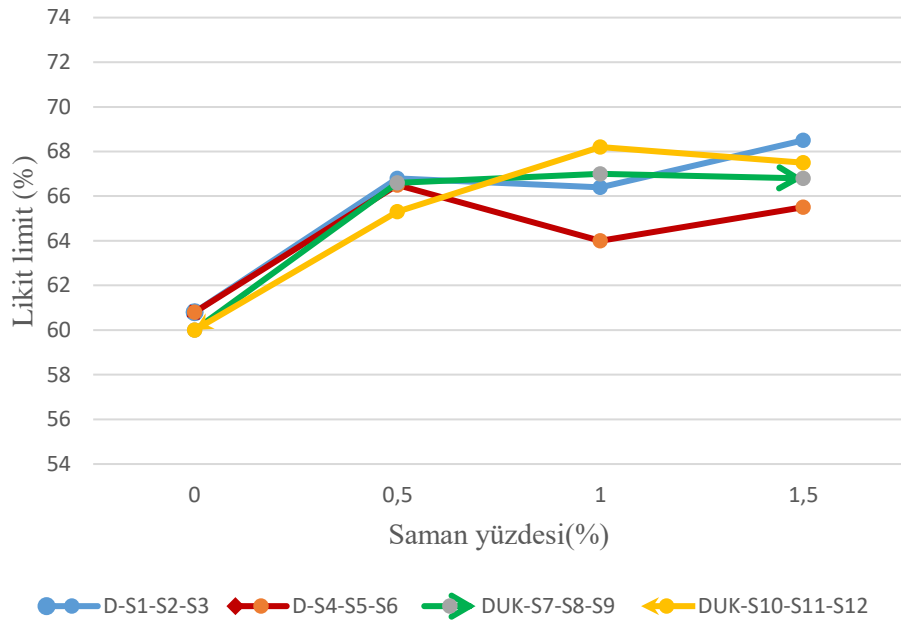
## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde, doğal kil numune, saman, kendir, monolif polyester iplik ve uçucu kül katkılı kil numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş, deneylere ait sonuçlar verilmiştir.

### 4.1. Kıvam Limitleri Deney Sonuçları

#### 4.1.1. Likit limit (LL)

Şekil 4.1’de doğal kil numune ile ağırlıkça %0, %0,5, %1, %1,5 saman katkılı ve %10 uçucu kül katkılı/katkısız kil numunelerinin saman yüzdesinde meydana gelen artışla likit limit değerlerinde meydana gelen değişim görülmektedir.

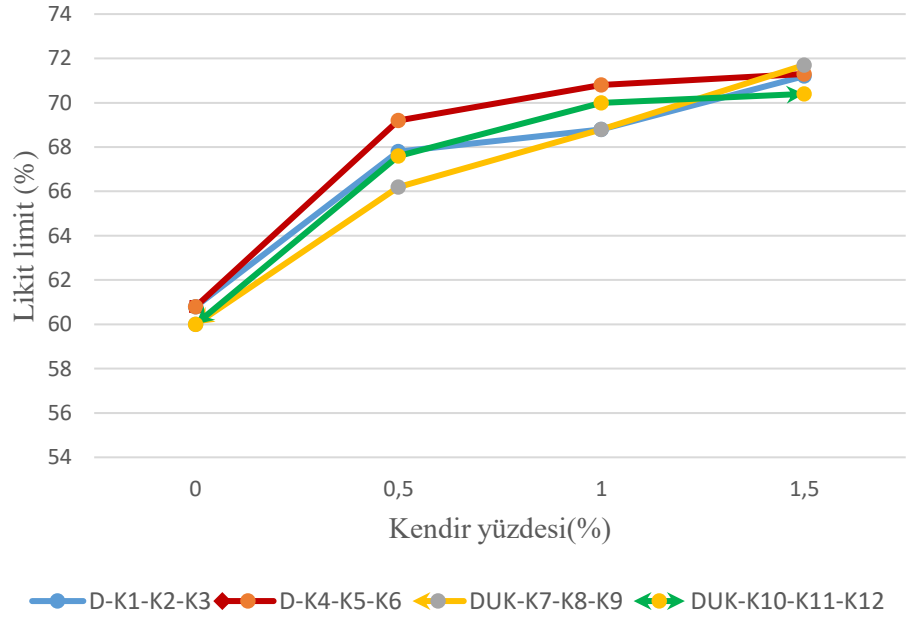


**Şekil 4.1.** Saman katkılı kil numunelerin likit limitlerinde meydana gelen değişim

Şekil 4.1 incelendiğinde saman ilavesi ile doğal kilin likit limitinin arttığı görülmektedir. Genel olarak bakıldığında, saman lifi yüzdesi %0,5’ten %1’e çıktığında likit limitlerin

kısmi bir şekilde azaldığı, %1,5 saman lifi ilavesinde ise yine kısmi bir artış meydana geldiği söylenebilir. %10 uçucu kül katkılı numunelerde ise %0,5'ten %1'e likit limit artmış, %1'den %1,5'e ise azalmıştır.

Şekil 4.2'de doğal kil numune ile ağırlıkça %0, %0,5, %1 ve %1,5 kendir ve %10 uçucu kül katkılı/katkısız kil numunelerin kendir yüzdesinde meydana gelen artışla likit limit değerlerinde meydana gelen değişim görülmektedir.



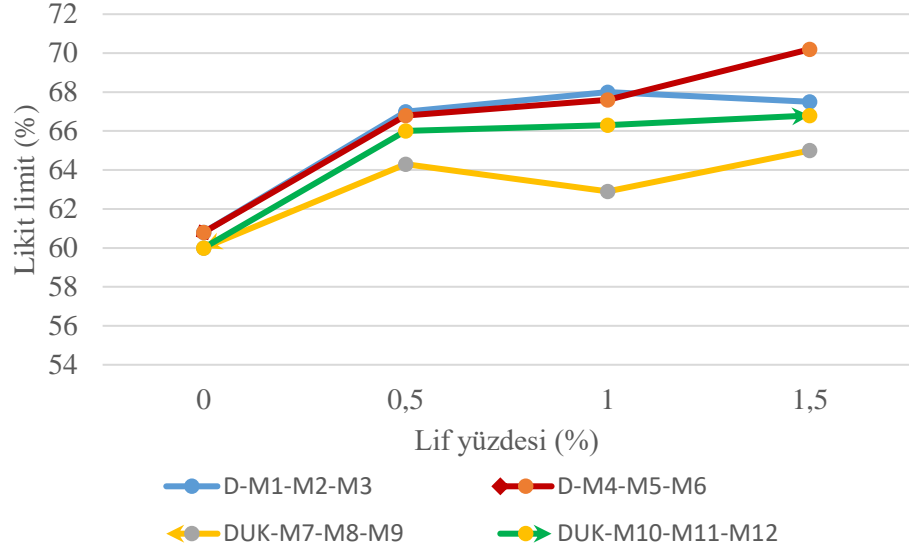
**Şekil 4.2.** Kendir katkılı kil numunelerin likit limitlerinde meydana gelen değişim

Şekil 4.2 incelendiğinde kendir katkılı kil (uçucu kül katkısız) numunelerine yapılan deneylerde lif uzunluğu (2 mm ve 5 mm) ve kendir katkı oranı arttıkça (%0,5 den %1,5'e doğru) likit limit değerlerinin arttığı görülmektedir.

2 mm ve 5 mm uzunluğunda kendir ile kil uçucu kül karışımına ilişkin deneylerde ise yine aynı şekilde lif uzunluğu (2 mm ve 5 mm) ve kendir katkı oranı (%0,5 den %1,5'e doğru) arttıkça likit limit değerlerinde artış gözlenmiştir.



Şekil 4.3'te doğal kil numune ile ağırlıkça %0, %0,5, %1 ve %1,5 monolif polyester iplik ve %10 uçucu kül katkılı/katkısız kil numunelerin monolif polyester iplik yüzdesinde meydana gelen artışla likit limit değerlerinde meydana gelen değişim görülmektedir.



**Şekil 4.3.** Monolif polyester iplik katkılı kil numunelerin likit limitlerinde meydana gelen değişim

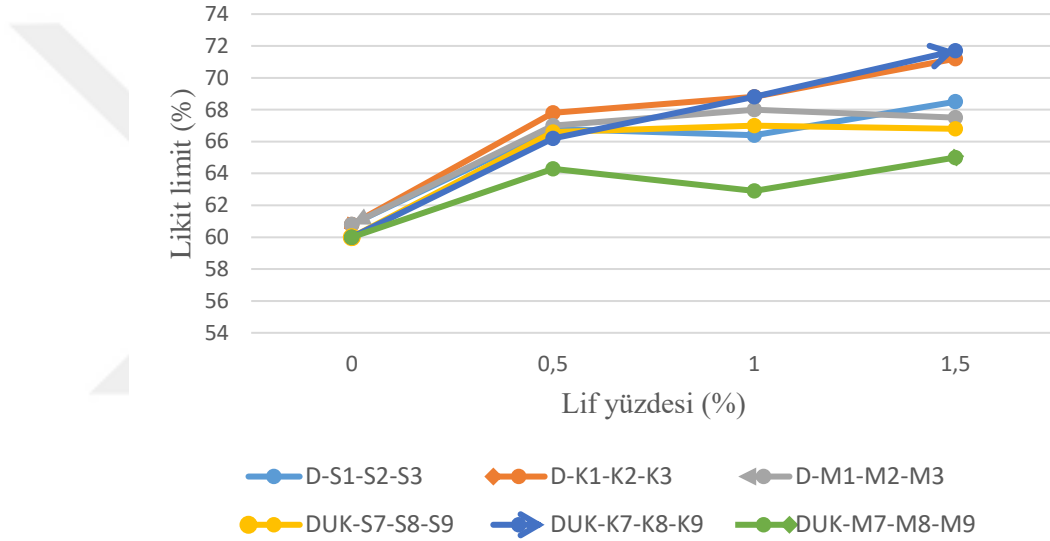
2 mm uzunluğunda monolif polyester iplik katkılı kil numunelere ait likit limit deneylerinde katkı oranının %0,5'den %1'e geçişinde likit limit artmış, %1'den %1,5'e geçişte ise likit limit azalmıştır. Doğal kil ile kıyaslandığında tüm monolif polyester iplik katkılı numunelerin likit limitleri doğal kilden yüksek çıkmıştır.

5 mm uzunluğunda monolif polyester iplik katkılı kil numunelerine ilişkin likit limit deneylerinde ise monolif polyester iplik yüzdesinde meydana gelen artışla likit limit değerlerinin arttığı gözlenmiştir.

2 mm uzunluğunda monolif polyester iplik katkılı kile %10 uçucu kül ilavesiyle elde edilmiş numunelere ait likit limit deneylerinde; monolif polyester iplik katkı oranının %0,5'den %1 aralığında artışı ile likit limit azalmıştır. Lif oranı %1'den %1,5'e çıktığında

ise monolif polyester iplik katkı oranının artışı ile likit limit artmıştır. 5 mm uzunluğunda monolif polyester iplik, %10 uçucu kül, kil numunelerine ait deneylerde ise katkı oranı artışına bağlı olarak likit limitin arttığı gözlenmiştir.

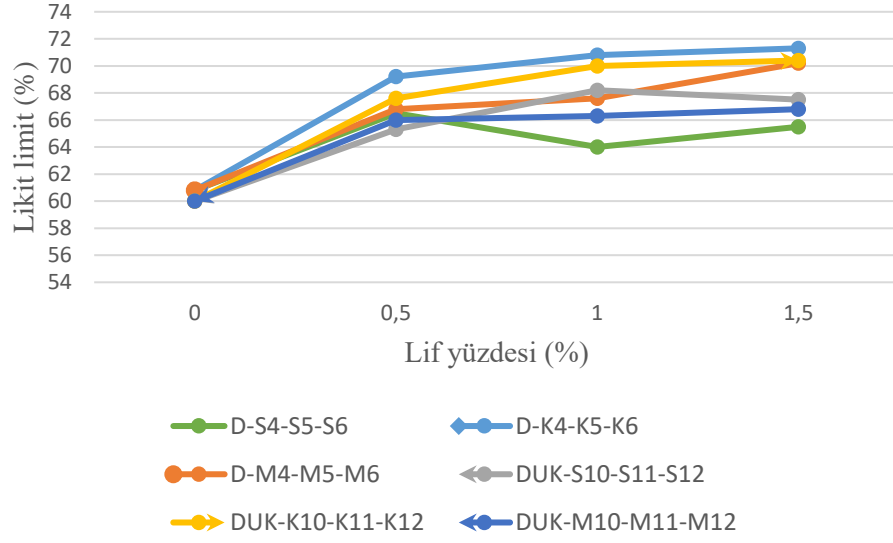
Şekil 4.4’de uçucu kül katkılı/katkısız kil numunelerde 2 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik yüzdesinde meydana gelen artışla likit limit değerlerinde meydana gelen değişimler görülmektedir.



**Şekil 4.4.** 2 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı numunelerin likit limitlerinin değişimi

Şekil 4.4 incelendiğinde, 2 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester ipliğin farklı oranlarının sırası ile doğal kil ile karıştırılmasıyla yapılan likit limit deneylerinde kendirde katkı oranının artışı ile birlikte (%0,5 den %1,5’e doğru) likit limit sürekli artarken, saman ve monolif polyester iplik ile yapılan deneylerde ise likit limit kararsız bir değişim göstermiştir.

Şekil 4.5’te uçucu kül katkılı/katkısız kil numunelerde 5 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik yüzdesinde meydana gelen artışla likit limit değerlerinde meydana gelen değişimler görülmektedir.



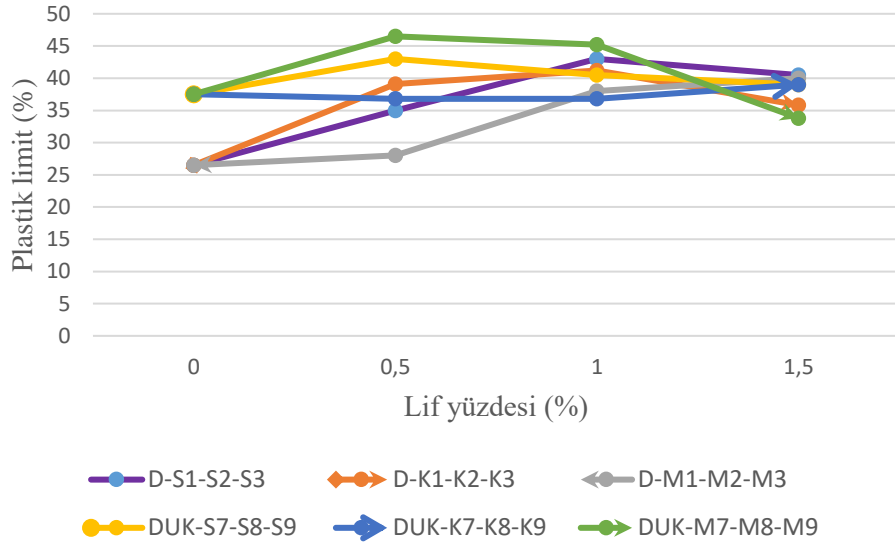
**Şekil 4.5.** 5 mm uzunluğunda saman kendir ve monolif polyester iplik katkılı numunelerin likit limitlerinin değişimi

Şekil 4.5 incelendiğinde, 5 mm uzunluğunda kendir, saman ve monolif polyester iplik ile yapılan deneylerde kendir ve monolif polyester iplik katkılarının likit limiti sürekli arttığı, saman katkılı numunelerin likit limitlerinin ise kararsız bir değişim gösterdiği söylenebilir.

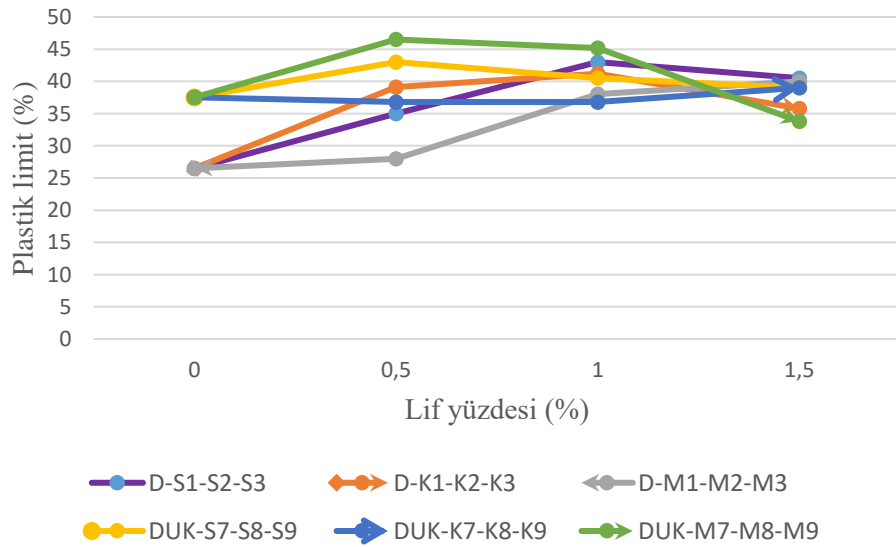
#### 4.1.2. Plastik limit (PL)

Şekil 4.6'da uçucu kül katkılı/katkısız kil numunelere 2 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katılarak elde edilen numunelerde lif yüzdesinde meydana gelen artışla plastik limit değerlerinde meydana gelen değişim görülmektedir.

Şekil 4.7'de ise uçucu kül katkılı/katkısız kil numunelere 5 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katılarak elde edilen numunelerde lif yüzdesinde meydana gelen artışla plastik limit değerlerinde meydana gelen değişim sunulmuştur.



**Şekil 4.6.** 2 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı numunelerin plastik limitlerinin değişimi



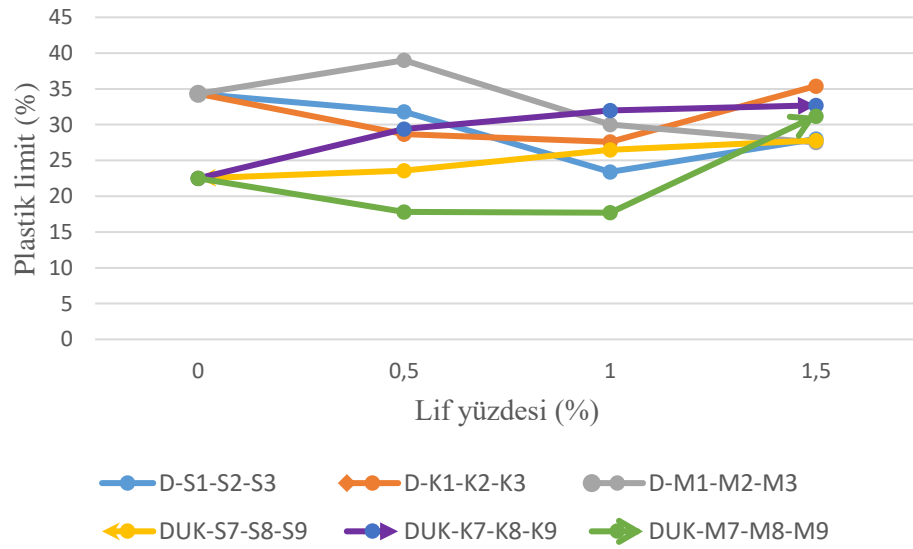
**Şekil 4.7.** 5 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı numunelerin plastik limitlerinin değişimi

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'ye göre plastik limitlerin lif ve uçucu kül ilavesi ile değiştiği görülmektedir. Şeki 4.6 ve Şekil 4.7'ye göre tüm lif katkılı ve uçucu kül numunelerin plastik limitlerinin doğal kilin plastik limitine göre arttığı söylenebilir.

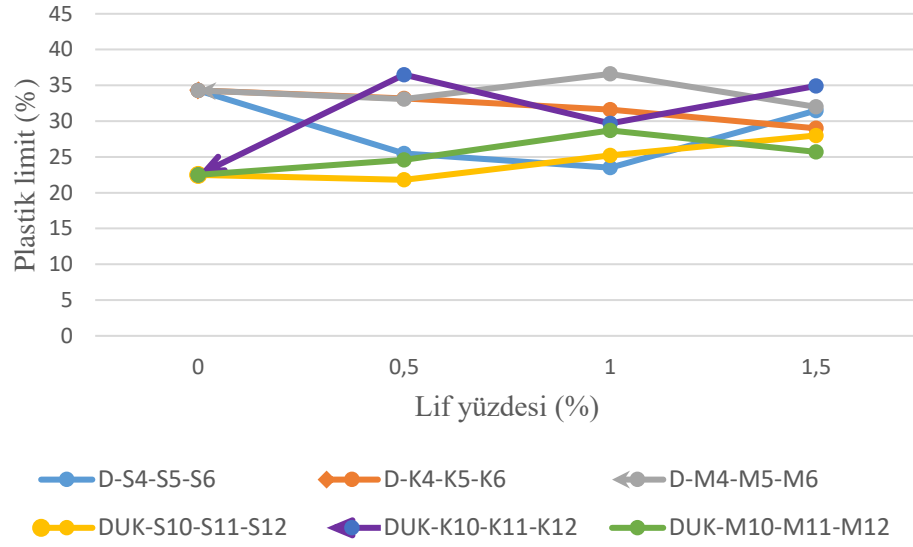
#### 4.1.3. Plastisite indisi (PI)

Şekil 4.8’de uçucu kül katkılı/katkısız kil numunelere 2 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katılarak elde edilen numunelerde lif yüzdesinde meydana gelen artışla plastisite indisi değerlerinde meydana gelen değişim görülmektedir.

Şekil 4.9’da ise uçucu kül katkılı/katkısız kil numunelere 5 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katılarak elde edilen numunelerde lif yüzdesinde meydana gelen artışla plastisite indisi değerlerinde meydana gelen değişim sunulmuştur.



Şekil 4.8. 2 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı numunelerin plastisite indislerinin değişimi



**Şekil 4.9.** 5 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı numunelerin plastisite indislerinin değişimi

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 incelendiğinde plastisite indisinin lif ve uçucu kül ilavesi ile değiştiği görülmektedir.

#### 4.1.4. Zemin sınıfları

Kil, lif katkılı kil, uçucu kül katkılı kil ve uçucu kül-lif katkılı kil numuneler üzerinde gerçekleştirilen likit limit ve plastik limit deney sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1’e göre başlangıçta CH (yüksek plastisiteli kil) olarak belirlenen doğal kilin zemin sınıfının; 2 mm ve 5 mm uzunluğunda ve farklı oranlarda saman, kendir, monolif polyester iplik katkılı numunelerde MH (yüksek plastisiteli silt) zemin sınıfı davranışı gösterdiği belirlenmiştir.

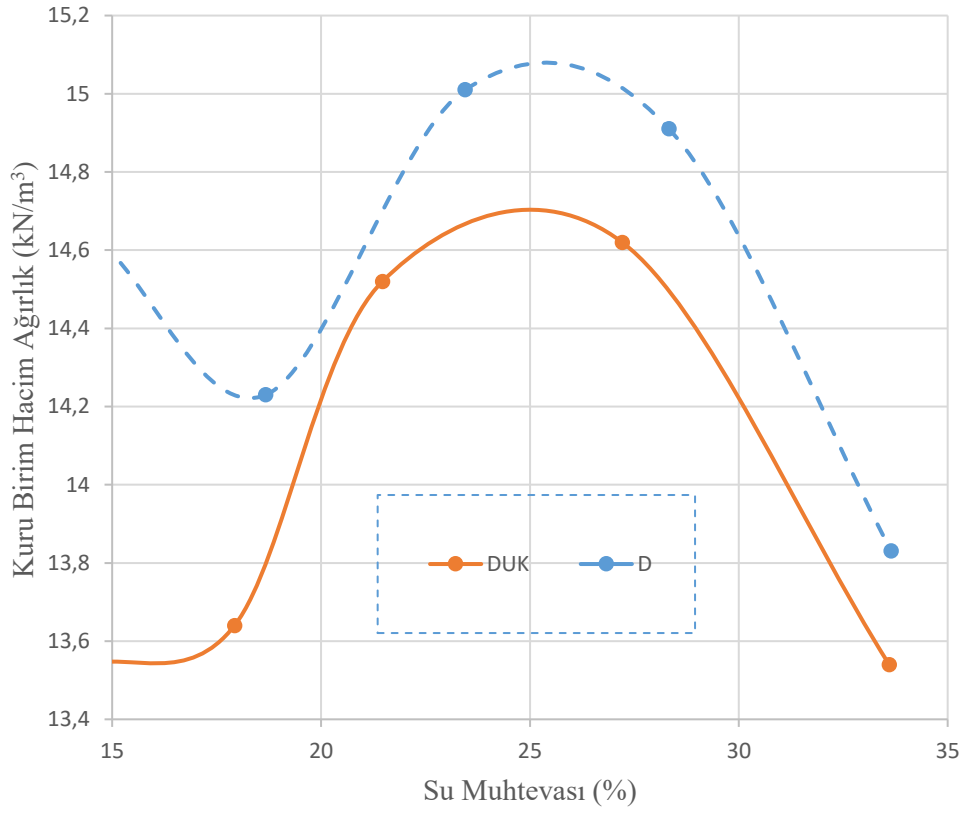
Ayrıca uçucu kül katkılı numunelerin zemin sınıfının da yine MH zemin sınıfı davranışı gösterdiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.1. Kıvam limitleri deney sonuçları

Numune kodu	Uçucu kül yüzdesi (%)	Lif uzunluğu (mm)	Lif yüzdesi (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)
D	-	-	0	60,8	26,5	34,3
DUK	10	-	0	60	37,5	22,5
S1	-	2	0,5	66,8	35	31,8
S2	-	2	1	66,4	43	23,4
S3	-	2	1,5	68,5	40,5	28
S4	-	5	0,5	66,5	41	25,5
S5	-	5	1	64	40,5	23,5
S6	-	5	1,5	65,5	34	31,5
S7	10	2	0,5	66,6	43	23,6
S8	10	2	1	67	40,5	26,5
S9	10	2	1,5	66,8	39	27,8
S10	10	5	0,5	65,3	43,5	21,8
S11	10	5	1	68,2	43	25,2
S12	10	5	1,5	67,5	39,5	28
K1	-	2	0,5	67,8	39,1	28,7
K2	-	2	1	68,8	41,2	27,6
K3	-	2	1,5	71,2	35,8	35,4
K4	-	5	0,5	69,2	36	33,2
K5	-	5	1	70,8	39,2	31,6
K6	-	5	1,5	71,3	42,3	29
K7	10	2	0,5	66,2	36,8	29,4
K8	10	2	1	68,8	36,8	32
K9	10	2	1,5	71,7	39	32,7
K10	10	5	0,5	67,6	31,1	36,5
K11	10	5	1	70	40,3	29,7
K12	10	5	1,5	70,4	35,5	34,9
M1	-	2	0,5	67	28	39
M2	-	2	1	68	38	30
M3	-	2	1,5	67,5	40	27,5
M4	-	5	0,5	66,8	33,7	33,1
M5	-	5	1	67,6	31	36,6
M6	-	5	1,5	70,2	38,2	32
M7	10	2	0,5	64,3	46,5	17,8
M8	10	2	1	62,9	45,2	17,7
M9	10	2	1,5	65	33,8	31,2
M10	10	5	0,5	66	41,4	24,6
M11	10	5	1	66,3	37,6	28,7
M12	10	5	1,5	66,8	41,1	25,7

#### 4.2. Standart Proktor Deney Sonuçları

Standart proktor deneyi sonucunda çizilmiş olan doğal kil ve %10 uçucu kül katkılı doğal kile ait kompaksiyon eğrileri Şekil 4.10'da görülmektedir. Çizelge 4.2'de ise doğal kil ile %10 uçucu kül katkılı doğal kilin optimum su muhtevaları ile maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri verilmiştir.



Şekil 4.10. Doğal kilin ve %10 uçucu kül katkılı kilin kompaksiyon eğrileri

Çizelge 4.2. Doğal kil ve %10 uçucu kül katkılı kile ait kompaksiyon parametreleri

	D	DUK
Optimum su muhtevası, $w_{opt}$ , %	25,5	24,5
Maksimum kuru birim hacim ağırlık, $\gamma_{kmax}$ , kN/m <sup>3</sup>	15	14,7



Doğal kil üzerinde gerçekleştirilen standart proktor deneyi sonucunda doğal kilin optimum su muhtevası %25,5 olarak bulunmuş iken %10 uçucu kül katkılı kilin optimum su muhtevası %24,5 olarak bulunmuştur. Kile uçucu kül katılması sonucunda optimum su muhtevası azalmıştır.

Ayrıca doğal kilin maksimum kuru birim hacim ağırlık değerı  $15 \text{ kN/m}^3$ , %10 uçucu kül katkılı doğal kilin maksimum kuru birim hacim ağırlık değerı ise  $14,7 \text{ kN/m}^3$  olarak bulunmuştur. Uçucu kül ilavesi ile kilin maksimum kuru birim hacim ağırlık değerı azalmıştır.

### **4.3. Serbest Basınç Deney Sonuçları**

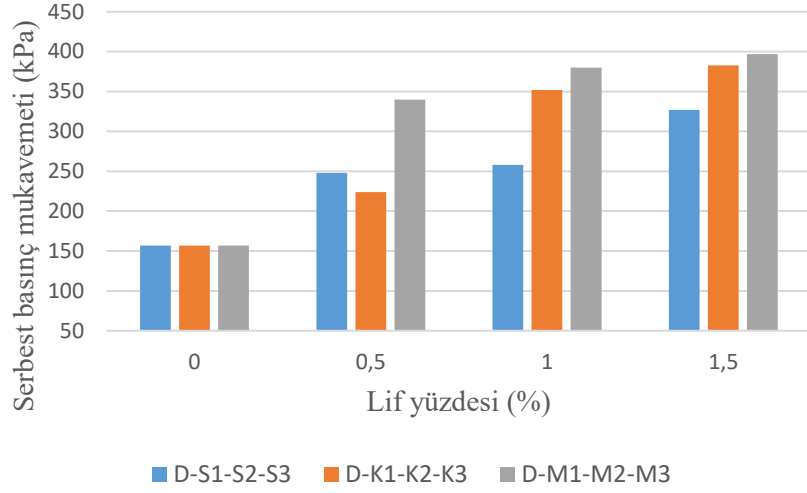
Serbest basınç deneyleri ASTM D 2166'ya göre, doğal kil, 2 mm ve 5 mm uzunluklarında saman, kendir ve monolif polyester ipliğin doğal kile %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında ilave edilmesiyle elde edilen lif katkılı numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca doğal kile 2 mm ve 5 mm uzunluğunda liflerin %1 oranında katılmasıyla elde edilen lif katkılı kil numunelere %10 uçucu kül katılmış ve bu numunelere de serbest basınç deneyi yapılmıştır.

Çizelge 4.3'te saman, kendir, monolif polyester iplik katkılı kil numunelerin lif uzunluğu- lif yüzdesi değişimi ile belirlenen serbest basınç mukavemeti değerleri görülmektedir.

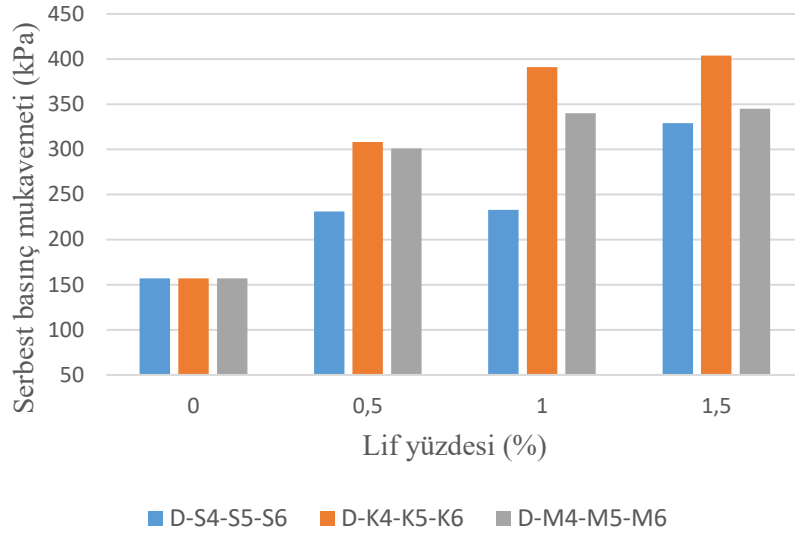
**Çizelge 4.3.** Saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı kil numunelerin serbest basınç mukavemetleri

Numune kodu	Lif uzunluğu (mm)	Lif yüzdesi (%)	Serbest Basınç Mukavemeti, $q_u$ (kPa)
D	0	0	157
S1	2	0,5	248
S2	2	1	258
S3	2	1,5	327
S4	5	0,5	231
S5	5	1	233
S6	5	1,5	329
K1	2	0,5	224
K2	2	1	352
K3	2	1,5	383
K4	5	0,5	308
K5	5	1	391
K6	5	1,5	404
M1	2	0,5	340
M2	2	1	380
M3	2	1,5	397
M4	5	0,5	301
M5	5	1	340
M6	5	1,5	345

Şekil 4.11’de 2 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı kil numunelerde lif yüzdesinin artması ile serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim görülmektedir. Şekil 4.12’de ise 5 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı kil numunelerde lif yüzdesinin artması ile serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim görülmektedir.



**Şekil 4.11.** 2 mm uzunluğunda saman, kendir ve monofil polyester iplik katkılı kil numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim

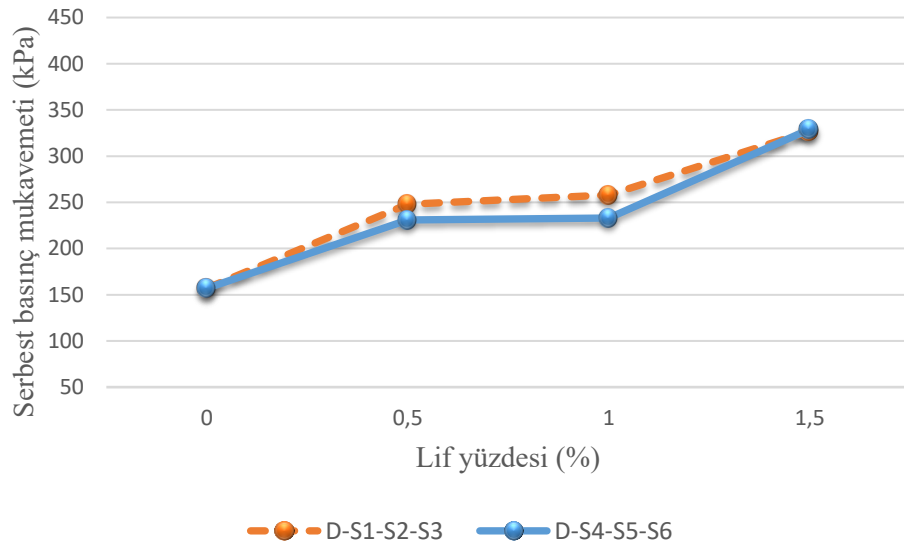


**Şekil 4.12.** 5 mm uzunluğunda saman, kendir ve monofil polyester iplik katkılı kil numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim

Çizelge 4.3, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 birlikte incelendiğinde 2 mm ve 5 mm uzunluğundaki saman, kendir ve monofil polyester iplik katkılı numunelerin tamamında katkı yüzdesinde meydana gelen artışla serbest basınç mukavemetlerinin arttığı görülmüştür. Saman ve monofil polyester iplik katkılı numunelerde 2 mm uzunluğu ile elde edilen numunelerin serbest basınç mukavemetleri 5 mm uzunluğu ile elde edilen

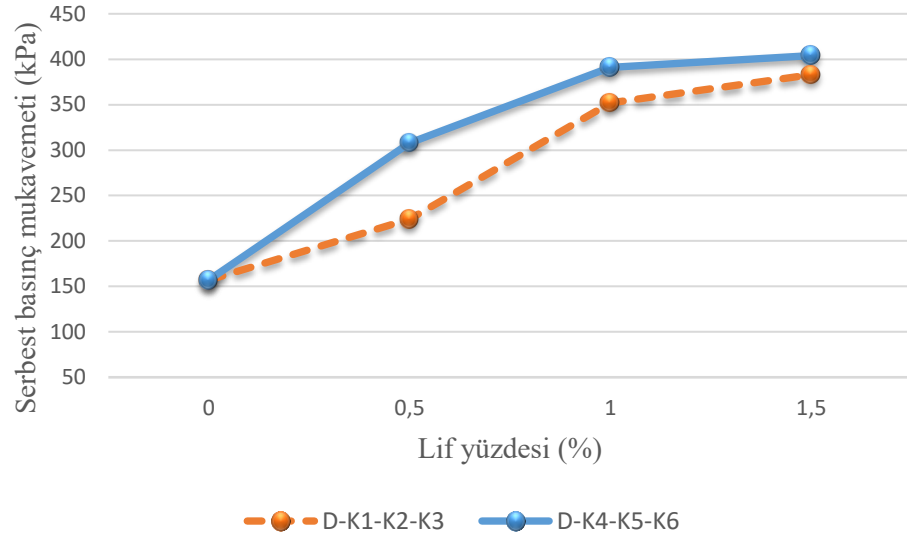
numunelerin serbest basınç mukavemetlerine göre daha yüksek olmuştur. Kendir katkılı numunelerde ise 5 mm uzunluğu ile elde edilen numunelerin serbest basınç mukavemetleri 2 mm uzunluğu ile elde edilen numunelerin serbest basınç mukavemetlerine göre daha yüksektir. Mirzababaei *et al.* (2018) lif içeriği ve uzunluğu arttıkça kayma mukavemetinde bir artış meydana geldiğini belirtmiştir.

Şekil 4.13'te saman, Şekil 4.14'te kendir, Şekil 4.15'de ise monolif polyester iplik katkılı kil numunelerin lif uzunluğu-lif yüzdesi değişimi ile serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim görülmektedir.



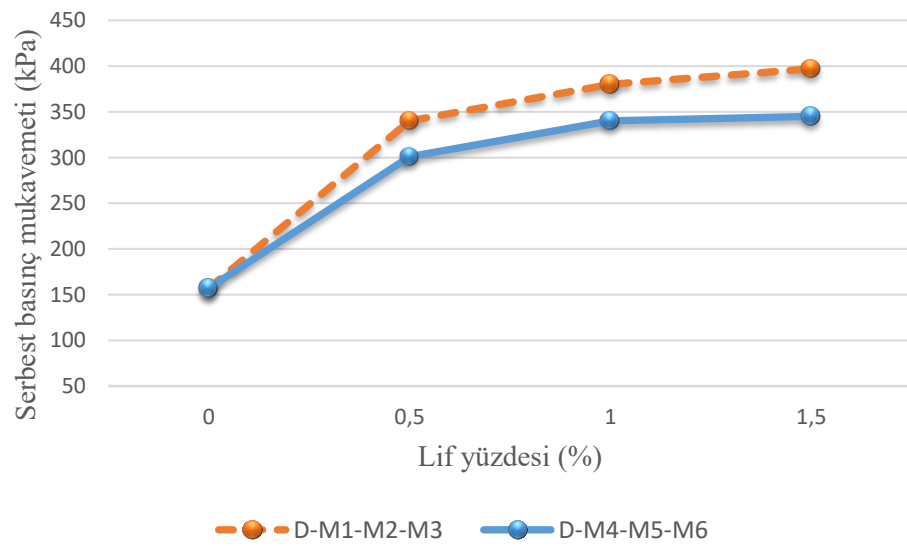
**Şekil 4.13.** Saman katkılı kil numunelerde samanın uzunluk ve yüzdesinin artışı ile serbest basınç mukavemeti değişimi

Şekil 4.13 incelendiğinde, 2 mm saman katkılı kilin serbest basınç mukavemeti saman oranı %1,5 olduğunda doğal kile göre %108 oranında artmıştır. 5 mm saman katkılı kilin serbest basınç mukavemeti ise saman oranı %1,5 olduğunda doğal kile göre %109 oranında artış göstermiştir.



**Şekil 4.14.** Kendir katkılı kil numunelerde samanın uzunluk ve yüzdesinin artışı ile serbest basınç mukavemeti değişimi

Şekil 4.14 incelendiğinde, 2 mm kendir katkılı kilin serbest basınç mukavemeti kendir oranı %1,5 olduğunda doğal kile göre %144 oranında artmıştır. 5 mm kendir katkılı kilin serbest basınç mukavemeti ise kendir oranı %1,5 olduğunda doğal kile göre %157 oranında artış göstermiştir.



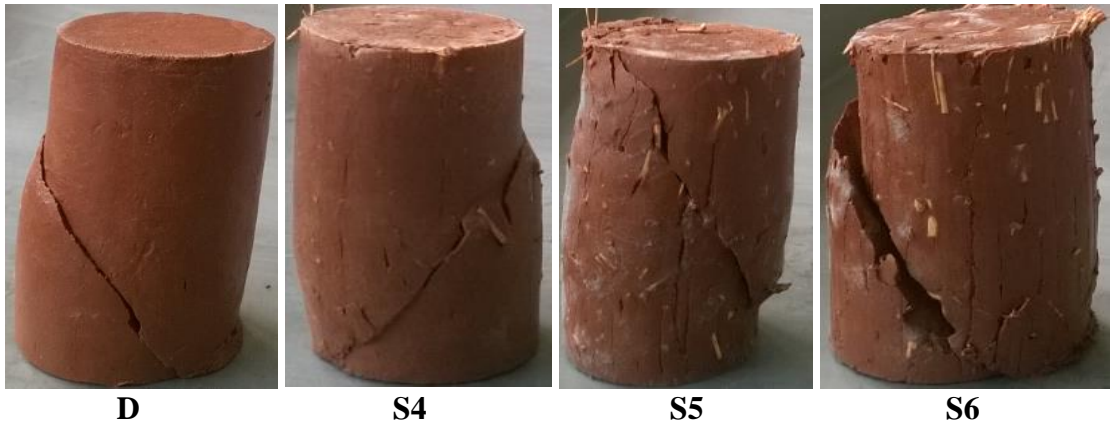
**Şekil 4.15.** Monolif polyester katkılı kil numunelerde samanın uzunluk ve yüzdesinin artışı ile serbest basınç mukavemeti değişimi

Şekil 4.15 incelendiğinde, 2 mm monolif polyester iplik katkıli kilin serbest basınç mukavemeti monolif polyester iplik oranı %1,5 olduğunda doğal kile göre %153 oranında artmıştır. 5 mm monolif polyester iplik katkıli kilin serbest basınç mukavemeti ise monolif polyester iplik oranı %1,5 olduğunda doğal kile göre %120 oranında artış göstermiştir.

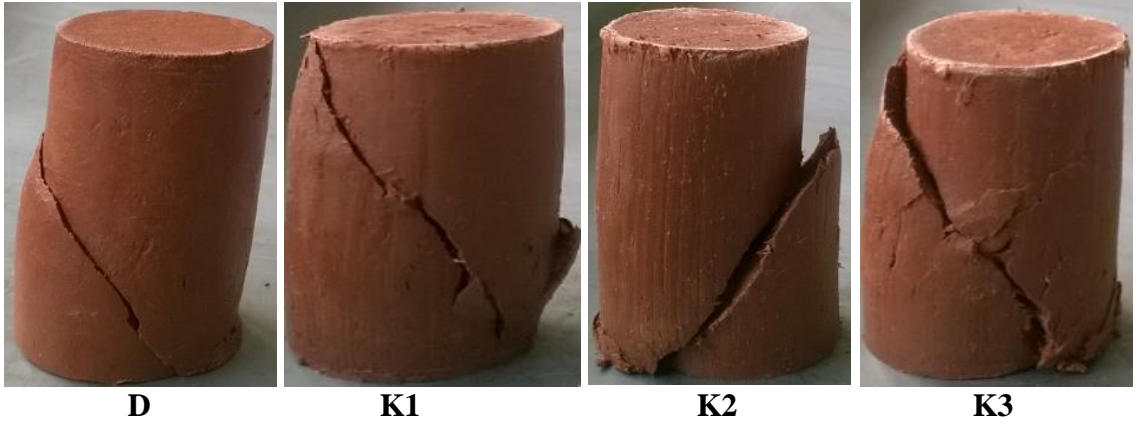
Şekil 4.16, Şekil 4.17’de saman, Şekil 4.18, Şekil 4.19’de kendir ve Şekil 4.20, Şekil 4.21’de ise monolif polyester iplik katkıli kil numunelerin serbest basınç deneyi sonrası oluşan kırılma şekilleri görülmektedir.



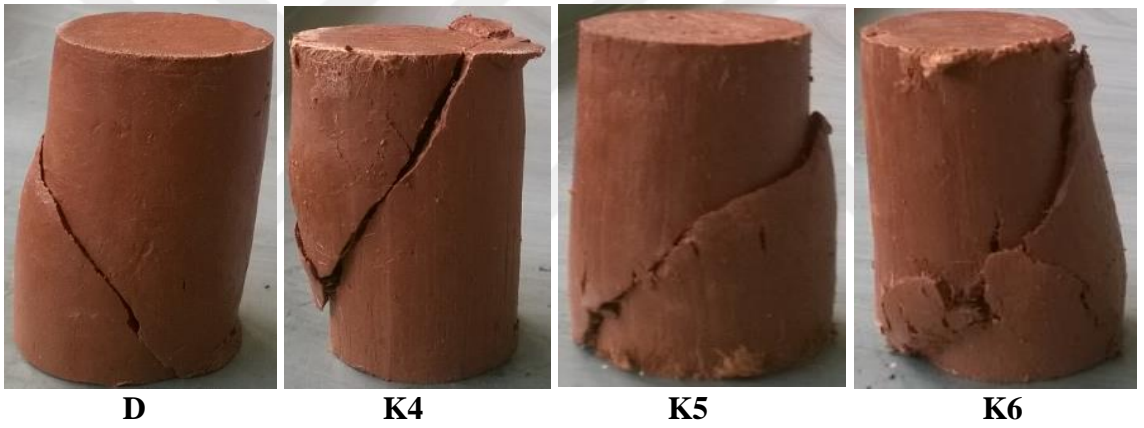
**Şekil 4.16.** 2 mm uzunluğunda saman katkıli kil numunelerin serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri



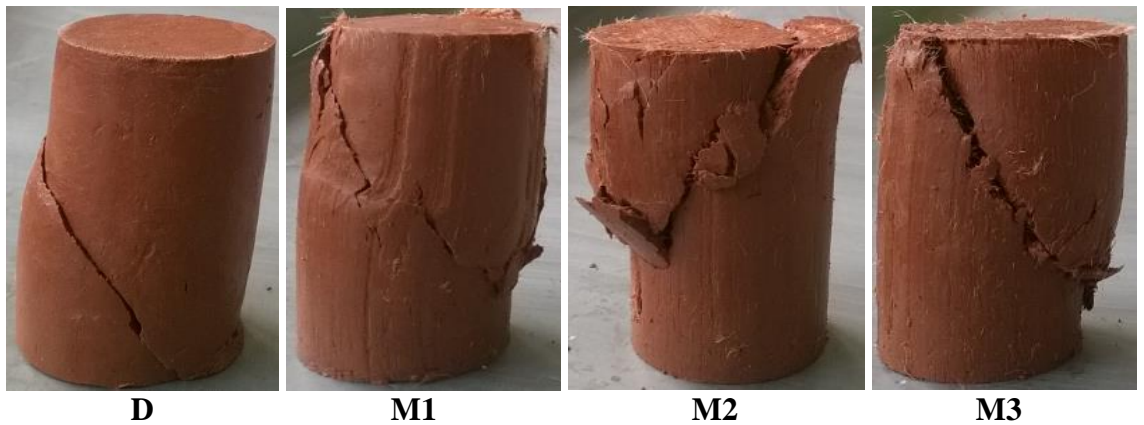
**Şekil 4.17.** 5 mm uzunluğunda saman katkıli kil numunelerin serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri



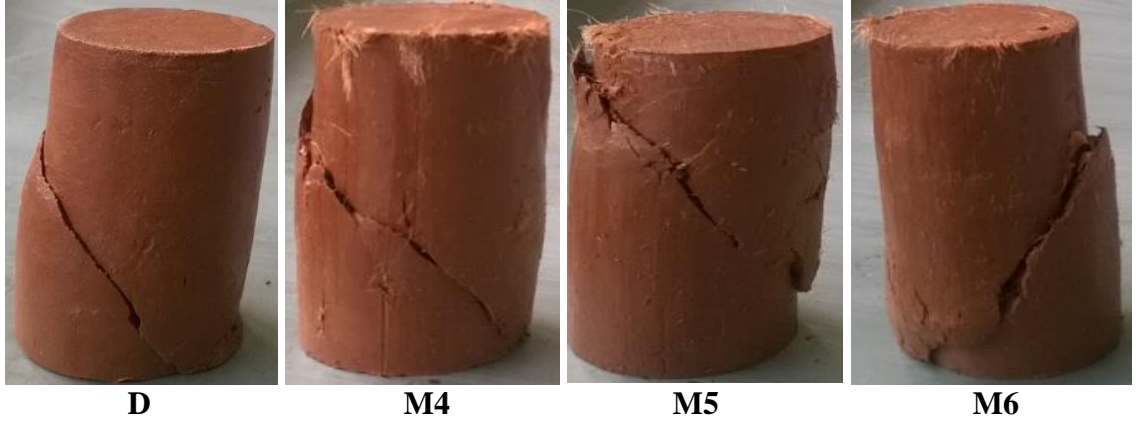
**Şekil 4.18.** 2 mm uzunluğunda kendir katkıli kil numunelerin serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri



**Şekil 4.19.** 5 mm uzunluğunda kendir katkıli kil numunelerin serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri



**Şekil 4.20.** 2 mm uzunluğunda monolif polyester iplik katkıli kil numunelerin serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri



**Şekil 4.21.** 5 mm uzunluğunda monolif polyester iplik katkılı kil numunelerin serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri

%1 oranında, 2 mm ve 5 mm uzunluklarında saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı kile %10 uçucu kül ilave edilerek elde edilen numunelerin serbest basınç mukavemetleri Çizelge 4.4'te görülmektedir.

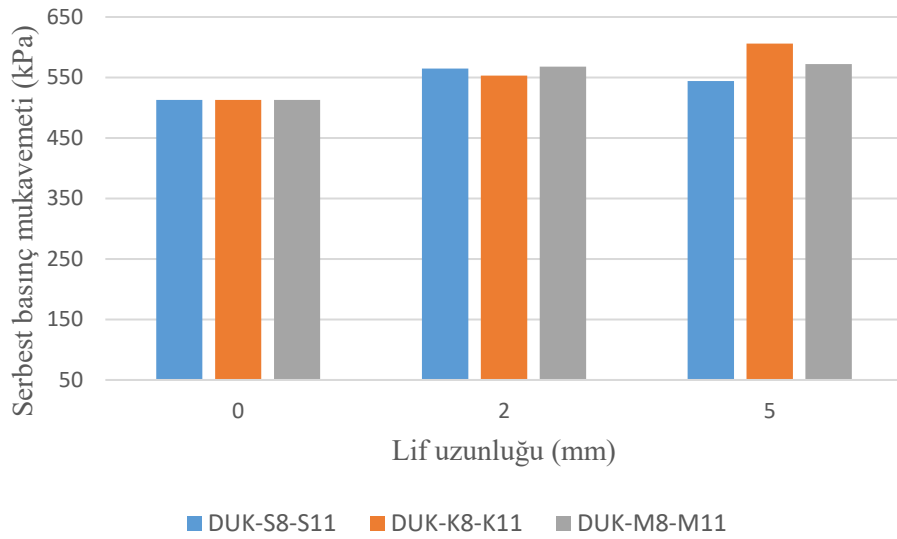
Özdemir (2011) CL kili ile %3, %5, %7 ve %10 oranında uçucu kül katkısı ile yaptığı kürlü (7 ve 28 günlük) serbest basınç deneylerinde en yüksek serbest basınç mukavemetinin %10 uçucu kül ilavesinde gerçekleştiğini gözlemlemiştir. Zha *et al.* (2008) çalışmalarında şişen zeminleri uçucu kül ile iyileştirmiş ve uçucu kül ilave ettikleri numuneleri 7 gün küre tabi tuttuktan sonra serbest basınç mukavemetlerini belirlemişler ve 7 günlük kürün uçucu kül katkılı kil numunelerin serbest basınç mukavemetlerini önemli ölçüde artırdığını belirtmişlerdir.

Uçucu kül katkılı numunelerin serbest basınç mukavemeti deneyleri 7 gün kürde bekletilen numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.22'de uçucu kül katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetinin lif uzunluğunda meydana gelen artışla değişimi görülmektedir.



**Çizelge 4.4.** %10 uçucu kül katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri

Numune kodu	Uçucu kül yüzdesi (%)	Lif uzunluğu (mm)	Lif yüzdesi (%)	Serbest Basınç Mukavemeti, $q_u$ (kPa)
DUK	10	0	0	513
S8	10	2	1	565
S11	10	5	1	544
K8	10	2	1	553
K11	10	5	1	606
M8	10	2	1	568
M11	10	5	1	572

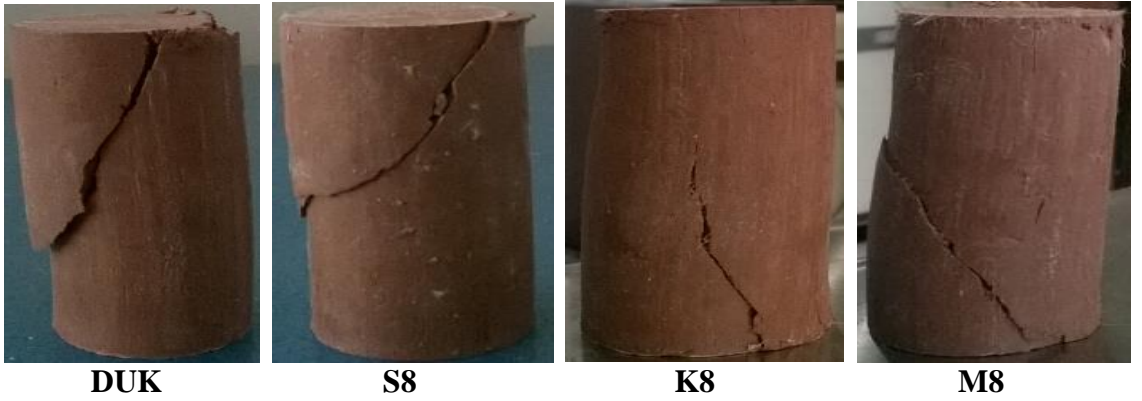
**Şekil 4.22.** %10 uçucu kül katkılı kil numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim

%10 uçucu küllü doğal kil ile %1 oranında, 2 mm ve 5 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı numuneler 7 gün desikatörde muhafaza edilmiş ve sonrasında numunelere serbest basınç deneyi uygulanmış olup en yüksek serbest basınç mukavemetinin 5 mm uzunlukta kendir katkılı numunede gerçekleştiği belirlenmiştir (Şekil 4.22).

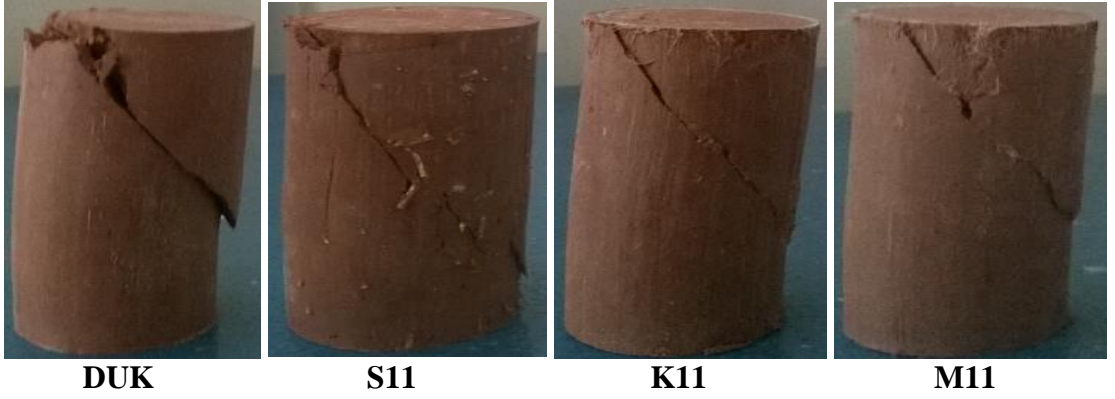
Ayrıca samanda katkı uzunluğu arttıkça ortalama serbest basınç mukavemeti azalırken, kendir ve monolif polyester iplikte ise katkı uzunluğunun artışına bağlı olarak serbest basınç mukavemeti artmıştır.

Şekil 4.22 incelendiğinde; %10 uçucu küllü 2 mm uzunluğunda lif katkıli numunelerde, lif oranı %1,5 olduğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katkıli numunelerin serbest basınç mukavemetleri %10 uçucu kül katkıli kil numunenin serbest basınç mukavemetine göre sırasıyla %10,1, %7,8 ve %10,7 oranlarında artmıştır. %10 uçucu küllü 5 mm lif katkıli numunelerde ise lif oranı %1,5 olduğunda, saman, kendir ve monolif polyester iplik katkıli numunelerin serbest basınç mukavemetleri, %10 uçucu kül katkıli kil numunenin serbest basınç mukavemetine göre sırasıyla %6, %18,1 ve %11,5 oranlarında artmıştır.

Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te uçucu kül katkıli numunelerin serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri görülmektedir.



**Şekil 4.23.** 2 mm uzunluğunda kendir/saman/monolif polyester iplik ile %10 uçucu kül katkıli kil numunelerin serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri



**Şekil 4.24.** 5 mm uzunluğunda kendir/saman/monolif polyester iplik ile %10 uçucu kül katkılı kil numunelerin serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri

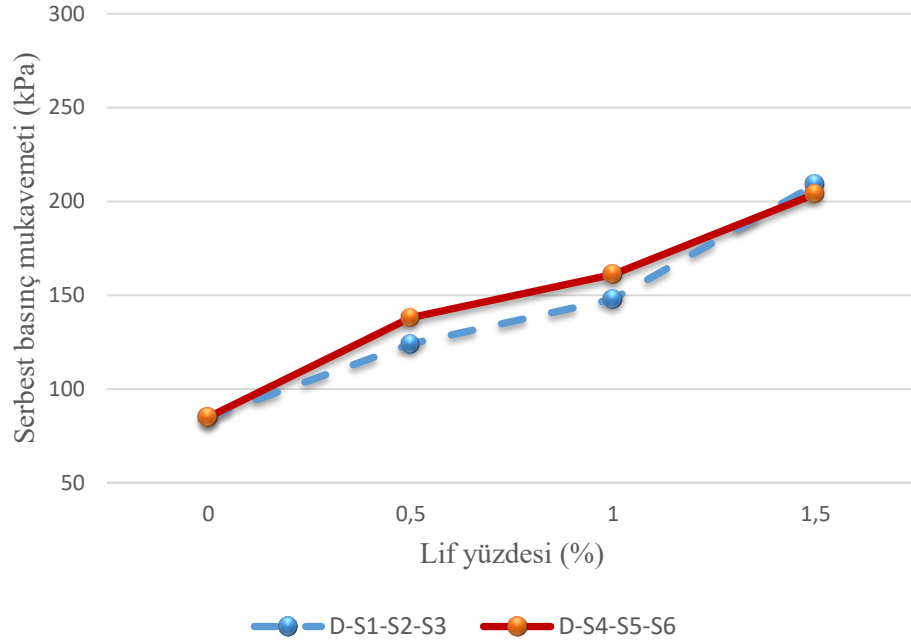
#### 4.4. Donma Çözülme Deney Sonuçları

Çizelge 4.5'te saman/kendir/monolif polyester iplik katkılı kil numunelerin 4 çevrim donma çözölmeye tabi tutulması sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişimler görölmektedir.

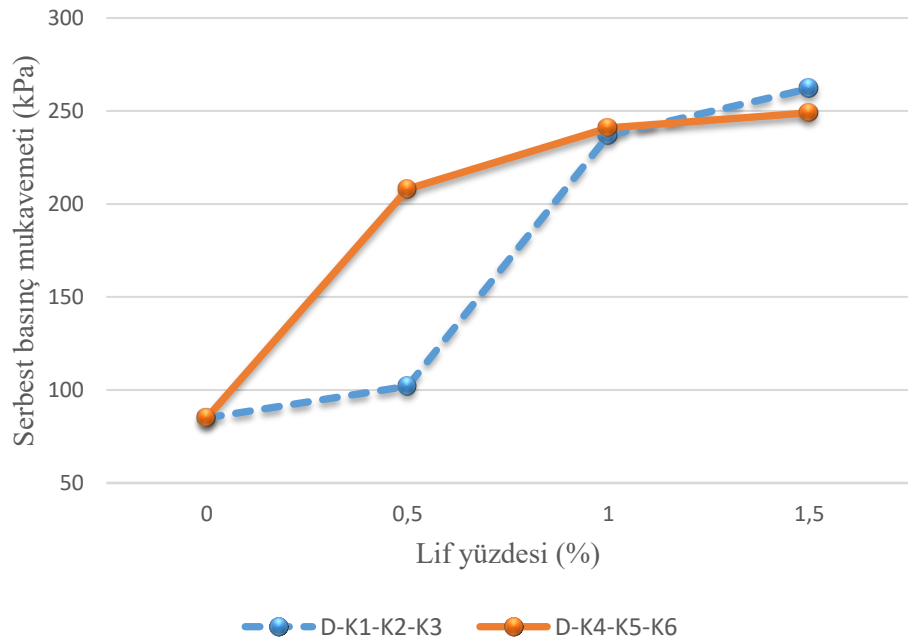
Çizelge 4.5 incelendiğinde, doğal kile 2 mm ve 5 mm uzunluklarda saman, kendir ve monolif polyester ipliğın %0,5, %1 ve %1,5 oranında sırasıyla karıştırılmasıyla elde edilen lif katkılı numunelere, 4 çevrim -20 °C ve +25 °C de donma çözölmeye deneyi uygulandıktan sonra gerçekleştirilen serbest basınç deneyleri sonucunda donma çözölmeye sonrası en yüksek serbest basınç mukavemetinin %1,5 kendir katkı oranında ve 2 mm kendir lifi uzunluğunda elde edildiği gözlemlenmiştir (262 kPa).

**Çizelge 4.5.** Saman/kendir/monolif polyester iplik katkılı numunelerin 4 çevrim donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri

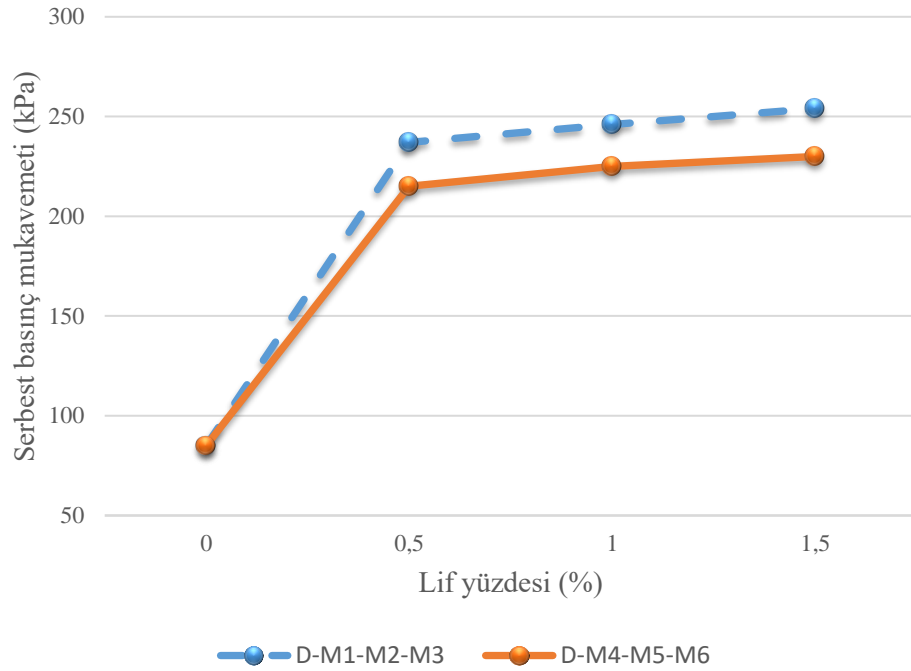
<b>Numune kodu</b>	<b>Lif uzunluğu (mm)</b>	<b>Lif yüzdesi (%)</b>	<b>Serbest Basınç Mukavemeti, <math>q_u</math> (kPa)</b>
D	0	0	85
S1	2	0,5	124
S2	2	1	148
S3	2	1,5	209
S4	5	0,5	138
S5	5	1	161
S6	5	1,5	204
K1	2	0,5	102
K2	2	1	237
K3	2	1,5	262
K4	5	0,5	208
K5	5	1	241
K6	5	1,5	249
M1	2	0,5	237
M2	2	1	246
M3	2	1,5	254
M4	5	0,5	215
M5	5	1	225
M6	5	1,5	230



**Şekil 4.25.** Saman katkılı kil numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim



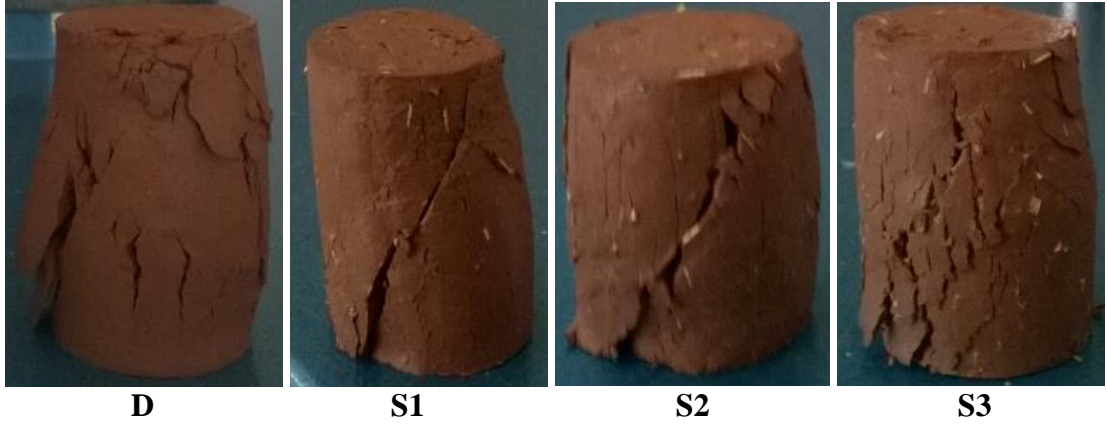
**Şekil 4.26.** Kendir katkılı kil numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim



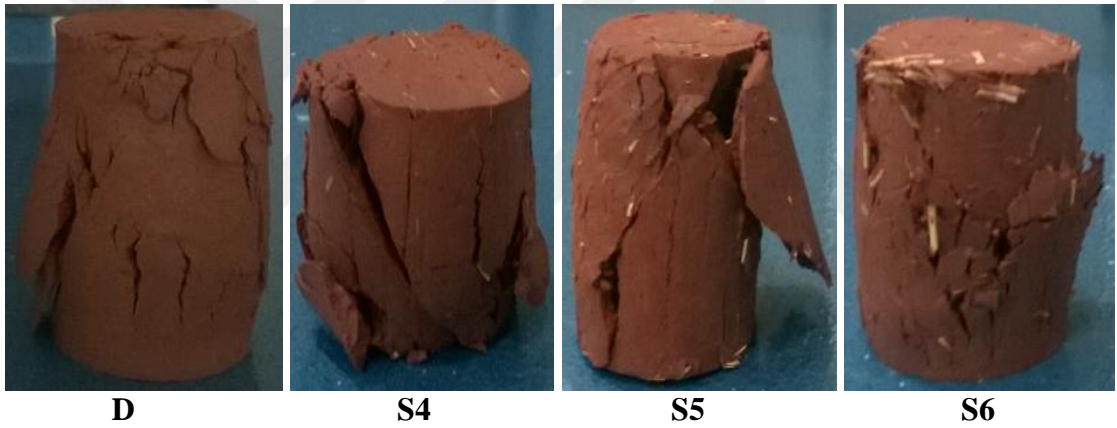
**Şekil 4.27.** Monolif polyester iplik katkılı kil numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim

Şekil 4.25 incelendiğinde, 2 mm ve 5 mm saman katkılı kilin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti saman oranı %1,5 olduğunda doğal kile göre sırasıyla, %145,9 ve %140 oranında artmıştır. Şekil 4.26'ya göre, 2 mm ve 5 mm kendir katkılı kilin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti kendir oranı %1,5 olduğunda doğal kile göre sırasıyla %208,2 ve %193 oranında artmıştır. Şekil 4.27 incelendiğinde ise, 2 mm ve 5 mm monolif polyester iplik katkılı kilin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinin monolif polyester iplik oranı %1,5 olduğunda doğal kile göre sırasıyla %198,8 ve %170,6 oranında arttığı belirlenmiştir.

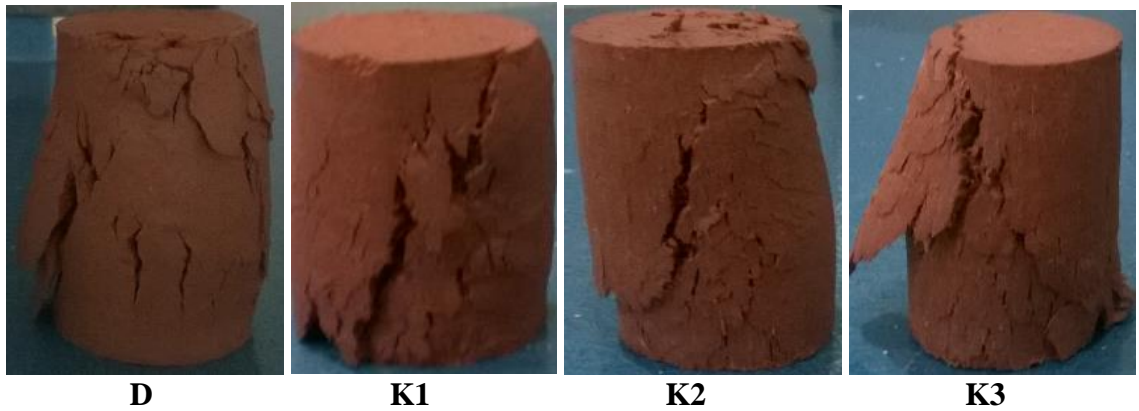
Şekil 4.28, Şekil 4.29'da saman, Şekil 4.30, Şekil 4.31'de kendir ve Şekil 4.32, Şekil 4.33'te ise monolif polyester iplik katkılı kil numunelerin 4 çevrim donma çözülme deneyi sonrasında gerçekleştirilen serbest basınç deneyi sonrası meydana gelen kırılma şekilleri görülmektedir.



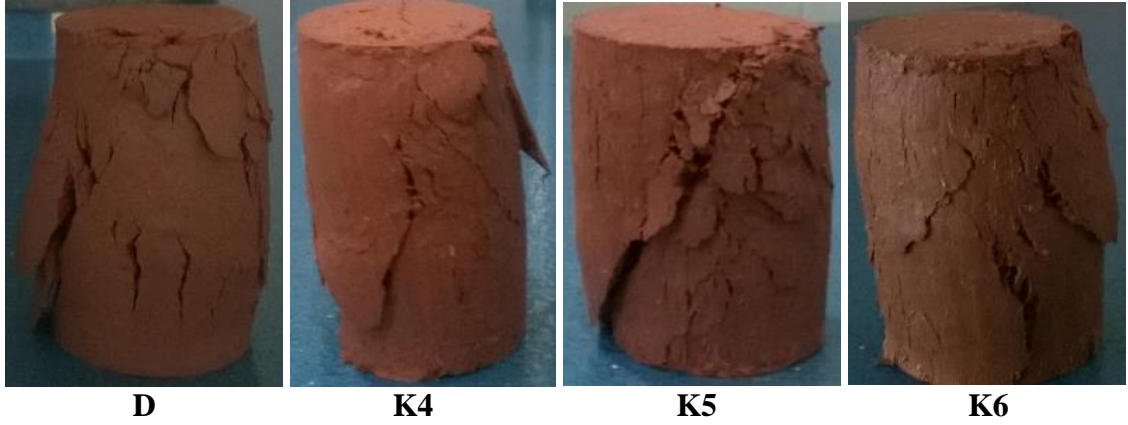
**Şekil 4.28.** 2 mm uzunluğunda saman katkılı kil numunelerin 4 çevrim donma çözülme sonrasında serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri



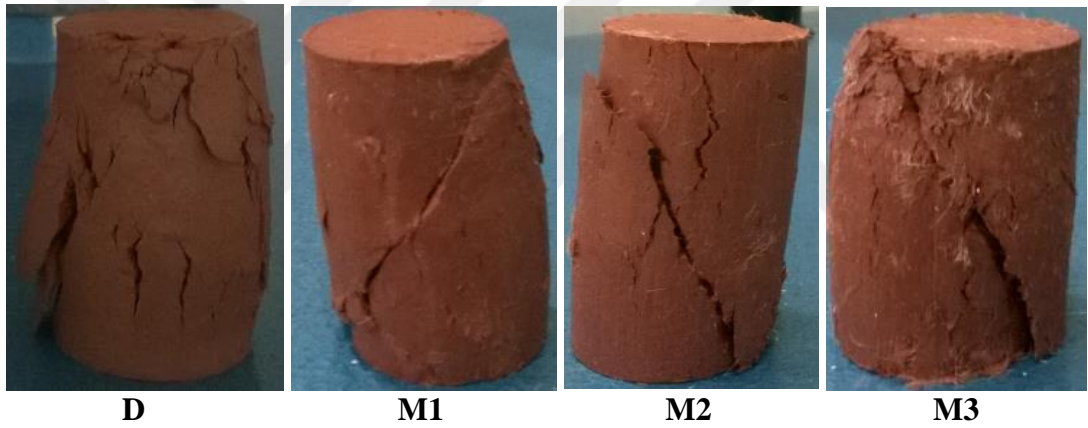
**Şekil 4.29.** 5 mm uzunluğunda saman katkılı kil numunelerin 4 çevrim donma çözülme sonrasında serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri



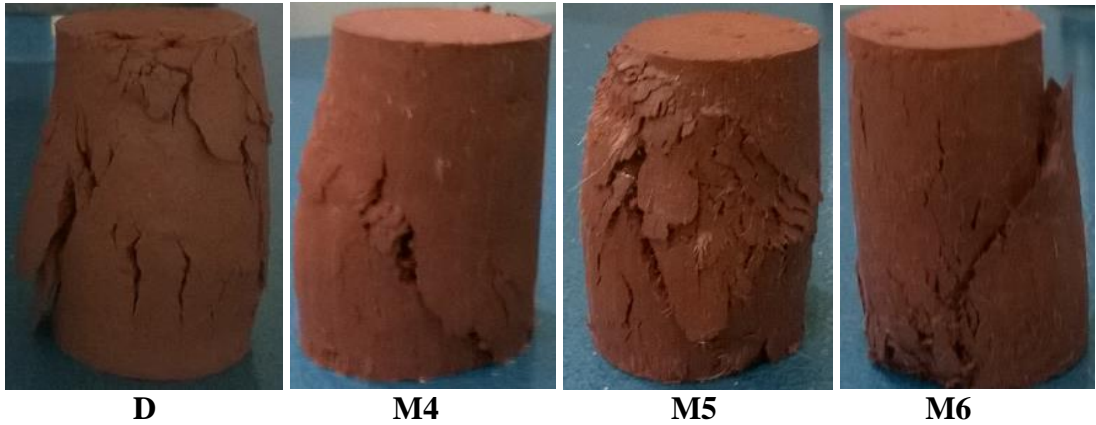
**Şekil 4.30.** 2 mm uzunluğunda kendir katkılı kil numunelerin 4 çevrim donma çözülme sonrasında serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri



**Şekil 4.31.** 5 mm uzunluğunda kendir katkılı kil numunelerin 4 çevrim donma çözülme sonrasında serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri



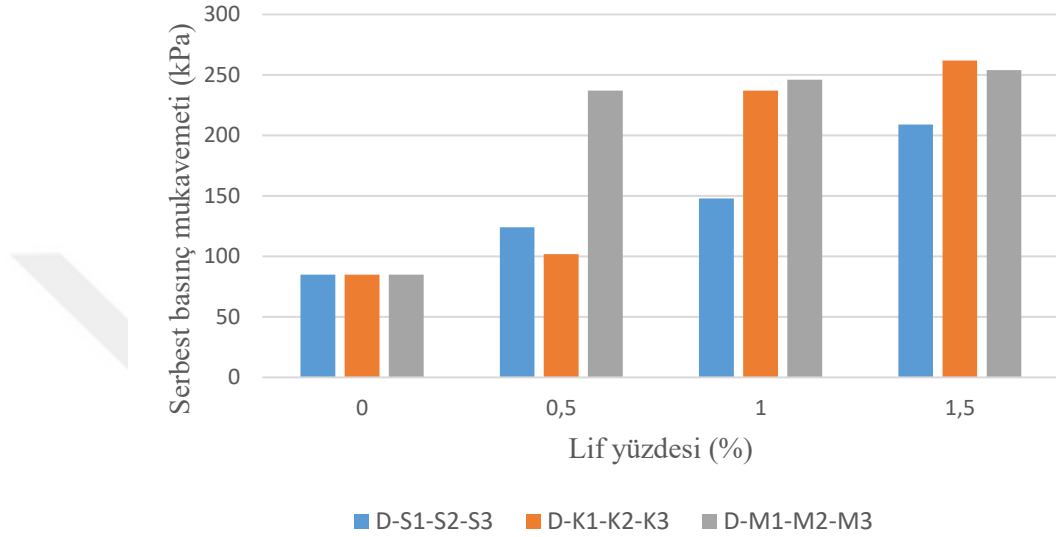
**Şekil 4.32.** 2 mm uzunluğunda monolif polyester iplik katkılı kil numunelerin 4 çevrim donma çözülme sonrasında serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri



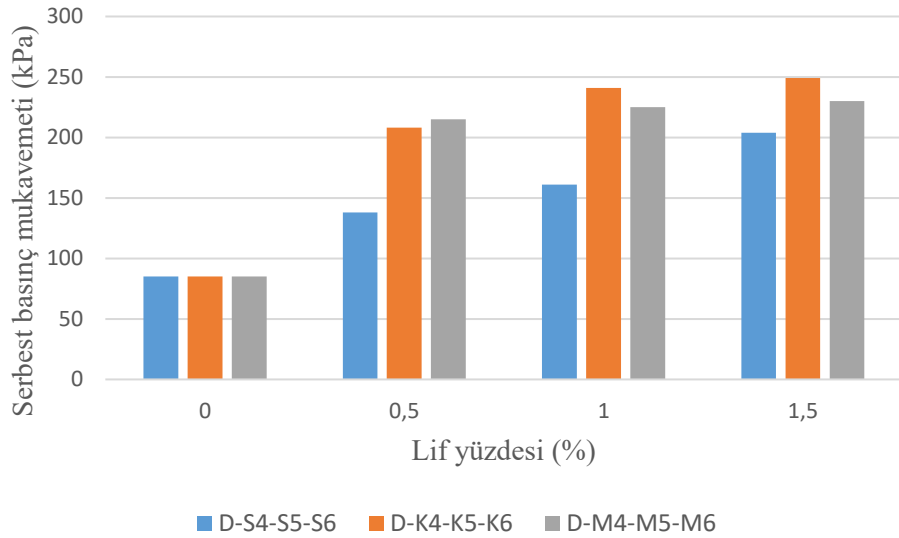
**Şekil 4.33.** 5 mm uzunluğunda monolif polyester iplik katkılı kil numunelerin 4 çevrim donma çözülme sonrasında serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri



Şekil 4.34'te 2 mm uzunluğunda, Şekil 4.35'te ise 5 mm uzunluğunda ve farklı oranlarda; kendir, saman ve monolif polyester iplik katkıli kil numunelerin donma çözülme çevrimi sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişimler görülmektedir.



Şekil 4.34. 2 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katkıli numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim



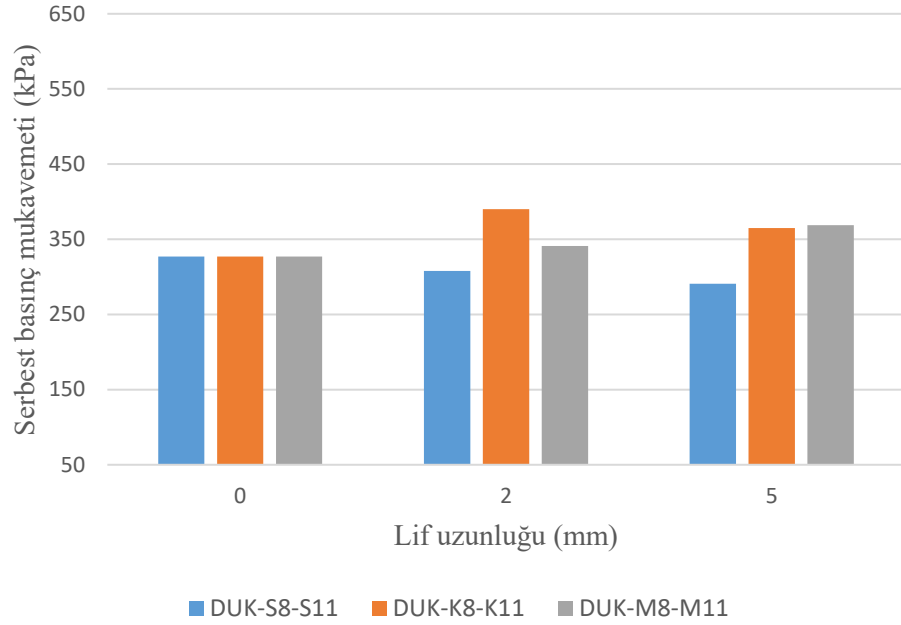
Şekil 4.35. 5 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katkıli numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim

Şekil 4.34 ve 4.35'e göre, saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı kil numunelere 4 çevrim donma-çözülme sonrası gerçekleştirilen serbest basınç mukavemetlerinin lif yüzdesi artışı ile arttığı belirlenmiştir. Lif uzunluğunun artışı ile saman ve kendir katkılı numunelerde, %0,5 ve %1 lif katkılı numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri artarken katkı oranı %1,5 olduğunda donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinde azalma meydana geldiği söylenebilir. Monolif polyester iplik katkılı numunelerde ise lif uzunluğunun artışı ile lif katkılı numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde azalma meydana geldiği görülmüştür.

%1 oranında, 2 mm ve 5 mm uzunluklarda saman, kendir ve monolif polyester katkılı kile %10 uçucu kül ilave edilerek elde edilen numunelerin donma çözülme deneyi sonrası serbest basınç mukavemetleri Çizelge 4.6'da görülmektedir. Şekil 4.36'da ise uçucu kül katkılı numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim görülmektedir.

**Çizelge 4.6.** %10 uçucu kül katkılı numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri

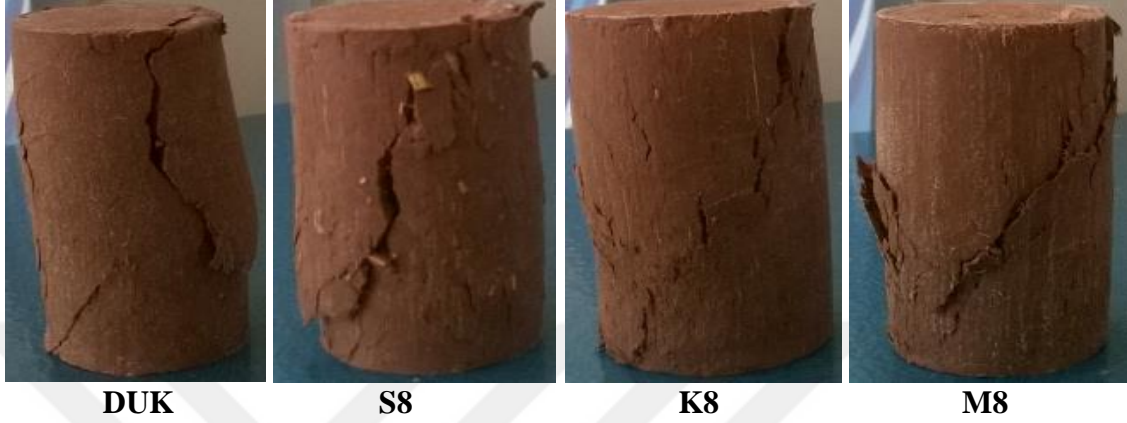
Numune kodu	Uçucu kül (%)	Lif uzunluğu (mm)	Lif yüzdesi (%)	Serbest Basınç Mukavemeti, $q_u$ (kPa)
DUK	10	0	0	327
S8	10	2	1	308
S11	10	5	1	291
K8	10	2	1	390
K11	10	5	1	365
M8	10	2	1	341
M11	10	5	1	369



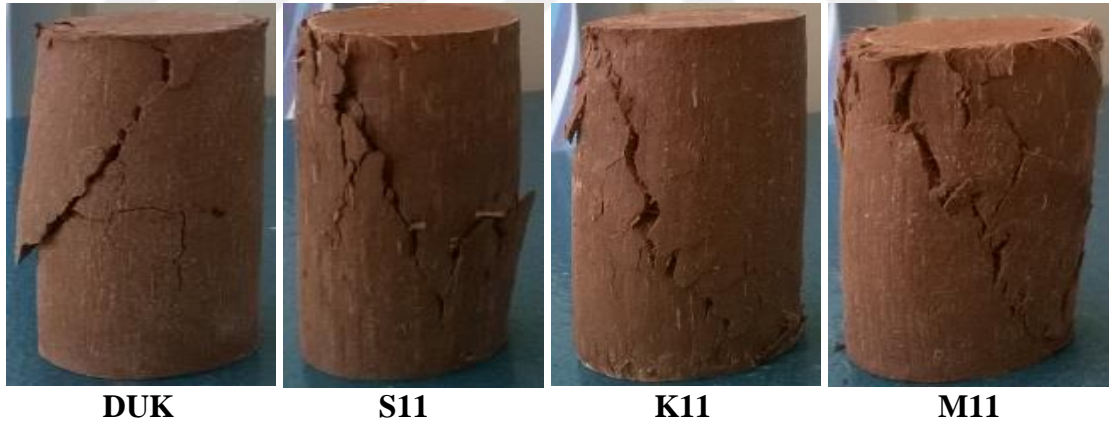
**Şekil 4.36.** %10 uçucu kül katkılı kil numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim

Şekil 4.36 incelendiğinde, uçucu kül katkılı kile %1 oranında 2 mm ve 5 mm saman ilave edilmesiyle elde edilen saman katkılı numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti; uçucu kül katkılı kile göre lif uzunluğu 2 mm ve 5 mm için sırasıyla %5,8 ve %11 oranında azalmıştır. Uçucu kül katkılı kile %1 oranında 2 mm ve 5 mm kendir ve 2 mm ve 5 mm monolif polyester iplik ilave edilmesiyle elde edilen lif katkılı numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri, uçucu kül katkılı kile göre, sırasıyla, %19,3, %11,6, %4,3 ve %12,8 oranlarında artmıştır. Yine Şekil 4.36'ya göre kendir ve saman uzunluğundaki artışla donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinde azalma meydana gelmiştir. Monolif polyester iplik uzunluğu arttıkça donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti artmıştır. Ayrıca donma çözülme sonrası en yüksek serbest basınç mukavemetinin 2 mm uzunluğunda kendirde elde edildiği gözlemlenmiştir (390 kPa).

Şekil 4.37 ve Şekil 4.38’de %10 uçucu kül katkılı numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç deneyi sonrasında meydana gelen kırılma şekilleri gösterilmiştir.

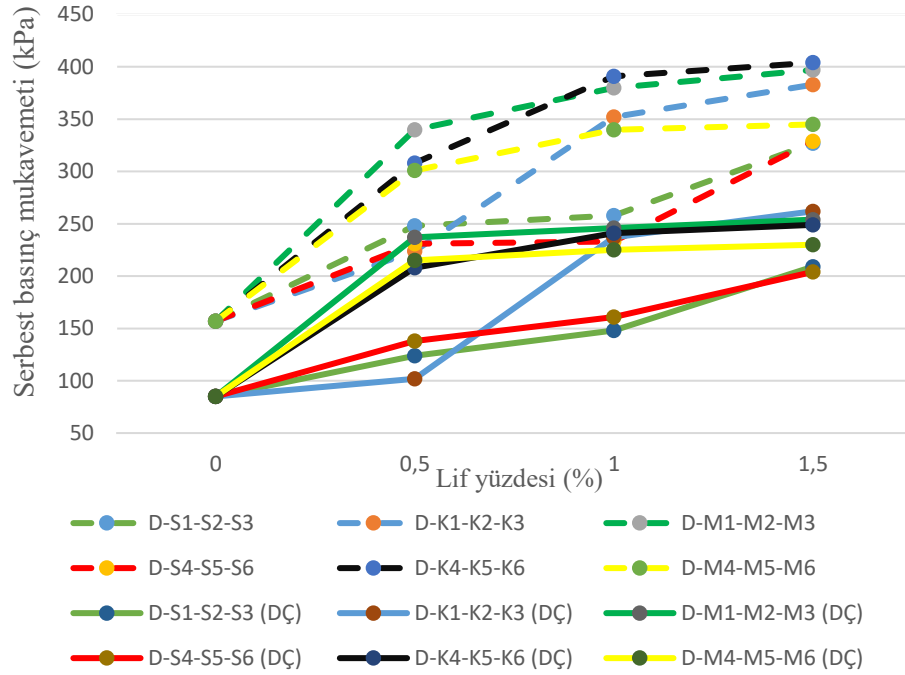


**Şekil 4.37.** 2 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı %10 uçucu kül ilaveli numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri



**Şekil 4.38.** 5 mm uzunluğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı %10 uçucu kül ilaveli numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç deneyi sonucu meydana gelen kırılma şekilleri

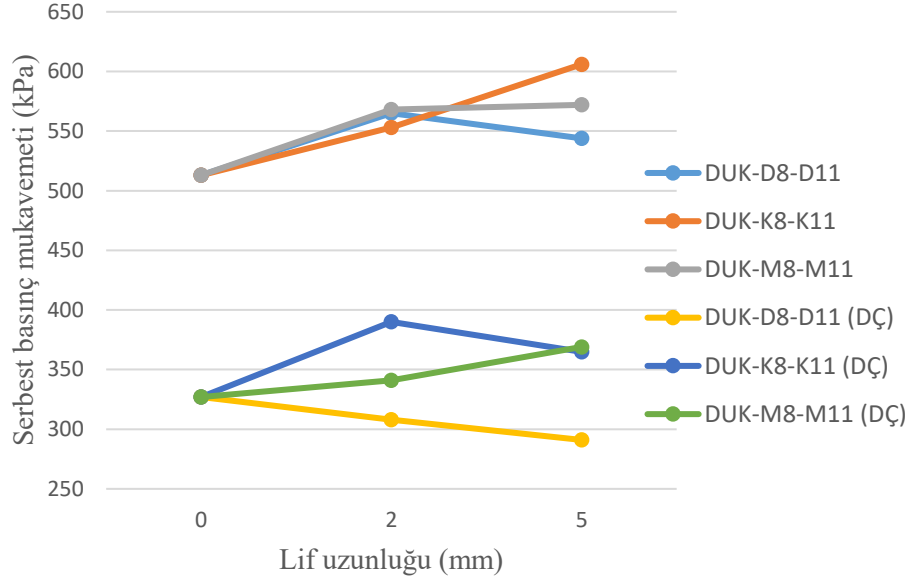
Şekil 4.39’da saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı, uçucu kül katkısız numunelerin donma çözülme öncesi ve donma çözülme sonrası elde edilen serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişimler birarada gösterilmektedir.



**Şekil 4.39.** Uçucu kül katkısız numunelerin serbest basınç ve donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim

Şekil 4.39 incelendiğinde uçucu kül katkısız lif katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri ile donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri karşılaştırıldığında en fazla mukavemet kaybı %54,5 ile 2 mm uzunluğunda %0,5 kendir katkılı numunede; en az mukavemet kaybı ise %28,6 ile 5 mm uzunluğunda %0,5 monolif polyester iplik katkılı numunede gerçekleşmiştir.

Şekil 4.40'ta 7 gün bekletilen uçucu kül katkılı numunelere 7 gün sonunda elde edilen serbest basınç mukavemetlerinde ve donma çözülmeye maruz bırakılan ve sonrasında elde edilen serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişimler birarada gösterilmektedir.



**Şekil 4.40.** Uçucu kül katkılı numunelerin serbest basınç ve donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim

Şekil 4.40'a göre 7 gün bekletilmiş %10 uçucu kül katkılı numunelerin 7 günlük serbest basınç mukavemetleri ile donma çözülmeye maruz bırakıldıktan sonra belirlenmiş olan serbest basınç mukavemetleri karşılaştırıldığında; en az serbest basınç mukavemeti kaybının %29,5 kayıpla 2 mm uzunluğunda kendir katkılı numunede olduğu görülmüştür. En fazla serbest basınç mukavemet kaybı ise %46,5 ile 5 mm uzunluğunda saman katkılı numunede gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.7'de uçucu kül olmayan numunelerde donma çözülme deneyi sonucunda meydana gelen kütle kaybı değişimi gösterilmektedir. Çizelge 4.8'de ise uçucu kül katkılı numunelerde donma çözülme deneyi sonucunda meydana gelen kütle kaybı değişimi gösterilmektedir.

**Çizelge 4.7.** Donma çözülme deneyi öncesi ve sonrasında uçucu kül katkısız numunelerin kütlelerinde meydana gelen değişim

Numune kodu	Kütle kaybı %
D	0,183
S1	0,167
S2	0,092
S3	0,104
S4	0,136
S5	0,245
S6	0,256
K1	0,157
K2	0,130
K3	0,122
K4	0,111
K5	0,076
K6	0,139
M1	0,188
M2	0,106
M3	0,167
M4	0,132
M5	0,136
M6	0,187

Çizelge 4.7'ye göre donma çözülme deneyi uygulanması ile en az kütle kaybının 5 mm uzunluğundaki kendir katkılı kil numunelerde ve %1 oranında gerçekleştiği görülmüştür.

**Çizelge 4.8.** Donma çözülme deneyi öncesi ve sonrasında uçucu kül katkılı numunelerin kütlelerinde meydana gelen değişim

Numune kodu	Kütle kaybı %
DUK	0,118
S8	0,107
S11	0,088
K8	0,095
K11	0,087
M8	0,088
M11	0,099

Çizelge 4.8'e göre uçucu küllü numunelerde donma çözülme deneyi uygulanması ile en az kütle kaybının 5 mm uzunluğundaki kendir katkılı kil numunelerde %1 oranında gerçekleştiği söylenebilir.





## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Çalışma kapsamında; Erzurum Oltu yöresine ait doğal bir kile farklı yüzdelerde (0,5, %1, %1,5) ve farklı uzunluklarda (2 mm, 5 mm) saman, kendir ve monolif polyester iplik katılarak elde edilen lif katkılı kil numunelerin kıvam, kompaksiyon, serbest basınç ve donma çözülme özellikleri araştırılmıştır. İlâveten %1 lif katkılı kil numunelere %10 uçucu kül ilave edilmiş, lif katkılı uçucu küllü kil numunelerin kıvam, serbest basınç ve donma çözülme özellikleri incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanmıştır:

Kıvam limitleri deneyleri sonucunda USCS'ye göre doğal kilin zemin sınıfı CH olarak belirlenmiştir. %10 uçucu kül katkısı doğal kilin likit limitini düşürmüş ve zemin sınıfının MH zemin sınıf davranışı gösterdiği belirlenmiştir.

Kendir katkılı, uçucu kül katkılı/katkısız kil numunelerine yapılan deneylerde lif uzunluğu ve lif yüzdesi arttıkça likit limit değerlerinin arttığı belirlenmiştir. 5 mm uzunluğunda monolif polyester iplik katkılı ve uçucu kül katkılı/katkısız numunelerin likit limitleri monolif polyester iplik yüzdesinde meydana gelen artışla artmıştır. Saman katkılı, uçucu kül katkılı/katkısız kil numunelerin likit limit değerlerinde ise kararsız bir değişim gözlemlenmiştir. Uçucu kül katkılı numunelerin kıvam limiti deneylerinde en yüksek likit limit değerinin lif yüzdesi %1,5 olan 2 mm uzunluğundaki kendir katkılı numunelerde elde edildiği görülmüştür (%71,7). Kilin CH olan zemin sınıfının liflerin etkisiyle MH zemin sınıf davranışı gösterdiği görülmüştür.

Uçucu kül katkılı/katkısız kil numunelerin plastik limit ve plastisite indislerinin lif ve uçucu kül ilavesi ile değiştiği gözlemlenmiştir.

Doğal kil üzerinde yapılan standart proktor deney sonucunda kilin optimum su muhtevası %25,5, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri ise 15 kN/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir.

Doğal kile %10 oranında uçucu kül ilave edilmesi sonucu yapılan standart proktor deney sonucunda ise optimum su muhtevası %24,5, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri ise  $14,7 \text{ kN/m}^3$  olarak bulunmuştur. Doğal kil ve %10 uçucu kül katkılı doğal kil üzerinde gerçekleştirilen standart proktor deneyleri uçucu kül ilavesi ile kilin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin düştüğünü göstermiştir. Dolayısıyla uçucu külün şişen kil zeminlerin stabilizasyonuna yönelik olarak iyileştirme amacıyla kullanılabileceği söylenebilir.

Lif katkılı doğal kil numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. 2 mm ve 5 mm uzunluğundaki saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı numunelerin tamamında lif yüzdesinde meydana gelen artışla serbest basınç mukavemetlerinin arttığı görülmüştür. Saman ve monolif polyester iplik katkılı numunelerde 2 mm uzunluğu ile elde edilen numunelerin serbest basınç mukavemetleri 5 mm uzunluğundakine göre genelde daha yüksek olmuştur. Ancak 5 mm uzunluğunda %1,5 saman katkılı kil numunelerde serbest basınç mukavemeti (329 kPa) 2 mm uzunluğunda %1,5 saman katkılı kil numunelerin serbest basınç mukavemetinden (327 kPa) daha yüksek olarak belirlenmiştir. Ayrıca kendir katkılı numunelerde ise 5 mm uzunluğu ile elde edilen serbest basınç mukavemeti 2 mm uzunluğu ile elde edilen serbest basınç mukavemetine göre daha yüksektir. Lif katkılı numunelerde en yüksek serbest basınç mukavemeti 404 kPa olup 5 mm uzunlukta %1,5 kendir katkılı numunede elde edilmiştir.

2 mm uzunluğunda saman katkılı kilin serbest basınç mukavemeti saman oranı %1,5 olduğunda doğal kile göre %108; 5 mm uzunluğunda saman katkılı kilin serbest basınç mukavemeti ise saman oranı %1,5 olduğunda doğal kile göre %109 oranında artış göstermiştir.

2 mm uzunluğunda kendir katkılı kilin serbest basınç mukavemeti kendir oranı %1,5 olduğunda doğal kile göre %144; 5 mm uzunluğunda kendir katkılı kilin serbest basınç mukavemeti ise kendir oranı %1,5 olduğunda doğal kile göre %157 oranında artış göstermiştir.

2 mm uzunluğunda monolif polyester iplik katkıli kilin serbest basınç mukavemeti monolif polyester iplik oranı %1,5 olduğunda doğal kile göre %153; 5 mm uzunluğunda monolif polyester iplik katkıli kilin serbest basınç mukavemeti ise monolif polyester iplik oranı %1,5 olduğunda doğal kile göre %120 oranında artış göstermiştir.

%1 lif katkıli kil numunelere %10 uçucu kül katılmış, 7 gün küre tabi tutulan numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Uçucu küllü, lif ilaveli killerin serbest basınç mukavemetlerinin lif ilavesiz olanlara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Uçucu kül katkıli numunelerde en yüksek serbest basınç mukavemeti 606 kPa olup 5 mm uzunlukta %1,5 kendir katkıli numunede gerçekleşmiştir.

%10 uçucu kül katkıli kil numunelerde; kendir ve monolif polyester iplik katkısı için lif uzunluğu artışı ile serbest basınç mukavemeti artmış, saman katkıli kil numunelerde ise serbest basınç mukavemeti azalmıştır

%10 uçucu küllü 2 mm uzunluğunda lif katkıli numunelerde, lif oranı %1 olduğunda saman, kendir ve monolif polyester iplik katkıli numunelerin serbest basınç mukavemetleri %10 uçucu kül katkıli kil numunenin serbest basınç mukavemetine göre sırasıyla %10,1, %7,8 ve %10,7 oranlarında artmıştır. %10 uçucu küllü 5 mm uzunluğunda lif katkıli numunelerde ise lif oranı %1 olduğunda, saman, kendir ve monolif polyester iplik katkıli numunelerin serbest basınç mukavemetleri, %10 uçucu kül katkıli kil numunenin serbest basınç mukavemetine göre sırasıyla %6, %18,1 ve %11,5 oranlarında artmıştır.

Lif katkıli doğal kil numuneler üzerinde 4 çevrim donma çözülme deneyleri yapılmıştır. Tüm lif katkıli numunelerin donma çözülme sonrasında belirlenen serbest basınç mukavemetleri doğal kilin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetine göre daha yüksektir. Lif katkıli numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri lif yüzdesinde meydana gelen artışla artmıştır.

Lif katkılı kil numunelerde saman ve kendir uzunluğundaki artışla donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti %0,5 ve %1 lif oranı için artmış, %1,5 lif oranında ise donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinde azalma meydana gelmiştir. Monolif polyester iplik katkılı kil numunelerde ise monolif polyester iplik uzunluğu arttıkça donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti azalmıştır. Donma çözülme sonrası en yüksek serbest basınç mukavemeti 262 kPa olup 2 mm uzunluğunda %1,5 kendir katkılı kil numunesinde elde edildiği görülmüştür.

2 mm ve 5 mm uzunluğunda saman katkılı kilin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti saman oranı %1,5 olduğunda doğal kile göre sırasıyla, %145,9 ve %140 oranında artmıştır.

2 mm ve 5 mm uzunluğunda kendir katkılı kilin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti kendir oranı %1,5 olduğunda doğal kile göre sırasıyla %208,2 ve %193 oranında artmıştır.

2 mm ve 5 mm uzunluğunda monolif polyester iplik katkılı kilin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinin monolif polyester iplik oranı %1,5 olduğunda doğal kile göre sırasıyla %198,8 ve %170,6 oranında arttığı belirlenmiştir.

Uçucu kül katkılı kile %1 oranında 2 mm ve 5 mm saman ilave edilmesiyle elde edilen saman katkılı numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti, uçucu kül katkılı kile göre, lif uzunluğu 2 mm ve 5 mm için sırasıyla, %5,8 ve %11 oranında azalmıştır. Uçucu kül katkılı kile %1 oranında 2 mm ve 5 mm kendir ve 2 mm ve 5 mm monolif polyester iplik ilave edilmesiyle elde edilen lif katkılı numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri, uçucu kül katkılı kile göre, sırasıyla, %19,3, %11,6, %4,3 ve %12,8 oranlarında artmıştır. Kendir ve saman uzunluğundaki artışla donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinde azalma; monolif polyester iplik uzunluğu arttıkça donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinde artma meydana gelmiştir. Ayrıca donma çözülme sonrası en yüksek serbest basınç mukavemetinin 2 mm uzunluğunda kendirde elde edildiği gözlemlenmiştir (390 kPa).

Uçucu kül katkısız lif katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri ile donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri karşılaştırıldığında ise en fazla mukavemet kaybı %54,5 ile 2 mm uzunluğunda %0,5 kendir katkılı numunede, en az mukavemet kaybı ise %28,6 ile 5 mm uzunluğunda %0,5 monolif polyester iplik katkılı numunede gerçekleşmiştir.

Ayrıca %1 lif katkılı, %10 uçucu kül ilaveli kil numuneler 7 gün kürde bekletildikten sonra donma çözülme deneyine tabi tutulmuştur. 7 gün bekletilen ve serbest basınç deneyine tabi tutulan lif katkılı numunelerin serbest basınç mukavemeti ile bunların donma çözülme deneyi sonrası belirlenen serbest basınç mukavemetleri karşılaştırıldığında; en az serbest basınç mukavemet kaybının %29,5 kayıpla 2 mm uzunluğunda kendir katkılı numunede olduğu görülmüştür. En fazla serbest basınç mukavemet kaybının ise %46,5 ile 5 mm uzunluğunda saman katkılı numunede gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Donma çözülmenin numunelerin serbest basınç mukavemetini azalttığı sonucuna varılmıştır.

Doğal kilin, lif katkılı kil numunelerin ve %10 uçucu kül ilaveli lif katkılı kil numunelerin donma çözülme sonrası meydana gelen kütle kayıpları belirlenmiştir. En az kütle kaybının 5 mm uzunluğunda %1 kendir katkılı kil numunesinde gerçekleşmiş olduğu görülmüştür. En fazla kütle kaybının ise %1,5 oranında 5 mm uzunluğunda saman katkılı kil numunede meydana geldiği söylenebilir.

Sonuçlar değerlendirildiğinde; saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı uçucu kül katkılı/katkısız kil numuneler içinde donma çözülmeden en az etkilenen numunelerin kendir katkılı numuneler olduğu görülmüştür. Kendir katkılı numunelerin likit limitleri ve serbest basınç mukavemetleri de diğer lif katkılarına göre daha yüksektir. Bu durumda kendirin özellikle soğuk iklim bölgelerinde donma çözülmenin etkilerinin azaltılması amacıyla alternatif bir malzeme olarak değerlendirilebileceği söylenebilir.

## KAYNAKLAR

- Acar, M., Dönmez, A., 2019. Kenevire Farklı Bir Bakış. Karadeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü, Samsun.
- Aksoy, H.S., Yılmaz, M., Akarsu, E.E., 2008. Killi bir zeminin Tunçbilek uçucu külü kullanılarak stabilizasyonu. Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Al Wahab, R. M., El-Kedrah, M. A., 1995. Using fibers to reduce tension cracks and shrink/swell in a compacted clay. Geotechnical Special Publication, Vol 46(1), 791-805.
- Ang, E.C., Erik L.J., 2003. Specimen Size Effects for Fiber-Reinforced Silty Clay in Unconfined Compression. Geotechnical Testing Journal, Vol. 26, (2), 191-200.
- Anonim, 2019a. <https://www.egehaber.com/gundem/cumhurbaskani-erdogan-dan-aciklama-turkiye- kenevir-uretimine-h261991.html> (22.02.2019)
- Anonim, 2019b. <https://tekstilsayfasi.blogspot.com/2015/10/polyester-lifleri-pes-poliester.html> (22.02.2019)
- Aras, M., 1971. The Effect of Pozzolanic Admixtures on Heat of Hydration of Portland Cement and Shrinkage of Mortar and Concrete. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- ASTM C618, 2005. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. Annual Book of ASTM Standarts.
- ASTM D 2166-00, 2002. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, pp. 1-6.
- ASTM D 422-63., 2002. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1-8.
- ASTM D 4318-00, 2000. Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM West Conshohocken, PA.
- ASTM D 698-12, 2012. Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. ASTM West Conshohocken, PA.
- ASTM D 854-02., 2002. Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1-7.
- Atanur, A., 1971. Uçucu küllerin kimyasal ve fiziksel vasıfları ve yapı malzemesi olarak kullanılması. Bayındırlık Bakanlığı, KGM Yayınları, Ankara.
- Aydın, S., 2010. Yenikent (Ankara) yerleşim alanı killilerinin kireç ve uçucu külle geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 218s, Ankara.
- Ayhan, A., 2011. Biyopolimer Katkıları İle Zeminlerin Mühendislik Özelliklerinin İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Babu, S.G.L., Vasudevan, A.K., 2008. Strength and Stiffness Response of Coir Fiber-Reinforced Tropical Soil. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol 20(9), 571-577.

- Başer O., Çokca E., 2010. Şişen zeminlerin atık mermer tozu kullanılarak iyileştirilmesi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 13. Ulusal kongresi, Cilt 1: 143-152, İstanbul.
- Bilge, T., 2011. Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Kil Zeminlerin Stabilizasyonuna Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Bodur, A., 2014. Pamuk ve Farklı Tipte Polyester Lifler Kullanılarak Örülen Çift Yüzlü Örne Kumaşların Konfor Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Uşak Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uşak.
- Boominathan, A., Hari, S., 2002. Liquefaction strength of fly ash reinforced with randomly distributed fibers. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 22, 1027–1033.
- BS 1377, 1990. Methods of Test for Soils For Civil Engineering Purposes, Classification Tests. Türk Standardları Enstitüsü.
- Bulut, Y., Erdoğan, Ü.H., 2011. Selüloz Esaslı Doğal Liflerin Kompozit Üretiminde Takviye Materyali Olarak Kullanımı. Tekstil ve Mühendis, Vol 82, 35.
- Cai, Y., Shi, B., Ng, C.W.W., and Tang, C.S. , 2006. Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil. Engineering Geology, Vol. 87 ,pp 230-240.
- Cernica, J.N., 1995. Geotechnical Engineering: Soil Mechanics. John Wiley & Sons Inc., 450 p, USA.
- Cripwell, B., 1992. What is pfa? Concrete, 26, 3, 11-13 Research 18, 1–8.
- Crockford, W.W., Grogan, W.P., Chill, D.S., 1993. Strength and life of stabilized layers containing fibrillated polypropylene. Transformation Research Record 1418, TRB. National Research Council, Washington, C. C., pp. 60–66.
- Çinçin, Y., 2015. Linyit Yakan Termik Santral Uçucu Küllerinden Kireç Katkısı ile Hafif Tuğla Üretiminin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Das, B.M., and Sobhan K., 2014. Principles of Geotechnical Engineering. Cengage Learning, 770 p, USA.
- Demiral, A., 2013. Killerin Elektrokinetik Özellikleri ve Flokülasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Ece, P., 2007. Polyesterler ve Polimerler, Proje Tabanlı Deney Uygulamaları. Hacettepe Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Kimya Eğitim Anabilim Dalı, Ankara.
- EPDK, 2018. Elektrik Piyasası Sektör Raporu. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, s 2, Ankara.
- Ergene A., 1987. Toprak Biliminin Esasları. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi.
- Erşan, H., 1996. Uçucu Küllerin Siltli Zeminlerin Kayma Mukavemeti Üzerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 75 s., İstanbul.
- Fell, R., Macgregor, P., Stapledon, D., 1992. Geotechnical engineering of embankment dams. Balkema, Rotterdam, 675.
- Gedik, G., 2012. Kenevir Liflerinden Üretilen Kumaşların Optimum Ağartma Koşullarının ve Yöntemlerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale.

- Ghazavi, M., Roustaei, M., 2010. The influence of freeze thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber reinforced clay. *Cold Regions Science And Technology*, Vol 61, 125-131.
- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M.S. ve Demir, İ., 2008. Uçucu Kül Bölüm II: Kimyasal, Mineralojik ve Morfolojik Özellikler. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Vol 5(2), 33-42.
- Gücek, S., 2011. Mermer Tozu ve Uçucu Külün Kil Zeminlerin İyileştirilmesinde Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Güvercin, T., 2002. Silis Dumanı, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufunun Bağlayıcı Olarak Çimento Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Harmancıoğlu, M., Yazıcıoğlu, G., 1979. Bitkisel Lifler. E. Ü. Yay. No 3, İzmir.
- Holtz, R.D., Kovacs, W.D., 1981. *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice Hall, New Jersey, 733 p.
- Iasbik, I, De Lima, D. C. , Carvalho, C. A. B. , Silva, C. H.C., Minette, E., Barbosa, P.S., 2002. Geotechnical characterization of a clayey soil stabilized with polypropylene fiber using unconfined compression and resilient modulus testing data in Resilient Modulus Testing for Pavement Components. pp. 114–125, ASTM Special Technical Publication (STP 1437), West Conshohocken, PA, USA.
- İrklı Eryıldız, D., Başkaya, A., 2007. Saman Balyası İle Yapılanma Kırıkkale-Hasandede’de Bir Prototipin Yapımı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Dergisi C 15(1)*, s 87-104, Ankara.
- Kalay, E., 2010. Sıkıştırılmış Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Stabilizasyonunda Ponza, Mermer Tozu ve Kirecin Kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Kalhor, A., 2008. Effect of Metal Fibers on Clayey Soils. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, V13 K, 1517.
- Kalkan, E., 2003. Oltu (Erzurum) Killilerinin Bariyer Olarak Kullanımında Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Kalkan, E., Akbulut, S., 2004. The positive effects of silica fume on the permeability, swelling pressure and compressive strength of natural clay liners. *Engineering Geology*. 73: 145-156.
- Kalkan, E., 2006. Utilization of red mud as a stabilization material for the preparation of clay liners. *Engineering Geology*. 87: 220–229.
- Kalkan, E., 2009. Influence of silica fume on the desiccation cracks of compacted clayey soils. *Applied Clay Science*. 43: 296-302.
- Kalkan, E., 2011. Impact of wetting–drying cycles on swelling behavior of clayey soils modified by silica fume. *Applied Clay Science*. 52: 345–352.
- Kaplan, G., Gültekin, A.B., 2010. Yapı Sektöründe Uçucu Kül Kullanımının Çevresel ve Toplumsal Etkileri Açısından İncelenmesi. *International Sustainable Buildings Symposium (ISBS)*, Ankara.
- Karaca, B., Karaboğa, D.V., 2017. XVI. Yüzyılda Diyarbakır Eyaletinde Sınai Bitkileri Üretimi. *Alnteri Dergisi Vol 1 (1)*, 17-33.



- Keskin, N., Çimen, Ö., 1997. Killi zeminlerin mühendislik özelliklerinin İyileştirilmesinde ponza kullanımının araştırılması. I. Isparta Ponza Sempozyumu, Isparta.
- Keskin, S.N., Sungur, A., Akan, R., Uzundurukan, S., 2017. İnce Daneli Zeminlerde Katkı Maddelerinin ve Donma Çözülme Çevrimin Serbest Basınç Dayanımına Etkisi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, Vol 5(3), 473 – 478, Isparta
- Kızılcıkelik, M.M, 2010., Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Kireç İle Stabilizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Kim, J. H., Cho, S. D., Jang, Y. S., and Kim, S. S., 2007. Eco-Materials Processing and Design. VIII - ISEPD-8, Proceedings of the 8th International Symposium on Eco-Materials Processing and Design, v 544-545, p 629-632.
- Kumar, A., Walia, B.S., and Mohan, J., 2006. Compressive Strength of Fiber Reinforced Highly Compressible Clay. Construction and Building Materials, Vol 20 (10) 1063-1068.
- Kurt Albayrak, Z.N., 2014. Laboratuvarında Geliştirilen Nanokil-Kompozitlerin Bazı Geoteknik Özelliklerinin Deneysel Olarak Araştırılması. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Li, Z., Wang, X., Wang, L., 2006. Properties of hemp fibre reinforced concrete composites. Composites: Part A 37, 497–505.
- Maher, M.H., Ho, Y.C. , 1994. Mechanical-properties of kaolinite fiber soil composite. Journal of Geotechnical Engineering, Vol 120 (8),1381-1393.
- Malayoğlu, U., Akar, A., 1995. Killerin Sınıflandırılmasında ve Kullanım Alanlarının Saptanmasında Aranılan Kriterlerin İrdelenmesi. 1.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, Köse ve Kızıl, Ed., İzmir, 125-133.
- Mirzababaei, M., Arulrajah, A., Haque, A., Nimbalkar, S., Mohajerani, A., 2018. Effect of fiber reinforcement on shear strength and void ratio of soft clay. Geosynthetics International, Technical Note, Australia.
- Mitchell, J.K., Soga, K., 2005. Fundamentals of Soil Behavior. John Wiley&Sons, Inc., Third Edition, 558 p, New Jersey.
- Mohamed, A.E.M., 2013. Improvement Of Swelling Clay Properties Using Hay Fibers. Construction and Building Materials, Vol 38, 242-247.
- Naeini, S.A. Sadjadi, S.M., 2008. Effect of Waste Polymer Materials on Shear Strength of Unsaturated Clays. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, V13 K, p 10-12.
- Ontürk, K., Fırat, S., 2014. Uçucu Kül ve Mermer Tozu Kullanarak Yol Altyapısının İyileştirilmesi. Politeknik Dergisi, 35-42.
- Orhan, M., Özer, M., Işık, N.S., 2006. Doğal Zeminlerin Likit Limitinin Belirlenmesinde Casagrande ve Koni Batma Yöntemlerinin Karşılaştırılması. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Vol 21 (4), 711-720.
- Orhan, H., 2010. Yeniçağa Kilinin Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesinde Kireç ve Uçucu Külün Kullanılabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1-93, Ankara.
- Önalp, A., 1983. İnşaat Mühendisleri Geoteknik Bilgisi. Cilt 1,2 KTÜ Yayını, Trabzon.
- Özdemir, O. 2001. Tunçbilek termik santrali uçucu küllerinin karakterizasyonu ve yan ürünlerinin eldesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Özdemir, M.A., 2011. Uçucu kül katkısı ile yumuşak bir zeminin taşıma kapasitesinin iyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Özgan, E., Ertürk, S., Serin, S., 2012. Donma ve Çözülmenin Kohezyonlu Zeminlerin Fiziksel Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi Vol 1, 7-16.
- Özkan, S., Babaarslan, O., 2010. İplik Kesitindeki Filament Sayısının Filament Ve Tekstüre İpliklerin Özellikleri Üzerindeki Etkisi. Tekstil ve Konfeksiyon, 1:17.
- Özkul, Z.H., Baykal, G., 2006. Shear Strength of Clay With Rubber Fiber Inclusions. Geosynthetics International, V13 (5), 173-180.
- Palalı, A., 2006. Handere Kilinde Su İçeriği Değişimi ve Kompaksiyon Enerjisinin Mukavemete Olan Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Pate, D.W., 1994. Chemical ecology of Cannabis. Journal of the International Hemp Association, 2: 29, 32-37.
- Pickering, K.L., Aruan Efendy, M.G., Le, T.M., 2016. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. Composites: Part A 83, 98-111.
- Puppala, A. J., Musenda, C., 2000. Effects of Fiber Reinforcement on Strength and Volume Change in Expansive Soils. Transportation Research Record, Vol 1736, 134-140.
- Rafalko, S.D., Brandon, T. L. , Filz, G. M. and Mitchell, J. K., 2007. Fiber Reinforcement for Rapid Stabilization of Soft Clay Soils. Transportation Research Record, n 2026, p 21-29.
- Resmi Gazete, 2016. Kenevir Yetiştiriciliği ve Kontrolü Hakkında Yönetmelik, s, 29842.
- Sera, E.E. , Austriaco, R., Pama, L., 1990. Natural Fibers as Reinforcement. R.P Journal of Ferrocement, Vol 20 (2), 109-124.
- Sharma, V., Vinayak, H.K., Marhava, B.K., 2015. Enhancing compressive strength of soil using natural fibers. Construction and Building Materials, Vol 93, 243-249, NIT Hamirpur, India.
- Tan, Ö., Olgun, M., Erkan, İ.H., 2012. Stabilize Edilmiş Şişen Zeminlerin Donma-Çözülme Etkisi Altındaki Davranışları. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 14. Ulusal Kongresi, 4-5 Ekim, SDÜ, Isparta.
- Tangüler, M, Gürsel, P., Meral, Ç., 2015. Türkiye’de Uçucu Küllü Betonlar İçin Yaşam Döngüsü Analizi. 9. Ulusal Beton Kongresi.
- TEİAŞ, Türkiye Termik Santrallerinde Tüketilen Kömür Miktarı (2010-2015) <https://www.teias.gov.tr/tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri/2015> (21.05.2019)
- Toros, H., 1987. Afşin Elbistan Termik Santrali Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi Olarak Kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 117 s, İstanbul.
- TS 1900-1, 2006. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri. Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini.
- TS 639, 1975. Uçucu Küller. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 197-1, 2002. Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

- TUİK, 2017. Termik Santral Su, Atıksu ve Atık İstatistikleri, 2016. Türkiye İstatistik Kurumu Haber Bülteni, Sayı: 24873.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A., 2003. Türkiye’de Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri. TÇMB, Ankara.
- Uzuner, B. A., 1998. Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği. Teknik Yayınevi, Ankara.
- Ünver, E., 2015. Problemlı Kil Zeminlerin Uçucu Kül İle İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Vallejo, L. E., Yoo, H, 1995. Reinforcement of fissured clays by short steel fibers. Transportation Research Record, Vol 1474, 108-115.
- Vural, P, 2012. Şişme ve Dispersif Karakteristikteki Kil Zeminlerin Mühendislik Özelliklerine Çimento ve Zeolitin (Doğal Puzolan) Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Yarbaşı, N., 2018. Mermer Tozu ve Atık Lastik ile İyileştirilen Düşük Plastisiteli Killi Zeminlerin Dayanım Özellikleri. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, Vol 4(2), 162-170. Artvin.
- Yıldız, T., Yıldız, C., 2002. Soma Termik Santrali Uçucu Kül ve Polipropilen Atıklarının Yeni Bir Malzeme Üretiminde Değerlendirilmesi. Mühendislik Bilimleri Dergisi, Vol 9(2), 163-169.
- Zaimoğlu, A.Ş., Yetimoğlu, T., Çalik, Y., Akbulut, R.K., 2012. Ayrık Polimer Liflerle Rastgele Donatılı İnce Daneli Zeminlerde Donatı Uzunluğunun Donma Çözölme Davranışına Etkisi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 14. Ulusal Kongresi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Zaimoğlu, A.Ş., Hattatoğlu, F., Akbulut, R.K., 2013. Yüke Maruz İnce Daneli Zeminlerin Donma-çözölme Davranışı. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Vol 19(3), 117-120.
- Zaimoğlu, A.Ş., Işık, F., Arasan, S., Akbulut, R.K., 2015. Kil Zeminlerin İyileştirilmesinde Atık Doğal Liflerin Kullanılabilirliği. 6.Geoteknik Sempozyomu, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Zaimoğlu, A.Ş., Akbulut, R.K., 2019. Effect of Aspect Ratio on The freezing Thawing of a CH Clay. Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Bilim ve Teknik Dergisi, Vol 7, 66-74.
- Zha, F., Liu, S., Du, Y., Cui, K., 2008. Behavior of expansive soils stabilized with fly ash. Natural Hazards 47(3):509-523.

## ÖZGEÇMİŞ

Erzurum’da doğdu. İlkokulu Oltu 25 Mart İlkokulu’nda, ortaokul ve liseyi Oltu Anadolu Lisesi’nde okudu. Lisans eğitimine 2003 yılında Erciyes Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümünde başladı. Eğitimini yarıda bırakıp 2007 yılında Tren Teşkil Memuru olarak TCDD’de göreve başladı. 2011 yılında Anadolu Üniversitesi İşletme (Açıköğretim), 2016 yılında ise Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2016 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans öğrenimine başladı.

2019 yılından bu yana Erzurum Valiliği Yatırım İzleme ve Koordinasyon Başkanlığında İnşaat Mühendisi olarak çalışmaktadır.