

Problemlili Kil Zeminlerin Uçucu Kül İle İyileştirilmesi

Emin Ünver

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül 2015

Stabilization of Problematic Clay Soils with Fly Ash

Emin Ünver

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Civil Engineering

September 2015

Problemleri Kil Zeminlerin Uçucu Kül İle İyileştirilmesi

Emin Ünver

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Geoteknik Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Hasan SAVAŞ

Eylül 2015

## ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Emin Ünver'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Problemlili Kil Zeminlerin Uçucu Kül İle İyileştirilmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğın ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

**Danışman** : Yrd. Doç. Dr. Hasan SAVAŞ

**İkinci Danışman** : -

**Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:**

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Hasan SAVAŞ

**Üye** : Doç. Dr. Volkan OKUR

**Üye** : Doç. Dr. Murat TÜRKÖZ

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Evren SEYREK

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Kamil Bekir AFACAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN  
Enstitü Müdürü

## ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Yrd. Doç. Dr. Hasan SAVAŞ danışmanlığında hazırlamış olduğum “ Problemlili Kil Zeminlerin Uçucu Kül İle İyileştirilmesi” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 20/08/2015

Emin Ünver

İmza

## ÖZET

Problemlı zeminler geoteknik mühendisliğinde önemli konulardan birisidir. Sıvılaşma potansiyeline, aşırı oturma problemine, yetersiz taşıma gücüne, şev duyarsızlığına, şişme ve dispersibilite potansiyeline sahip zeminler problemlı zeminler olarak isimlendirilmektedir. Bu tür zeminlerin iyileştirilmesi için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Kimyasal stabilizasyon gerek ucuz gerekse hızlı olması dolayısıyla sıklıkla tercih edilmektedir. Son yıllarda çevresel etkiler nedeniyle atık malzemeler kimyasal katkı olarak kullanılmaktadır. Mermer tozu, lastik kırıntısı ve uçucu kül en çok tercih edilen atık malzemeler arasındadır. Bu alışma kapsamında düşük plastisiteli killi bir zemin Soma ve Çatalağzı uçucu külü ile stabilize edilmiştir. Bu amaçla katkısız ve %5,10, 15, 20, 25, 30 uçucu kül katkı seviyelerindeki numuneler üzerinde serbest basınç, şişme ve dispersibilite deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda kil zeminin dayanım, şişme ve dispersibilite özelliklerinin iyileştiği görülmüştür. Özellikle Soma uçucu külü kil zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde Çatalağzı uçucu külüne oranla daha etkilidir.

Anahtar kelimeler: Dispersif zemin, İyileştirme, Kil, şişme, Uucu kl

## SUMMARY

Problematic soils are important subjects of geotechnical engineering. Soils which have liquefaction potential, excessive settlement problem, insufficient bearing strength, slope insensitivity, swelling and dispersibility potential are named as problematic soils. Different methods are used for improvement of these soils. Chemical stabilization is preferred frequently because it is cheap and fast. In last years, waste materials have been used as chemical additives due to environmental effects. Marble powder, tire buffing and fly ash are the most preferred waste materials. In this study, clay soil with low plasticity has been stabilized with Soma and Çatalağzı fly ash. For this purpose, unconfined shear strength, swelling and dispersibility test have been performed for on samples without the additive and with fly ash additive (%5,10,15,20,25 and 30). As a result of experiments, it is shown that strength, swelling and dispersibility properties of clay soil are improved. Especially, Soma fly ash is more effective for improving engineering properties of clay soil compared to Çatalağzı fly ash.

Keywords: Dispersive soil, Stabilization, Clay, Swelling, Fly ash.

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında beni yönlendiren, yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Hasan SAVAŞ'a sonsuz Őukran, teşekkür ve en derin saygılarımı sunarım. Yapmış oldukları yardımlardan dolayı Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Murat TÜRKÖZ'e, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Evren SEYREK'e, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü teknikeri Eyüp ERTAŐ'a teşekkür ederim. Yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında bana göstermiş oldukları anlayıŐ, destek ve sabırdan dolayı değerli aileme teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>vi</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>vii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>viii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>xvii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>xviii</b>
<b>1.GİRİŞ VE AMAÇ</b> .....	<b>1</b>
<b>2.KİL MİNERALLERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ</b> .....	<b>4</b>
2.1. Kil Zeminlerin Mineral Yapısı .....	5
2.2 Kil Mineral Tipleri .....	8
2.2.1. Kaolinit grubu .....	9
2.2.2. Montmorillonit grubu .....	11
2.2.3. İllit grubu .....	13
2.2.4. Klorit grubu .....	14
2.3. Killerin Fiziko-Kimyasal Özellikleri .....	14
2.3.1 Spesifik yüzey alanı .....	14
2.3.2 Elektriksel iletkenlik .....	14
2.3.3. pH değeri .....	15
2.3.4. Katyon değişim kapasitesi (KDK) .....	15
2.4. Kil Minerallerinin Tanımlanması .....	17
2.5. Kil Minerallerinin Sınıflandırılması .....	20
<b>3.PROBLEMLİ ZEMİNLERİN TANIMLANMASI VE SINIFLANDIRILMASI</b> ....	<b>24</b>
3.1. Şişen Zeminlerin Tanımlanması .....	24
3.1.1. Tanımlama deneyleri .....	28
<u>3.1.1.1. Mineralojik yöntemler</u> .....	29
<u>3.1.1.2. Katyon değişim kapasitesi</u> .....	29
<u>3.1.1.3. Serbest şişme</u> .....	31

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.1.1.4. Potansiyel hacim değişimi.....	31
3.1.1.5. Şişme indeksi deneyi .....	32
3.1.1.6. Kaliforniya taşıma oranı.....	33
3.1.1.7. Doğrusal genişleyebilirlik katsayısı (COLE).....	33
3.1.2. Şişen zeminlerin sınıflandırılması.....	34
3.1.2.1. Zemin sınıflandırma yöntemlerine göre sınıflandırma.....	35
3.1.2.2. Mühendislik indeks özelliklerine göre sınıflandırma.....	35
3.1.3. Şişen zeminlere etki eden faktörler .....	38
3.2. Dispersif Zeminler .....	40
3.2.1. Dispersif killerin tanımlanması ve sınıflandırılması .....	43
3.2.1.1. Fiziksel deneyler.....	43
3.2.1.2. Kimyasal deneyler.....	44
3.2.1.3 Deneylerin değerlendirilmesi .....	46
3.2.2. Dispersibilitiyi etkileyen faktörler.....	48
3.2.2.1. Kıvam karakteristikleri ve kil muhtevası .....	48
3.2.2.2. Kilin mineralojik yapısı.....	49
3.2.2.3. Erozyona neden olan sudaki çözülmüş tuzlar .....	50
3.2.2.4. Sıklık ve su muhtevası.....	50
<b>4.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....</b>	<b>52</b>
4.1. Dispersif Zeminlerin Stabilizasyonu .....	53
4.2.Şişen Zeminlerin Stabilizasyonu .....	55
4.2.1. Kimyasal katkı maddeleri .....	55
4.2.1.1. Kireç stabilizasyonu .....	56
4.2.1.2. Çimento stabilizasyonu .....	56
4.2.1.3. Uçucu kül stabilizasyonu.....	57
4.2.1.4 Diğer katkılarla stabilizasyon.....	59
4.2.2. Ön ıslatma .....	65
4.2.3. Sıkıştırma kontrolü ile zemin iyileştirmesi .....	65

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<b><u>Sayfa</u></b>
4.2.3.1. <u>Kaldırıp yeniden yerleştirme</u> .....	65
4.2.3.2. <u>Örseleyip yeniden sıkıştırma</u> .....	66
4.2.4. Sürsaj yüklemesi .....	66
4.2.5. Isı ile iyileştirme.....	66
4.2.6. Elektrokimyasal yöntemlerle zemin iyileştirmesi .....	66
4.2.7. Su muhtevasının korunması ile zemin iyileştirme .....	67
4.3. Uçucu Kül .....	67
4.3.1. Uçucu küllerin ASTM C 618'e göre sınıflandırılması.....	69
4.3.1.1. <u>F sınıfı uçucu kül</u> .....	70
4.3.1.2 <u>C sınıfı uçucu kül</u> .....	70
4.3.2. Uçucu küllerin Avrupa çimento standardı ENV 197-1'e göre sınıflandırılması .....	70
4.3.3. Uçucu küllerin elde edildikleri kömürün tipine göre sınıflanması.....	71
4.3.4. Uçucu küllerin kimyasal yapılarına göre sınıflandırılmaları .....	71
4.3.5. Uçucu küllerin özellikleri.....	72
4.3.5.1. <u>Uçucu küllerin fiziksel özellikleri</u> .....	72
4.3.5.2. <u>Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları</u> .....	72
4.3.5.3. <u>Uçucu küllerin mineralojik yapıları</u> .....	73
4.3.6. Deneysel çalışmada kullanılan uçucu küllerin özellikleri.....	74
4.3.6.1 <u>Çatalağzı Termik Santrali uçucu külü</u> .....	74
4.3.6.2 <u>Soma Termik Santrali uçucu külü</u> .....	78
4.3.7. Uçucu küllerin inşaat mühendisliğinde kullanımı .....	82
<b>5.MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>	<b>86</b>
5.1. Materyal .....	86
5.2. Yöntem.....	91
5.2.1. Elek analizi.....	91
5.2.2. Kıvam limitleri .....	91
5.2.2.1. <u>Likit limit deneyi</u> .....	91
5.2.2.2. <u>Plastik limit deneyi</u> .....	92

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.2.3. Özgül gravite deneyi .....	92
5.2.4. Standart Proctor kompaksiyon deneyi .....	94
5.2.5. Şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleri.....	94
<u>5.2.5.1. Şişme yüzdesi</u> .....	94
<u>5.2.5.2. Şişme basıncı</u> .....	94
5.2.6. Dispersibilite deneyleri .....	95
<u>5.2.6.1. Dağılma deneyi</u> .....	95
<u>5.2.6.2. İğne deliği deneyi</u> .....	96
5.2.7. Serbest basınç deneyi .....	98
<b>6.BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>100</b>
6.1. Şişme Deney Sonuçları.....	100
6.1.1. Şişme yüzdesi deney sonuçları.....	102
6.1.2. Şişme basıncı deney sonuçları .....	105
6.2. Dispersibilite Deney Sonuçları .....	109
6.2.1. Dağılma deney sonuçları.....	109
6.2.2. İğne deliği deney sonuçları .....	111
6.3. Serbest Basınç Deney Sonuçları .....	112
<b>7.SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>116</b>
<b>KAYNAKLAR DİZİNİ.....</b>	<b>118</b>
<b>EK AÇIKLAMALAR .....</b>	<b>130</b>
<b>Ek Açıklamalar-A: Numunelerin Dağılma Deneyi Sonuçları</b>	
<b>Ek Açıklamalar-B: Numunelerin İğne Deliği Deney Sonuçları</b>	

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Tetrahedron tabakası a) tetrahedron yapıtaşı b) silika tabakası c) silika tabakasının temsili gösterimi .....	5
2.2. Oktahedron tabakası a) okta hedron yapıtaşı b) alümina tabakası c) alümina tabakasının temsili gösterimi .....	6
2.3. Kaolinit kil mineralinin atomik yapısı ve şematik gösterimi .....	10
2.4. Kaolinit kilinin elektron mikroskop fotoğrafı .....	10
2.5. Montmorilonit kil mineralinin yapısı ve şematik gösterimi .....	11
2.6. Montmorillonitin elektron mikroskop fotoğrafı .....	12
2.7. İllit kil mineralinin atomik yapısı ve şematik gösterimi .....	13
2.8. Kil-elektrolit sistemi içinde anyon ve katyonların dağılımı .....	17
2.9. Casagrande'nin plastite kartında yaygın kil minerallerinin lokasyonları .....	18
3.1. Atterberg limitleri ve zemin kıvamı arasındaki ilişki .....	28
3.2. Potansiyel hacim değişikliğine bağlı değerlendirme .....	32
3.3. Kil oranı-Aktivite değerlerine bağlı sınıflandırma .....	37
3.4. Dispersiyon oluşumuna sodyum etkisinin şematik gösterimi .....	41
3.5. Kalsiyum katyonunun topaklanmış yapı oluşumuna etkisi .....	42
3.6. Kil-su sisteminde fiziko-kimyasal kuvvetler .....	42
3.7 Dispersibilite ve boşluk suyundaki çözünmüş tuzlar arasındaki ilişki .....	46
3.8. Çifte hidrometre deney sonuçlarına bağlı dispersiyon yüzdesi .....	47
3.9. İğne deliği deney sonuçlarına bağlı nicel değerlendirme yöntemi .....	48
4.1. Killi bir zeminde kireç stabilizasyonu sonucu meydana gelen geoteknik değişimler ..	64
4.2. Uçucu Kül .....	68
4.3 Uçucu külün elektron mikroskobu görüntüsü .....	69
4.4 Çatalağzı uçucu külünün mineralojik bileşimine ait X-ışınları difraktogramı .....	76
4.5. Çatalağzı uçucu külünün yüzey yapısına ait fotoğraflar .....	77
4.6. Çatalağzı uçucu külünün mikroyapısı .....	78
4.7. Soma uçucu külünün mineralojik bileşimine ait X-ışınları difraktogramı .....	80
4.8. Soma uçucu külünün mikroyapısına ait fotoğraflar .....	81

## ŞEKİLLER DİZİNİ(devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.9. Soma uçucu külündeki kristaller .....	82
4.10. İngiltere'deki termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin kullanım alanları.....	83
5.1. Numuneye ait tane dağılımı eğrileri .....	88
5.2. Afyon kilinin plastisite kartındaki yerleri.....	88
5.3. Afyon kilinin değişen oranlarda Çatalağzı uçucu külü katkılı kompaksiyon grafikleri .....	88
5.4. Afyon kilinin değişen oranlarda Soma uçucu külü katkılı kompaksiyon grafikleri.....	95
5.5. Özgül ağırlık deneyinde vakum uygulaması .....	93
5.6. İğne deliği deneyi numune delme makinesi .....	96
5.7. İğne deliği deney düzeneği .....	97
5.8. İğne deliği deneyinde kullanılan tasarım kartı .....	97
5.9. Serbest basınç deneyi ve sonuçları.....	99
5.10. Serbest basınç deney sonuçlarını gösteren Mohr dairesi ve mukavemet zarfı .....	99
5.11. Serbest basınç deney sistemi .....	99
6.1. Numunenin dönüştürülmüş plastisite kartındaki yerleri.....	101
6.2. Numunenin şişme potansiyeli sınıflama kartındaki yerleri .....	101
6.3. Afyon kili + Çatalağzı uçucu külü için şişme yüzdesi zaman ilişkisi .....	102
6.4. Afyon kiline ait değişen Çatalağzı uçucu külü katkısı oranlarına göre şişme yüzdesi değişimi .....	103
6.5. Afyon kili + Soma uçucu külü için şişme yüzdesi zaman ilişkisi .....	104
6.6. Afyon kiline ait değişen Soma uçucu külü katkısı oranlarına göre şişme yüzdesi değişimi .....	104

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.7. Afyon kili + Çatalağzı uçucu külü için şişme basıncı zaman ilişkisi .....	106
6.8. Afyon kiline ait değişen Çatalağzı uçucu külü katkısı oranlarına şişme basıncı değişimi .....	106
6.9. Afyon kili + Soma uçucu külü için şişme basıncı zaman ilişkisi .....	107
6.10. Afyon kiline ait değişen Soma uçucu külü katkısı oranlarına şişme basıncı değişimi .....	108
6.11. Afyon + Çatalağzı uçucu külü dağılma deneyi .....	110
6.12. Afyon + Soma uçucu külü dağılma deneyi .....	110
6.13. Afyon + Çatalağzı uçucu külü için iğne deliği deney sonuçları.....	111
6.14. Afyon + Soma uçucu külü için iğne deliği deney sonuçları.....	112
6.15. Serbest basınç deney sonu görünüm.....	113
6.16. Afyon + Çatalağzı uçucu külü katkılı numunelerin serbest basınç dayanımları .....	113
6.17. Afyon + Soma uçucu külü katkılı numunelerin serbest basınç dayanımları .....	114
6.18. Afyon kiline ait farklı katkılardaki serbest basınç dayanımları.....	115

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Bazı kil minerallerinin özellikleri.....	8
2.2. Kil minerallerinin sınıflandırılması.....	9
2.3. Kil Minerallerinin (ağırlığa göre) kimyasal bileşimi (%).....	21
2.4. Kil minerallerinin sınıflandırılması.....	22
2.5. Kil Minerallerinin sınıflandırılması.....	23
3.1. Şişen zeminleri belirlemek için yapılan laboratuvar deneyleri.....	26
3.2. Şişen zeminlerin tanımlanmasında kullanılan laboratuvar deneyleri.....	27
3.3. Çeşitli kil mineralleri için katyon değiştirme kapasitesi değerleri.....	30
3.4. Şişme indeksi değerlerine göre zeminlerin şişme potansiyelleri.....	33
3.5. Şişme-büzülme potansiyelinin doğrusal genişleyebilirlik katsayısı ve doğrusal genişleyebilirlik yüzdesine bağlı olarak sınıflandırılması.....	34
3.6. Kolloid içeriği, plastisite indisi, büzülme limiti değerlerine göre şişen zeminlerin sınıflandırılması.....	36
3.7. Rötire limiti veya lineer rötreye bağlı şişen zemin sınıflandırması.....	36
3.8. 200 No'lu elekten geçen zemin yüzdesi, likit limit ve penetrasyon direncine bağlı şişen zemin sınıflandırması.....	36
3.9. Plastisite indisine bağlı şişen zemin sınıflandırması.....	37
3.10. Şişmeyi etkileyen faktörler.....	38
3.11. Deneylerin genel karşılaştırılması.....	47
4.1. Türkiye'deki kömürle çalışan termik santraller.....	68
4.2. Türkiye'deki bazı uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları.....	74
4.3. Çatalağzı uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları.....	75
4.4. Çatalağzı uçucu külünün kimyasal analiz sonuçlarının değerlendirilmesi.....	76
4.5. Soma uçucu külünün ortalama kimyasal analiz sonuçlarının değerlendirilmesi.....	79
5.1. Deneysel çalışma programı.....	87
5.2. Numunenin tanımlama deney sonuçları.....	87
5.3. Afyon kili + Soma uçucu külü katkılı numunelerin kompaksiyon karakteristikleri ....	89



**ÇİZELGELER DİZİNİ(devam)**

<b><u>Cizelge</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
5.4. Afyon kili + Çatalağzı uçucu külü katkılı numunelerin kompaksiyon karakteristikleri .....	89
6.1. Afyon kiline ait değişen Çatalağzı uçucu külü katkı oranlarına göre şişme yüzdesi deney sonuçları .....	103
6.2. Afyon kiline ait değişen Soma uçucu külü katkı oranlarına göre şişme yüzdesi deney sonuçları .....	105
6.3. Afyon kiline ait değişen Çatalağzı uçucu külü katkı oranlarına göre şişme basıncı deney sonuçları .....	107
6.4. Afyon kiline ait değişen Soma uçucu külü katkı oranlarına göre şişme basıncı deney sonuçları .....	108
6.5. Katkısız ve katkılı numuneler üzerinde yapılan dispersibilite deney sonuçları .....	112
6.6. Afyon + Çatalağzı uçucu külü katkılı numunelerin serbest basınç değerleri ve eksenel deformasyonları .....	114
6.7. Afyon + Soma uçucu külü katkılı numunelerin serbest basınç değerleri ve eksenel deformasyonları .....	115

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ****Simgeler**

Å

**Açıklama**

Angström

**Kısaltmalar**

ÇUK

DTA

DY

ESP

KDK

SAR

SD

SUK

TDS

USBR

USCS

XRD

**Açıklama**

Çatalağzı Termik Santrali uçucu külü

Diferansiyel termik analiz

Dispersiyon yüzdesi

Değişebilir sodyum yüzdesi

Kation değişim kapasitesi

Sodyum adsorpsiyonu oranı

Sodyum yüzdesi

Soma Termik Santrali uçucu külü

Toplam çözülmüş tuzlar

A.B.D Su İşleri Teşkilatı

Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi

X Işını Kırınımı

## 1.GİRİŞ VE AMAÇ

Problemlı zeminler olarak tanımlanan dispersif ve şişen zeminler bu özellikleri nedeni ile birçok mühendislik yapısında ciddi problemlere neden olmaktadır. Toprak yapılarında meydana gelen içsel erozyonun nedeni olarak dispersif zeminler gösterilirken, hafif yapılarında oluşan problemlerin ana kaynağı olarak da şişen zeminler gösterilmektedir.

Suya doygun olmayan bazı kil zeminlerin su ile etkileşimde bulunarak bünyelerine su alması ve buna bağılı olarak gelişen hacim artışının karşılanması ile ortaya çıkacak aşırı basınç, kilin “şişme” özelliğı olarak tanımlanmaktadır. Oluşan bu basınçlar; temel sisteminde veya döşeme elemanında mimari ve hatta yapısal hasarlar oluşturabilmektedir. Zati ağırlığı oldukça düşük olan kaldırımlarda, karayollarında ve havaalanı pistlerinde, bu problem sık sık görülmektedir (Türköz, 2006).

Şişen zeminler, inşaat mühendisliğı yapıları için büyük hasara sebep olan önemli bir problemdir. Özellikle, birbirini izleyen yağışlı ve kurak dönemler olarak tanımlanan iklimler ve büyük yüzeysel kil depozitlerine sahip bölgelerde görülür. Önemli hasara neden olan şişen zemin probleminin başlıca sebeplerinden biri de zeminin şişme-büzülme davranışıdır. Şişen zemin problemi; ilk defa 1938 yılında ABD Su İşleri Teşkilatı (USBR) mühendisleri tarafından tanımlanmıştır. Oregon eyaletindeki Owyhee projesinde inşa edilen bir çelik sifon temelinde ters yönde çalışan yer değıştirmelerin oluştuğı belirlenmiş ve bu olaydan sonra "Şişen zemin" problemi tanımlanmıştır (Chen, 1988). Bu tanımdan sonra hasarın nedeni ortaya konularak şişme mekanizması, oturma mekanizmasından farklı olarak tanımlanmıştır. Şişen zemin probleminin yapıların tasarımında önemli bir şekilde dikkate alınması gerektiğı ifade edilerek tasarım kriterleri önerilmiştir. Ancak 1940'lı yıllardan sonra zemin üzerine doğrudan oturan beton yapıların inşasındaki hızlı artış , şişen zeminlerin neden olduğı hasarlarda da artışa sebep olmuştur.

Bu zeminler üzerinde inşa edilen temellerin zeminin ıslanma-kuruma çevrimiyle ilişkili olarak yukarı ve aşağı hareketi, yapıda yorgunluğa ve çatlamaya sebep olmaktadır. Çok sayıda ülkede şişen zemin problemine bağılı olarak ortaya çıkan hasarlarla ilgili çalışmalar yapılmış ve tasarım kriterleri önerilmiştir (Abdullah vd., 1999; Shi vd., 2002).

Zeminlerin şişme büzülme davranışı, özellikle şişen zeminlerde belirgin kuruma çatlaklarının oluşmasına yol açmaktadır. Büzülme neticesinde oluşan çatlaklar özellikle dolgu ve toprak baraj stabilitesi için önemlidir. Ülkemizde inşa edilen hafif su yapılarında oluşan bu tip problemler, genellikle Güneydoğu Anadolu Projesi kapsamında yer alan sulama yapıları inşaatında yaşanmıştır. Özellikle Harran ovası sulama alanlarında inşa edilen kanal yapılarında bu problemle sıkça karşılaşılmış, konuyla ilgili önemli bilgi birikimi elde edilmiştir (Türköz, 2007).

Ülkemizde şişme eğilimi gösteren killi zeminlerin, bilhassa Orta ve Güneydoğu Anadolu ile Batı Anadolu'nun bazı kesimlerinde geniş bir alana yayıldığı dikkate alındığında, hızlı artan kentleşme ve yapılaşmaya bağlı olarak bu tür problemlili zeminlerin daha ayrıntılı incelenmesi gereği doğmaktadır. Bu incelemelerin daha sonradan oluşacak ekonomik kayıpların önüne geçebilmesinde önemli bir etken olacağı unutulmamalıdır (Aydın, 2010).

Su içinde kendiliğinden dağılma eğilimi gösteren bazı zeminler, erozyon ve borulanma açısından “şüpheli zeminler” olarak değerlendirilir. Bu zeminler, zemin mekaniği biliminde “dispersif kil veya dispersif zemin” olarak bilinirler. Yapısal olarak stabil olmayan bu zeminler kolayca dağılabilir ve yüksek derecede erozyona uğrayabilir. Dispersif kil zeminlerin su yapıları, dolgu barajlar ve yol dolguları yapımında kullanımı söz konusu ise, iyi tanımlanmalı ve uygun teknikler ile yapım gerçekleştirilmelidir. Aksi durumda, sonu göçmelere kadar giden ciddi mühendislik problemleri ile karşı karşıya kalınmaktadır. Kilin dispersibilite özelliğinden kaynaklanan erozyon; kilin minerolojisi, kimyasal yapısı ile zemin boşluklarındaki ve erozyona neden olan suyun içindeki çözünmüş tuz muhtevasının niteliğine ve miktarına bağlıdır (Zorluer, 2003).

Durum dispersif zeminler açısından değerlendirildiğinde, özellikle toprak barajlarda oluşan borulanmaya bağlı olarak gelişen göçmelerin ana kaynağı olarak gösterildiğine birçok çalışmada değinilmiştir. Dispersif kilin tanımlanması, ilk olarak 1900'lü yılların başında yapılmıştır. Yaklaşık 60 yıl öncesine kadar zemin araştırmacıları ve ziraat mühendisleri tarafından bu killerin temel yapısı yeterince anlaşılamamıştır. Ancak bu konunun inşaat mühendisliği pratiğinde tanımlanması, 1960'lı yılların ilk bölümünde gerçekleştirilmiştir. Avustralya'da, killerin dispersif özelliğinden kaynaklanan toprak

barajlardaki borulanma göçmelerinde yapılan araştırmalar sonucunda, dispersif kil mekanizması açık olarak ortaya konulmuştur (Sherard vd., 1963). 1970’li yılların başında konu, toprak dolgu barajlar açısından daha detaylı incelenmiş ve killerin bu özelliğinin belirlenmesi doğrultusunda nitel ve nicel sonuçlar veren deneysel yöntemler geliştirilmiştir. Özellikle 1970’li yılların başından itibaren toprak dolgu barajlardaki içsel erozyon ve dispersif yapı üzerinde Prof. J.L. Sherard ve arkadaşları tarafından çalışmalar yapılmıştır (Sherard vd., 1976).

Bu tez kapsamında, düşük plastisiteli kil zeminin mühendislik özelliklerin uçucu kül ile iyileştirilmesi amacıyla iki farklı uçucu kül ile incelemeler yapılmıştır. Elde edilen deneysel veriler kullanılarak, uçucu külün zeminlerin iyileştirilmesi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Araştırma, düşük plastisiteli kil numunesinin iyileştirilmesi yönünde yapılan çalışmaları içermektedir. Bu amaç doğrultusunda tane dağılımı, özgül gravite, kıvam limitleri, kompaksiyon deneyleri, şişme yüzdesi, şişme basıncı ve serbest basınç deneyi ile birlikte dispersibilite özelliklerinin belirlenmesi için de iğne deliği ve dağılma deneyleri yapılmıştır. Yapılan serbest basınç deneyi çerçevesinde; hemen kırım serbest basınç dayanımlarındaki değişimler incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda kullanılan Soma uçucu külünün zeminin şişme, dispersibilite ve dayanım özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Çatalağzı uçucu külünün ise zeminin şişmesinde olumlu bir etkiye sahip olduğu, Soma uçucu külüne oranla zeminin dayanımı üzerinde daha az etkili olduğu, dispersibilitesinde bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür.

## 2.KİL MİNERALLERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Kil; doğal olarak oluşmuş, başlıca ince taneli minerallerden meydana gelen, yeterli miktarda su katılınca genellikle plastikleşen ve kuruma veya pişmeyle sertleşebilen malzemedir (Şengül, 2003). Doğada yaygın olarak bulunan killer, öncelikle tarım sektörünün temel taşı olmakla birlikte, pek çok endüstri dalında hammadde olarak kullanılmaktadır. İnşaat mühendisliğinde killerle temel mühendisliği, yapı malzemesi, baraj inşaatları, her türlü yapıda meydana gelebilecek kazı ve hafriyat çalışmaları gibi çok yaygın bir alanda karşılaşılmaktadır. Killerin doğal oluşum zorluğu nedeniyle sentetik malzemeler kil kapsamı dışında tutulur. Ayrıca çok miktarda organik madde içeren turba, bataklık çamuru ve bazı topraklar da kil kapsamı dışında tutulur. Organik maddeler kil içerisinde bulunabilir (Çetin, 2003).

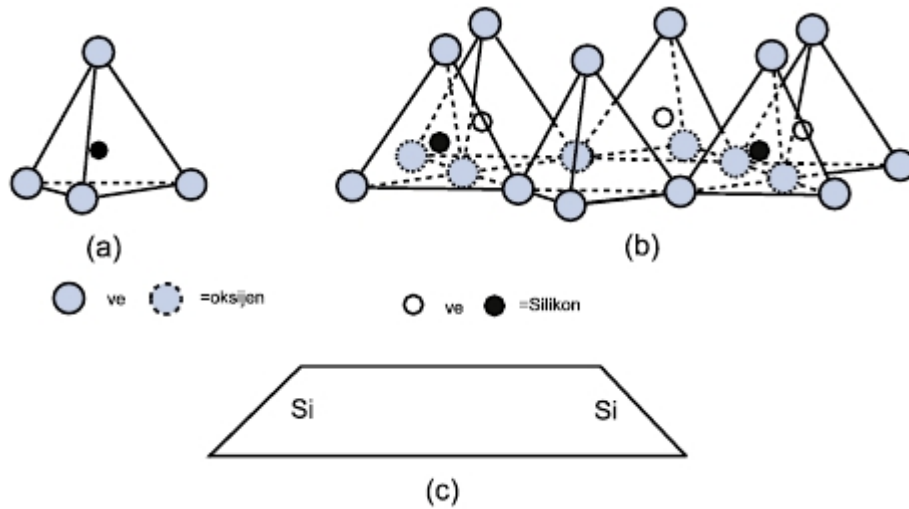
Zemin mekaniğinde zeminler kaba taneli ve ince taneli olmak üzere iki grup altında toplanır. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre 0,075 mm tane çapı sınırı kaba ve ince taneli zeminlerin sınırı olup, 200 No'lu (<0,075 mm) eleğin altına geçen kısım ince taneli zeminler olarak adlandırılmaktadır. İnce taneli zeminler ise kil ve silt birimlerinden oluşmaktadır.

Kil zeminler ince taneli zeminlerdir. Fakat tüm ince taneli zeminler kohezyonlu veya kil olmak durumunda değildir. Siltler hem granüle hem de ince tanelidir. Kil taneciklerinde olduğu gibi münferit silt taneleri de çıplak gözle ayırt edilemezler; fakat, siltler kohezyonlu ve plastik değildirler. Çok ince taneli kohezyonsuz zeminlere bir diğer örnek de kaya unudur. (Şengül, 2003)

Kil mineralleri çok küçük partiküller olup, elektrokimyasal olarak çok aktiftirler. Bir zemin kütlesi içinde az miktarda dahi olsa kil minerallerinin varlığı o kütlenin mühendislik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Kil miktarı arttıkça zeminin davranışı kilin özellikleri tarafından kontrol edilir. Kil içeriği yaklaşık %50 olduğu zaman kum ve silt taneleri aslında bir hamur içinde yüzen taneler gibidirler ve mühendislik davranışı üzerindeki etkileri de çok düşüktür.

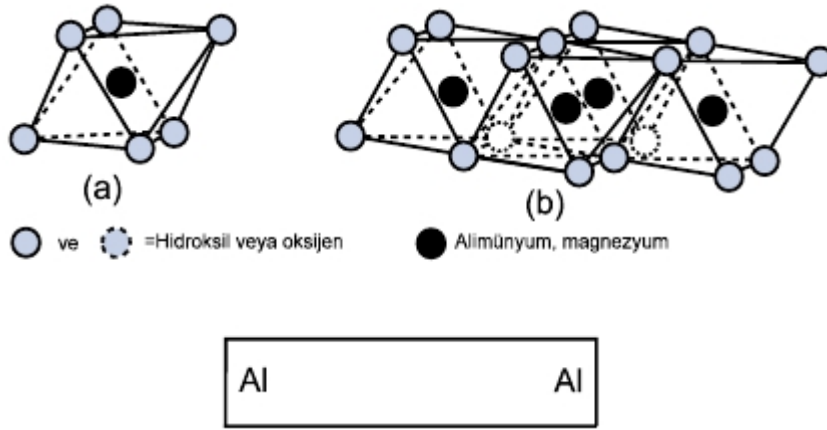
## 2.1. Kil Zeminlerin Mineral Yapısı

Kayaların ayrışması sonucunda oluşan kil mineralleri, çok küçük ve kristalsi maddelerdir. Tüm kil mineralleri, çok küçük boyda olup sadece elektron mikroskobu ile görülebilir. Esas itibariyle kil mineralleri, silika tetrahedron ve alümina oktahedron olmak üzere iki temel kristal yapıdan oluşmuştur. Silika tetrahedron yapısı; merkezinde silisyum iyonu, köşelerinde ise oksijen veya hidroksil iyonları bulunan düzgün dörtyüzlü şeklindedir. Düzgün dörtyüzlülerin tabanları aynı düzlem üzerinde kalmak üzere köşelerinden altılı halkalar vererek birleşmesiyle “tetrahedron tabakası” yada diğer adıyla “silika tabakası” oluşmuştur(Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Tetrahedron tabakası a) tetrahedron yapıtaşı b) silika tabakası c) silika tabakasının temsili gösterimi (Fell vd., 1992)

Alümina veya magnezyum oktahedron yapısı ise, merkezinde alüminyum iyonu, köşelerde oksijen yada hidroksil iyonları bulunan düzgün sekizyüzlü şeklindedir. Düzgün sekizyüzlülerin birer yüzeyleri aynı düzlem üzerinde kalacak şekilde köşelerinden birleşmesiyle “oktahedron tabakası” ya da diğer adıyla “alümina tabakası” oluşmuştur (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Oktahedron tabakası a) okta hedron yapıtaşı b) alümina tabakası c) alümina tabakasının temsili gösterimi (Fell vd., 1992)

Oktahedron levhadaki katyonların yer değiştirmesi ile farklı mineraller ortaya çıkmaktadır. Bu durum, kristal yapının değişmeden, ortamdaki katyonların yer değiştirmesi olup “izomorf yer değiştirme” olarak tanımlanır. Bu yer değiştirme özelliğinden dolayı, mineraller farklı yapıya sahip olup ve farklı isimlerle tanımlanır. Bir oktahedron tabaka içindeki tüm anyonların hidroksilden oluşması ve katyon pozisyonlarının üçte ikisinin alüminyum ile doldurulmasıyla oluşan mineral “gibsit” olarak adlandırılır. Levhadaki alüminyum yerine magnezyum geçerek katyon pozisyonlarını doldurması nedeniyle oluşan mineral “brusit” olarak adlandırılır. Temel levha yapısındaki değişimler, bilinen kil minerallerinden onlarcasını oluşturmaktadır. Tüm kil mineralleri, belirli bir katyonu içeren tetrehedron ve oktahedron tabakaların değişik bağlarla ve farklı metalik iyonlarla birbirine bağlanmasıyla oluşmaktadır (Savaş, 2008).

Kil mineralleri nispeten karışık yapıları kristaller şeklinde olup kristallerin aranjmanına göre gruplandırılırlar ve aynı gruba ait mineraller de aşağı yukarı benzer özelliklerle birbirine bağlı olurlar. Alkali mineraller veya alkali metaller, kil minerallerinin esas bileşeni olarak killerin bileşiminde bulunurlar. Bazı killeri tek bir kil mineralinden ibarettir. Killeri içerisinde kil mineraline ek olarak, kuvars, kalsit, feldspat ve priti gibi kil olmayan yabancı maddelerde bulunabilir. Bazı killeri organik maddeleri ve suda çözünebilir tuzları da içerirler. Killeri oluşturdukları ortamın ısı, basınç değeri ve ortamın asit dengesi meydana gelecek kil minerallerinin cinsini tayin etmektedir. Düşük



ısı ve basınç altında ve asidik ortamda kaolinit tipi mineraller oluşmakta, halbuki alkali iyonu olarak potasyum mevcutsa ve bunun konsantrasyonu belli bir miktarın üzerinde ise montmorillonitin oluşmasına neden olur. 350°C'nin üstündeki sıcaklıklarda ve orta dereceli bir basınç altında kaolinit yerine pyrofilite teşekkül eder. Daha yüksek sıcaklık ve basınçlarda diğer alüminyumlu killere meydana gelir. Killerin kimyasal analizleri nadiren kil minerallerini birbirinden ayırabilmektedir, fakat X ışınları difraksiyonu ve diferansiyel termal analizler gibi yöntemlerle kil mineralleri birbirinden ayırt edilebilirler.

Killer çok nadir olarak saf halde bulunurlar. Diğer yabancı maddelerle karışık killerin fiziksel özellikleri, bu maddelerin etkisi sonucunda daha karmaşık bir hal alır. Fiziko kimyasal özellikler bakımından alkali bazlar, toprak alkalileri ve asitler killerin karakterlerini değiştirirler. Ayrıca killerin morfolojik koloidal karakterlerini de göz önünde bulundurmak gerekir. Kolloidlik karakterleri özellikle montmorillonitlerde ve bentonitlerde bariz olarak görülmektedir. Bentonitler kendi ağırlıklarının 6-7 katı su ile şişerler ve jelliklerini arttırırlar. İlkel ayrışmalar sonucunda koloidal şekiller altında silisyum ve alüminyum serbest kalması mümkün olabilir. Silisyum negatif, alüminyum pozitif bir kolloid meydana getirir. Bunların serbest kalması sonucunda karşılıklı pıhtılaşma oluşur ve pıhtı gitgide yavaş fakat sürekli olarak alüminyum hidrosilikat kristaline dönüşür.

Doğada en çok görülen kil mineralleri 1:1 tipindeki kaolinitler ve halloysit; 2:1 tipindeki montmorillonitler, illit ve vermikülitlerdir. Esasen diğer gruplar da bu minerallerle benzer özellikler vermektedirler. Değişiklik mineral yapısındaki iyon türü ve aradaki su moleküllerinden ileri gitmektedir (Vural, 2012). Çizelge 2.1' de çokça karşılaşılan ve özellikleri birbirinden çok farklı olan dört ana kil türünün ayrıntıları özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Bazı kil minerallerinin özellikleri (Önalp, 1983)

	<i>Montmorilloni</i> <i>t</i>	<i>İllit</i>	<i>Kaolinit</i>
Tane Büyüklüğü	10 A-1	0.1-2	0.1-5
Tane Şekli	Eş boyutlu yaprak	Pul	Altı köşeli pul
Özgül yüzeyi (m <sup>2</sup> /g)	50-800	65-100	10-20
Tane Kalınlığı	10A	30A	0.05-2
Likit Limit	110-710	60-120	30-70
Plastisite İndisi	51-100	34-60	26-38
Şişme-Büzülme Yeteneği	Yüksek	Orta	Düşük
Özgül Ağırlık	2.35-2.70	2.60-3.00	2.60-2.95

## 2.2 Kil Mineral Tipleri

Kil mineralleri çok küçük yapıda olmalarına rağmen kristal özellik gösterirler. Kristal özelliklerine göre kil minerallerini dört grupta toplamak mümkündür.

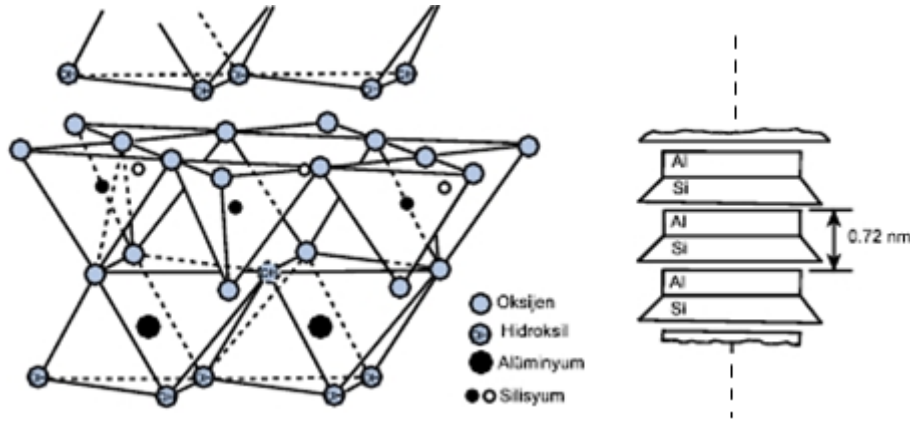
- 1.Kaolinit kil minerali
- 2.Montmorillonit kil minerali
- 3.İllit kil minerali
- 4.Klorit kil minerali

Çizelge 2.2. Kil minerallerinin sınıflandırılması (Konta, 1995).

Grup İsmi	Mineraloji	İdeal Formülü
Kaolinit, Serpantinit	Kaolinit Halloysit	$Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$ $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$
Mika	İllit	$K_{<2}Al_3[(Si_{>6}Al_{<2})O_{20}](OH)_4nH_2O$
Vermikülit	Trioktahedral vermikülit	$(Mg,Fe^{2+})[Si_3Al_8O_{20}](OH)_4nH_2O$
Simektit	Montmorillonit Beidellit Notronit Saponit	$M^{x+y}(Al,Fe^{2+})_{4-y}[(Si_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_4nH_2O$ $M_xAl_4[(Si_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_4nH_2O$ $(M^+xFe^{3+})_{4-y}[(Si_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_4nH_2O$ $(M^+xMg_6)[(Si_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_4nH_2O$
Profilit ve Talk	Profilit Talk	$Al_4[Si_8O_{20}](OH)_4$ $Mg_6[Si_8O_{20}](OH)_4$
Klorit	Donbassit	$Al_4[Si_8O_{20}](OH)_4Al_4(OH)_{12}$
Paligorskit, Sepiyolit	Paligorskit Sepiyolit	$Mg_5[Si_8O_{20}](OH)_2(OH_2)_44H_2O$ $Mg_8[Si_{12}O_{30}](OH)_4(OH_2)_4nH_2O$

### 2.2.1. Kaolinit grubu

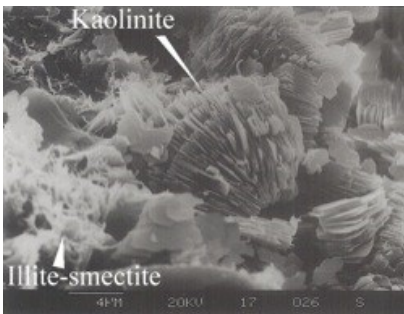
Kaolinit grubu içine pek çok kil minerali girer. Zeminlerin çoğunda bulunur. Bu minerallerin kristalleri levha şeklindedir ve düz kristal üniteleri oluştururlar. Kaolinit tipi kil mineralinin kombine yapısı, başlıca bir oktahedral ile bir tetrahedral tabakanın tekrarlanan katmanlarından oluşur. Her bir tabaka 7.2 Å kalınlığındadır. Her bir tabakanın yanal boyutları 1000-20000 Å ve kalınlığı 100-1000 Å arasındadır Bu katman, iki tabakanın seri tekrarı olmasından dolayı 1:1 kil minerali olarak sembolize edilir (Şekil 2.3). Kaolinit kristali, birkaç katmanın bir araya gelerek oluşturduğu 0.72 nm kalınlığındaki temel bir katmandan oluşmaktadır. Birbirini izleyen bu katmanlar oktahedron tabaka hidroksili ile tetrahedron tabakanın oksijeni arasında oluşan hidrojen bağı ile bir arda tutulurlar. Çok güçlü bir bağ olan hidrojen bağı, hidrasyonu önleyerek, katmanların bir araya gelerek büyük bir kristal yapı oluşturmasını sağlar. Çok miktarda kaolinit içeren kil zeminlerde, dispersif davranış yaygın değildir. Ancak kaolinit içeren granit ayrışmasıyla oluşan zeminlerde dispersif davranış gözlenmiştir (Bell and Walker,2000).



Şekil 2.3. Kaolinit kil mineralinin atomik yapısı ve şematik gösterimi (Fell vd., 1992)

Kristali oluşturan üniteler birbirine oksijen hidroksit bağı ile sıkıca bağlanmışlardır. Bu yüzden kil ıslandığı zaman kristal üniteleri arasındaki mesafe genişlemez. Kristal üniteleri arasına su moleküllerinin ve katyonlarının girmesi çok güçtür. Bu sebeple kaolinitin efektif yüzeyi sadece dış yüzeylerdir. Bunun sonucu olarak kaolinitin katyon değişim kapasitesi diğer kil mineralleri gruplarından daha düşüktür (3-15 meq/100gr).

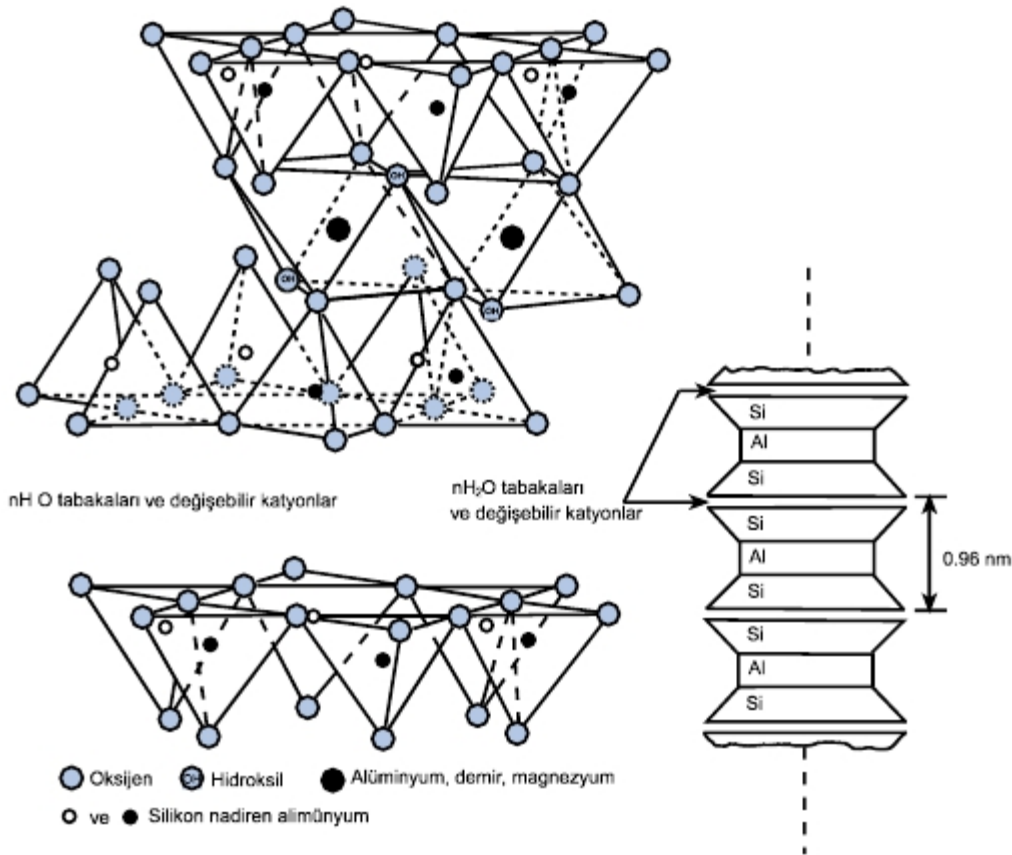
Kaolinit kristalleri montmorillonit kristallerine nazaran daha büyüktür. Diğer silikat kil minerallerinin aksine, kaolinitin plastiklik, kohezyon, büzülme ve şişme özellikleri çok zayıftır. Kaolinitin ıslandığı zaman orta derecede bir plastisiteye sahip olurken, diğer kil minerallerinden daha büyük içsel sürtünmeye sahiptir. Özgül yüzeyleri  $10 \text{ m}^2/\text{gr}$  civarında, özgül ağırlıkları  $2.60\text{-}2.68 \text{ gr/cm}^3$  arasındadır. Kaolinit kilinin formülü  $2\text{H}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$  dir (Çetin, 2003). Kaolinit kiline ait örnek bir elektron mikroskop fotoğrafı Şekil 2.4’de gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Kaolinit kilinin elektron mikroskop fotoğrafı (Anonim, 2012)

### 2.2.2. Montmorillonit grubu

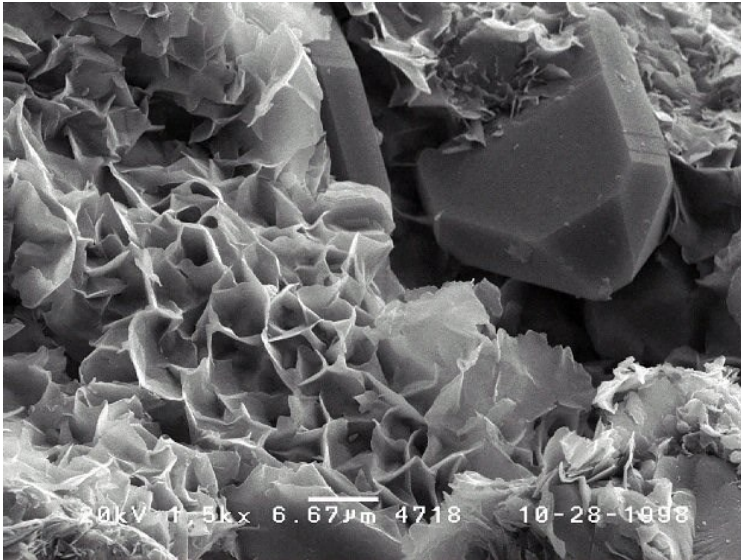
Bu grupta montmorillonitten başka saponit, hektorit, nontronit gibi mineraller de vardır. Montmorillonit kristali alt ve üstten iki silika tabası ile kuşatılmış bir gibsit tabakasından ibaret kristal ünitelerinin üst üste gelmesiyle oluşmuştur. Silis ve gibsit tabakaları oksijen atomuyla birbirine bağlanmıştır. Montmorillonit kristalleri 2:1 tipindedir. Yani iki silika tabakası ve bir gibsit tabakasından oluşan ünitelerden meydana gelmiştir. Şekil 2.5'den de görüldüğü gibi, oktahedron tabaka iki silika tabakası arasına gelerek bir katmanı oluşturmaktadır. Burada silika tabakasındaki tetrahedronların uçları alümina tabakadaki hidroksiller ile birleşmektedir. Kaolinitte olduğu gibi diğer iki yöndeki uzanımı belirsizdir. Silika tabakalarının tepesini bağlayan Vander Walls kuvvetlerinin zayıf olması ve alümina tabakasının da net bir negatif yük boşluğu olmasından dolayı, su ve değişebilir iyonlar katmanlar arasına girerek bunları ayırabilmektedir. Bu nedenle montmorillonit kristali çok küçük olabilir. Aynı zamanda çok yüksek su çekim kuvvetine sahiptir (Holtz and Kovacs, 1981).



Şekil 2.5. Montmorillonit kil mineralinin yapısı ve şematik gösterimi (Fell vd., 1992)

Kristal üniteleri birbirine su ve katyonlar ile bağlanmıştır ve kristal üniteleri arasındaki mesafe kolayca genişleyebilir. Montmorillonit kristallerinin çapları 0.01-2 mikron arasında değişir. Kristal üniteleri arasındaki mesafe kolayca genişleyebildiğinden katyonlar ve su molekülleri üniteler arasına girebilir. Böylece montmorillonit miktarı yüksek olan killer ihtiva ettikleri değişebilir katyonların tabiatına bağlı olarak önemli miktarda şişme veya büzülme gösterebilirler. Montmorillonit kil kristalinin dış yüzeylerine ek olarak geniş iç yüzeyleri mevcuttur. Bu iç yüzeyler de negatif elektrikle yüklüdür. Bu yüzden montmorillonit kili yüksek bir katyon değişim kapasitesine sahiptir. Bu kapasite kaolinitin 10-12 katı, yaklaşık 80-150 meq/100gr'dır. Montmorillonit (Smektit) grubu kil mimerallerinin elektron mikroskop fotoğrafı Şekil 2.6'da gösterilmektedir.

Suyun kristal üniteleri arasına girmesiyle montmorillonit kristalleri büyük oranda genişler ve şişerler. Montmorillonit yaprakları suyla sarılmış olup ıslandıkları zaman yüksek plastisiteye ve düşük içsel sürtünmeye sahiptir. Kurudukları zaman çok miktarda büzülme çatlama meydana gelir. Bu gruptaki killerin özgül yüzeyleri 800 m<sup>2</sup>/gr civarında, özgül ağırlıkları 2.2-2.3 gr/cm<sup>3</sup> arasındadır. Bu gruptaki killerin genel formülü (OH)<sub>4</sub>Si<sub>8</sub>O<sub>2</sub>NH<sub>2</sub>O şeklindedir (Vural, 2012).

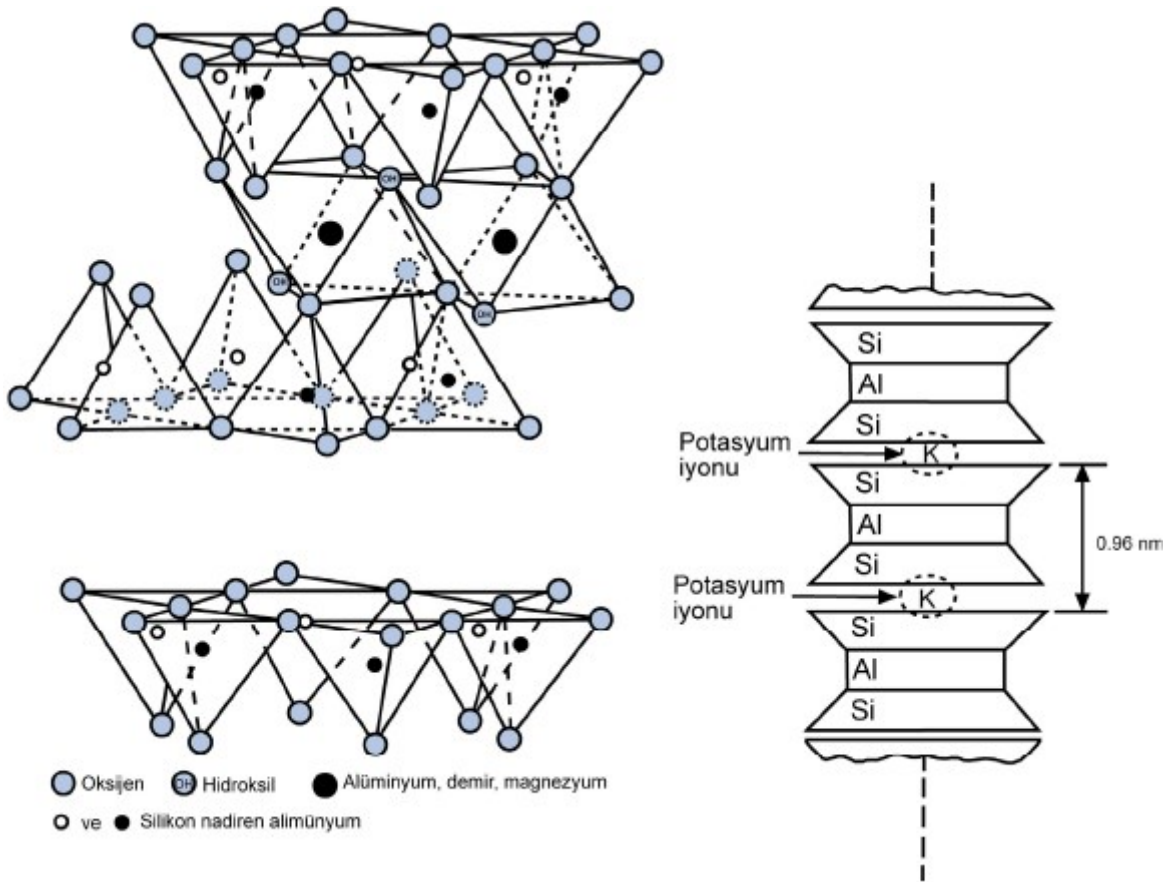


Şekil 2.6. Montmorillonitin elektron mikroskop fotoğrafı (Anonim, 2012)

### 2.2.3. İllit grubu

Genel yapısı bakımından montmorillonitlere benzemekle birlikte tane boyutları daha büyüktür. Kristal yapısı 2:1 şeklindedir. Silis tabakasındaki silisin %15'i amorfus yer değiştirmelerle alüminyumla yer değiştirir.  $K^+$  iyonları açıkta kalan yükleri doldurur. Bu iyonların üniteler arasında yer aldığı ve üniteleri bağladığı kabul edilir. Bu sebeple kristal üniteleri arasındaki mesafeler fazla genişleme göstermezler.

İllit kilinin şişme özelliği montmorillonitten az, içsel sürtünme açısı fazladır. İllit minerallerinin özgül yüzeyleri  $80 \text{ m}^2/\text{gr}$  civarında, özgül ağırlıkları  $2.64\text{-}3.0 \text{ gr/cm}^3$  arasındadır. Bu gruptaki kil minerallerinin formülü  $(\text{OH})_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{-xAl}_x\text{O}_{10}$   $0.5 < x < 0.75$  şeklinde gösterilir. Şekil 2.7'de illit kilinin yapısı şematik olarak gösterilmiştir



Şekil 2.7. İllit kil mineralinin atomik yapısı ve şematik gösterimi (Fell vd., 1992)

#### **2.2.4. Klorit grubu**

Demirli taşlar içinde yeşil renkte ve zengin phyllit'li mineralleri belirtmek için bu terim kullanılmaktadır. Kloritler kristalin şistler, hidrotermal taşlar ve çok sayıda silikatların alterasyonundan meydana gelmektedir. Aktüel sedmanlar, toprak ve sadimenter kayalar içerisinde bulunurlar. Bazı sedimanların başlıca kompozisyonlarını kloritler oluşturur. Klorit daneleri dört katlı (2:1:1) yapısal tabakaya sahiptir. Kloritlerin kristal yapılarını mika ve brusit tabakaları meydana getirir (Yalçın, 1997).

### **2.3. Killerin Fiziko-Kimyasal Özellikleri**

#### **2.3.1 Spesifik yüzey alanı**

Kil danelerinin spesifik yüzey alanı dane davranışına etki eden en önemli özelliklerden biridir. Bunun nedenleri;

- 1- Flokülasyon, dispersiyon ve iyon değişimi spesifik yüzey olayına bağlıdır.
- 2- Spesifik yüzey alanı, kil mineralinin dane çapına ve şekline bağlıdır.

Çift tabaka kalınlığı kil danesinin yüzey alanına direkt olarak bağlıdır. Çift tabaka kalınlığı yüzey alanı arttıkça artmaktadır.

#### **2.3.2 Elektriksel iletkenlik**

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



Bir danede elektriksel yükün değeri doğrudan o danenin yüzey alanı ile ilgilidir. Bu nedenle o danenin davranışına etki eden elektriksel kuvvetlerin kitle kuvvetlerine göre değeri de danelerin birim kütesine düşen yüzey alanı ile ilgilidir. Dane birim kütesine gelen yüzey alanı danelerin davranışına etki eden elektriksel yükün mertebesini gösterir (Vural, 2012)

### 2.3.3. pH değeri

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

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

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

### 2.3.4. Katyon değişim kapasitesi (KDK)

Katyon değişim kapasitesi, izomorfus yer değiştirme kapasitesinin bir ölçüsüdür. İzomorfus yer değiştirme olayı kristal yapıda herhangi bir değişiklik olmadan iyonların yerlerine eşit veya farklı değerli başka iyonlara bırakmasıdır. Zeminde alüminyumun çok olduğu bir yerde bir silikon atomunun yerini bir alüminyum atomunun alması örneğinde olduğu gibi böyle bir durumda silikon +4, alüminyum +3 olduğu için bu değişimle her değişim için bir dengelenmemiş elektrik yükü ortaya çıkar. Böylece iyonlar eş boyutlu olmadıkları için kristal yapıda şekil bozulması olur.

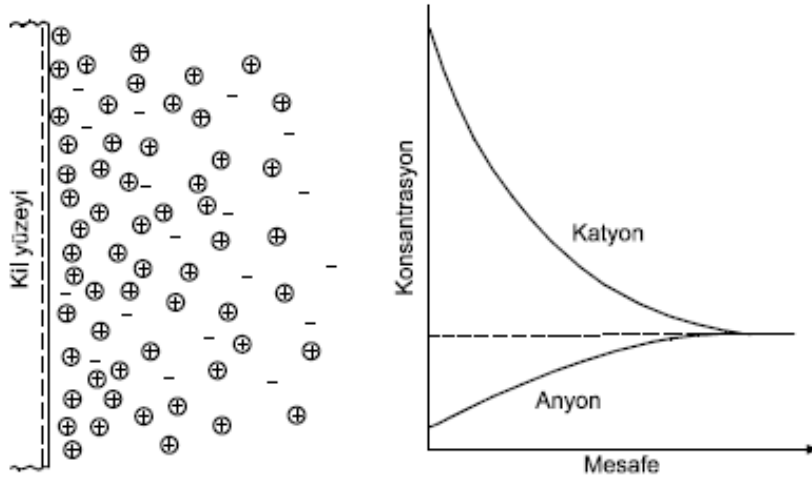
Bunun bir sonucu, kristal yapının büyümesi engellenmektedir. Kaolinit kilinde bu tip değişimler az olup kaolinit kil daneciğinin elektriksel yükü göz önüne alınırsa yaklaşık her 400 silikon iyonundan birisinin bir alüminyum iyonu tarafından tutulduğu söylenebilir.

İzomorfus yer değiştirme kil danelerine negatif yük sağlamaktadır. Bu dengesizliği önlemek için ortamdaki katyonlar kil danelerinin kenarlarına ve bloklar arasına girmektedir. Bu katyonlar birçok durumda yerlerini bir başka katyona da bırakabilmektedir. Yük dengesizliğini giderebilmek için gerekli katyon miktarına katyon değişim kapasitesi denir. Katyon değişim kapasitesi spesifik yüzey alanının artması ile artmaktadır. Katyon değişim hızı kil mineraline, katyonlarına ve anyonlarına bağlıdır (Ergene, 1987).

Killerde katyon değişiminin nedenleri:

- 1) Silika-alümina birimlerinin kenarlarındaki kırık bağlar, katyonlarla dengelenmiş olan doyurulmamış yükler oluşturur. Dane boyutu küçüldükçe kırık bağ sayısı ve buna bağlı olarak da katyon değişim kapasitesi artar. Kaolinit kilinde kırık bağlar katyon değişiminin en önemli nedenidir. Montmorillonit kilinde ise katyon değişiminin %20'si kırık bağlardan, %80'i örgü içi yer değiştirmelerden ileri gelir.
- 2) Örgü içi yer değiştirme ile örgü içinde dengelenmemiş yükler oluşur ve yüklerin çoğu, adsorbe edilmiş katyonlarla dengelenmiştir.

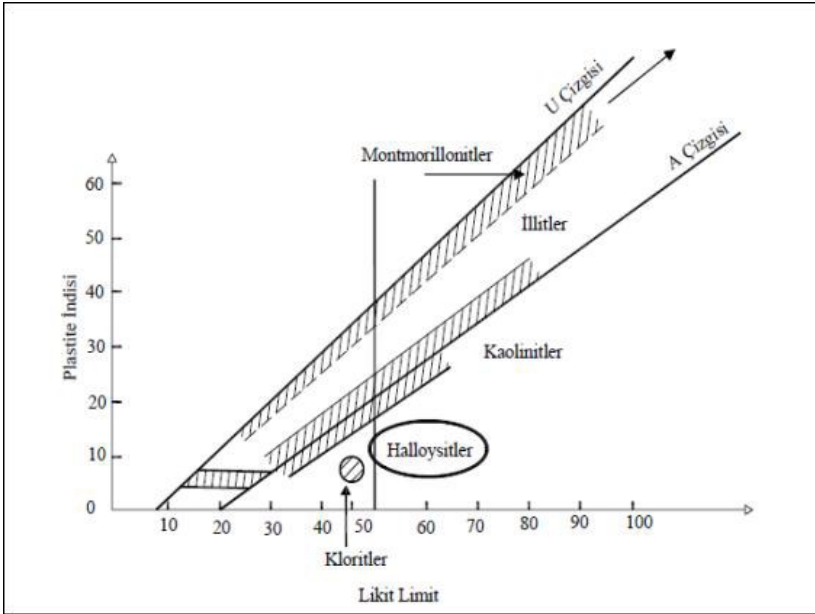
Açıktaki hidrosillerin hidrojeni değişebilir, katyonlarla yer değiştirebilir. Bu etki de kaolinit kilinde önemlidir.



Şekil 2.8. Kil-elektrolit sistemi içinde anyon ve katyonların dağılımı (Mitchell, 1976)

#### 2.4. Kil Minerallerinin Tanımlanması

Kil mineralleri çok küçük olduklarından optik mineraloji teknikleri ile teşhisleri çok zor olup, bunların tanınmasında başka yöntemlere başvurulmaktadır. Kristal yapısı düzenli ve tekrarlı malzemeler X ışınını kırarlar. Farklı kristal yapısına sahip minerallerin X ışını kırınım (Xray diffraction; XRD) paternleri de farklıdır ve bu mineraller ilk olarak paternler sayesinde tanınabilmektedir. Kil minerallerinin karışımından oluşan zeminler, organik madde içeren zeminler, kilden başka mineral içeren zeminler ve karışık tabakalı kil minerali içeren zeminlerde bu açıdan bir takım sorunlar bulunmaktadır. Kil minerallerinin teşhisinde kullanılan bir diğer teknik de diferansiyel termal analizdir (DTA). Bileşimi bilinmeyen bir zemin örneği bir asal kontrol maddesi ile birlikte etüv içerisinde birkaç yüz dereceye kadar ısıtılır ve kil minerallerinin özel yapılarından dolayı bu ısılarda belirli değişiklikler meydana gelir. Bu değişiklikler belirli mineraller için belirli ısılarda meydana gelir ve bu değişikliklere ait kayıtlar bilinen mineraller ile karşılaştırılabilir. Taramalı (scanning) ve yaymalı (transmission) elektron mikroskopisi de bir zemindeki kil minerallerinin tanınmasında kullanılmaktadır. Bu süreç kolay ve/veya nicel değildir. Kil minerallerinin tanınmasında kullanılan diğer bir teknik ise; Casagrande tarafından önerilen Atterberg limitlerinin kullanılmasıdır. Likit limit ve plastisite indisi değerleri kullanılarak kil mineralleri hakkında bilgi edinilebilir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Casagrande'nin plastite kartında yaygın kil minerallerinin lokasyonları (Casagrande, 1932; geliştirilmiş veriler Mitchell; 1976)

Montmorillonit, kristal boylarının çok küçük ve plastisite indisinin yüksek olmasından dolayı ileri derecede aktiftir. Casagrande plastite kartının kullanımı için; PI-LL diyagramında numunenin yerini tespit etmek ve lokasyonunu bilinen minerallerinki ile karşılaştırmak gerekmektedir. Numune plastisite diyagramında A hattının çok üstünde ve U hattına yakın bir yere düşmesi; numune içerisinde montmorillonit gibi çok miktarda aktif mineral bulunduğunu işaret eder. Zemin sınıfı CL çıksa dahi (mesela kumlu kil gibi) U hattına yakın yere düşüyorsa, zeminin kil bileşeni egemen olarak montmorillonitten oluşmaktadır. Yine illit türünde ki killerde bu alana düşerler. Nispeten inaktif olan kaolinitler A hattının hemen altına düşerler. Teknik olarak kil olsalar da ML - MH malzemeleri gibi davranırlar. (Onar, 2010)

Hidratasyon suyu 100-300°C arasında buharlaştırılabilir. Sıcaklık düştüğünde kil yüzeyine yeniden birikir. Kristal kafesindeki OH iyonu halindeki suyun çıkması endotermik bir reaksiyon olup kil minerallerinin tanımlanmasında önemli bir göstergedir. Kristal kafesindeki suyun çıkması mineral yapısını tümüyle değiştirmektedir.

Zemin ve benzeri malzemeler ısıtıldığında içindeki minerallerin özelliklerine bağlı olarak farklı sıcaklıklarda fiziksel ve kimyasal değişimler olmaktadır. Bu reaksiyonlar su kaybetme, kristal oluşumu, faz değişimi ve oksitlenmedir (Lambe vd, 1979; Erdem, 1982; Erguvanlı, 1994). Diferansiyel termik analizde; zeminin oda sıcaklığından 1100°C'nin üzerine yaklaşık 10°C/dak hızla ısıtılması sırasında deney örneğinin gösterdiği tepkime özelliklerinden faydalanarak mineral tanımlanabilmektedir.

Zemindeki ince danelerin minerolojik tanımlaması için en çok kullanılan yöntem X-ışını kırılma deneyidir. Deneyde kristal içinde atomların dizildiği düzlemler arasındaki uzaklıklar ve X-ışınlarının bu düzlemlerden yansıma şiddeti ölçülür. X-ışınları bir maddeye çarptıklarında çeşitli olaylar belirmektedir. Mineral analizi için kullanılan X-ışını difraktometresinde dalga uzunlukları 0.71-1.54-2.29 Å' ayarlanmış ışınlar çok ince öğütülmüş örneğin üzerine yollanır. Kil kristallerinde atomik düzlem aralıkları 1Å' civarında olduğundan ışınlarla uyum sağlandığında düzenli olarak yansıyan ışınlar bir fotoğraf kağıdına yansiyarak yada sayaçta ölçülür. Her kristalin atom yapısı farklı olduğundan emilen ve yansıyan ışın yoğunluğu aynı değildir. Kil minerallerinin tanımlanmasında son derece elverişli olan X-ışınları yönteminde değişik kil minerallerinin tanımlanması için standart kartlar kullanılır (Lambe vd, 1974; Önalp, 1983; Das, 1983; Jumicis, 1984; Rahn, 1986). Kimyasal maddelerle boyama yöntemiyle kil mineralleri benzidin, safranin ve malachite yeşili gibi kimyasal maddelerle boyanır ve aldıkları renklerle birbirinden ayırt edilmeye çalışılır.

Kil mineralleri elektron mikroskopu yardımıyla 20 000'den fazla büyütülerek belirlenebilir. Minerallerin biçimleri, kristal şekilleri ve büyüklükleri mikroskop yardımıyla tespit edilebilmektedir.

Doğada rastlanılan killer yalnız bir çeşit kil mineralinden ibaret değildir. Birkaç çeşidin ve kolloidal maddelerin karışımından oluşmuştur. İçlerinde kuvars, feldispat, limonit, organik maddeler vs. çok zaman görülür.

## 2.5. Kil Minerallerinin Sınıflandırılması

Kil mineralleri bileşim ve sınıflandırma bakımından en karmaşık sanayi mineralleri arasında yer alır. Pek çok araştırmacı tarafından killerin fiziksel, kimyasal, mineralojik özellikleri esas alınarak sınıflama türleri geliştirilmiştir. Killerin sınıflandırılmasına geçmeden önce bilinmesi gereken bazı önemli özellikler vardır. Bunlar iki başlık altında şöyle açıklanabilir;

i. Temel Yapı Elementleri: Killerin iki ayrı tipte tabakanın tekrarlanmasından meydana gelmiş karakteristik bir yapıları vardır. Bunlar genellikle sürekli tabakalardan oluşan tetrahedral ve oktahedral tabakalı sulu alüminyum silikatlarıdır.

ii. Temel Tabaka Tipleri: En basit fillosilikat kil minerali yapısı, tek alüminyum oktahedral tabakası ve 1:1 yapısındaki tek silikat tetrahedral katmanlarının bileşimidir. 2:1 tabaka yapısındaki 2 tetrahedral ve 1 oktahedral tabakaları içeren başka ana tabaka türleri de vardır. (Kyle, 1990)

Killer kristal yapılarına, kimyasal bileşimlerine ve buldukları ortamlarına göre birçok yazar tarafından sınıflandırılmıştır. R.E Grim'in "Clay Mineralogy" isimli kitabında çeşitli kil minerallerinin yapısal özelliklerine dayanan bir sınıflandırma yapmıştır. Nispeten basit olan bu sınıflama aşağıda verilmiştir.

- I. Amorf olanlar:
  - Allofon grubu
- II. Kristalin olanlar:
  - a) İki tabakalı tipler
    - i. Eş boyutlu olanlar (Kaolen grubu, dikit, nakrit)
    - ii. Uzamış olanlar (Halloysit grubu)
  - b) Üç tabakalı tipler
    - i. Genişleyen şebeke yapılı olanlar;
      - Eş boyutlu olanlar (montmorillonit grubu, saponit)
      - Uzamış olanlar (montronit, saponit, hektorit)
    - ii. Genişlemeyen şebeke yapılı olanlar (İllit grubu)

- c) Düzenli karışık tabakalı killler  
Klorit grubu
- d) Zincir yapılı tipler  
Atapuljit, sepiyolit, paligorskit

Kil minerallerinin kimyasal bileşimi oluşturdukları ana materyalin mineralojik bileşimine bağlı olarak değişiklik gösterirler. Kil minerallerinin kimyasal yapısındaki elementler ve bunların oksitlerinin oranları, farklı kil mineralleri arasında belirgin bir ayrımın yapılamayacağını göstermektedir (Demiral, 2013). Kil minerallerinin ağırlıklarına göre kimyasal bileşimleri Çizelge 2.3’ de gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Kil Minerallerinin (ağırlığa göre) kimyasal bileşimi (%) (Scheffer ve Schachtschabel, 1970)

Kil mineralleri	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
Kaolinit	45-48	38-40	-	-	-	-	-	-
Montmorillonit	42-55	0-28	0-30	0-0.5	0-3	0-2.5	0-0.5	0.3
Nontronit								
İllit	50-56	18-31	2-5	0-0.8	0-2	1-4	4-7	0-1
Vermikulit	33-37	7-18	3-12	0-0.6	0-2	20-28	0-2	0-0.4
Klorit	22-35	12-24	0-15	-	0-2	12-34	0-1	0-1

Bu nedenle kil minerallerinin sınıflandırılmasında kristal yapısı (tabakaların dizilişi ve düzeni) temel alınarak sınıflandırma yapılmıştır.

İki tabakalı kil minerallerinin esas kalınlığı 7.2 Å olup bunlardan kaolinit su alınca şişmez, halloysit su alınca 10.1 Å’a kadar şişer. Üç tabakalı kil minerallerinin esas kalınlığı 10 Å olup su aldıklarında kil mineralinin cinsine göre 14-18 Å’ a kadar şişerler. Dört tabakalı kil minerallerinin ise esas kalınlığı 14 Å olup bunlar su alıp şişmezler. Kil minerallerinin sınıflandırılması Çizelge 2.4’ de gösterilmiştir. Kil minerallerinin sınıflandırılması Çizelge 2.5’ de gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. Kil minerallerinin sınıflandırılması (Irmak, 1970 ile Scheffer-Schachtschabel, 1970'den sadeleştirilerek alınmıştır).

Tabaka Sayısı ve Yapısı	Levha Kalınlığı	Kil Minerali Adı	Tabaka Yapısı	Açılma (Şişme)	Yüzeylerde Tutulan Katyonlar	Katyon Değişirme Kapasitesi
2:2	7.2 Å	Kaolinit	Di.	Yok	-	3-5
1:1		Halosit	Di.	10.1 Å	-	5-10
Si:Al		Serpantin*	Tri.	Yok	-	
3 2:1 Si:Al:Si	10 Å	Mika	Di.	Yok		
		Glokonit			K ve diğer**	5-40
		İllit	Di.	10-20 Å	K 0.58 Diğer***0.17	20-50
		Vermikülit	Tri.	15 Å	Diğer***0.66	100-200
		Montmorillonit	Di.	15-20 Å	Diğer***0.33	80-120
		Profillit*	Yok	Yok	-	
		Talk*	Yok	Yok	-	
4 2:2 Si:Al:Si: Al	14 Å	Klorit	Di.	Yok	-	10-40
			Tri.	Yok	-	10-40
Amorf		Alofan				≤100

Di. : Dioktahedral, Ti: Trioktahedral, \* nadiren, \*\*glokonit (K, Ca/2, Na)<sub>0.85</sub>, (Al<sub>0.47</sub>, Fe<sup>+3</sup><sub>0.97</sub>, Mg<sub>0.40</sub>), \*\*\*Ca/2, Mg/2, K, Na, H<sub>2</sub>O



Çizelge 2.5. Kil Minerallerinin sınıflandırılması (Önem, 2000)

<b>Kaolinit</b>  Sulu alüminyum silikattır.	Kaolinit	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Magmatik ve volkanik kayaların ayrışmasıyla oluşur. Tabakalı bir yapı gösterir.
	Dikit	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Hidrotermal ayrışmayla oluşur.
	Nakrit	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Hidrotermal ayrışmayla oluşur. Yapısı kaolinit ve dikite benzemez.
	Anoksit	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Hidrotermal ayrışmayla oluşur. Yapısı kaolinite benzer.
	Halloysit	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Sadece ayrışma ile oluşur.
	Endellit	$Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot 2H_2O$	Sadece ayrışma ile oluşur.
<b>Simektit</b>  Magnezyum veya demirle birlikte potasyum dışı alkalileri ve bazı toprak alkalileri içeren kil mineral grubudur.	Montmorillonit	$Mg_2Al_{10}Si_{124}(OH)_{12} \cdot (Na, Ca)$	Hidrotermal ayrışmayla oluşur.
	Nontronit	$FeSi_{22}Al_{22}O_{60}(OH)_{12} \cdot (Na_2)$	Hidrotermal ayrışmayla oluşur.
	Saponit	$Mg_{18}Si_{22}Al_2O_{60} \cdot (OH)_{12} \cdot (Na_2)$	Hidrotermal bozuşmayla oluşur.
	Beidellit	$Al_{13}Si_{19}Al_5O_{60} \cdot (OH)_{12} \cdot (Na)$	Hidrotermal bozuşmayla oluşur.
	Hektorit	$Li_2(Al, Fe, Mg)(Si_2Al_2)O_5 \cdot OH$	Ayrışmayla oluşur.
<b>İllit</b>  Potasyum içermektedirler.	Muskovit	$K_2O_3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$	Birbirinden kolayca ayrılan ince yapraklar halindedirler.
	Biyotit	$K(Mg, Fe)_3 \cdot (Al, Fe) \cdot Si_3O_{10} \cdot (OH)_2$	Kahverengi veya siyah mikadır.
	Flogopit	$H_2KMg_3Al(SiO_4)_3$	Kristalleşmiş dolomitler ve dolomitik mermerlerde siyah lekeler şeklinde görülür.
<b>Klorit</b>  Magnezyumlu sulu alüminyum silikatlı killerdir.	Atapuljit	$Mg_5Si_8O_{20}(OH)_2 \cdot 4H_2O$	Ayrışma veya kimyasal yolla çökelmek suretiyle oluşur.
	Sepiyolit	$Mg_2Si_3O_8 \cdot 2H_2O$	Uygun karasal şartlar doğunca manyezitin magnezyum hidrosilika dönüşmesiyle oluşur.
	Allofan	$Al \cdot SiO_2 \cdot 2H_2O$	Ayrışma ile oluşur.

### 3.PROBLEMLİ ZEMİNLERİN TANIMLANMASI VE SINIFLANDIRILMASI

Problemlili zeminler olarak tanımlanan dispersif ve şişen zeminler bu özellikleri nedeni ile birçok mühendislik yapısında ciddi problemlere neden olmaktadır. Toprak yapılarda meydana gelen içsel erozyonun nedeni olarak dispersif zeminler gösterilirken, hafif yapılarda oluşan problemlerin ana kaynağı olarak da şişen zeminler gösterilmektedir.

#### 3.1. Şişen Zeminlerin Tanımlanması

Şişen zeminlerin projenin keşif ve ön araştırma aşamasında tanımlanması, ileride yapılması gereken örneklerin alınması, deneylerin yapılması ve en son yapılacak tasarım işlemlerinin doğru yapılmasını sağlayacaktır. Bu amaçla yapılacak olan çalışmalar iki önemli aşamaya yönelik olmalıdır. İlk aşama zeminin şişen zemin olarak tanımlanması, ikinci aşama ise uygun örneklerin alınarak tasarımda kullanılacak değerlerin belirlenmesidir. Şişme özelliği olan zeminlerin şişme karakteristiklerini ölçmek amacıyla çok sayıda deney ve değerlendirme yöntemi bulunmasına karşın, bunlardan hiçbiri uluslararası geniş kullanım alanına sahip değildir. Bu durum hatalara ve sonuçta farklı değerlendirmelere yol açmaktadır (Mollamahmutoglu ve Taşkiran, 2000). Bu yöntemler temelde iki grupta toplanabilirler. Bunlardan ilki niteliksel yöntemler olup; Atterberg limitleri, kolloid içeriği, birim hacim ağırlıkları vb. yaygın zemin parametreleri ile korelasyonlara gidilerek zeminin şişme potansiyelini düşük, orta, yüksek, çok yüksek gibi ifadelerle, ve ampirik yöntemle değerlendirmeye dayanmaktadırlar. İkinci grup ise niceliksel yöntemleri içermektedir. Bu yöntemde ise, ödometre kullanılarak zeminin tek eksenli şişme değerleri elde edilir. Bununla beraber tarım ve jeolojik amaçlı olarak farklı deney yöntemleri kullanılmaktadır. Bu deneyler, zeminin kimyasal ve mineralojik yapısı hakkında ek bilgiler verdiği için ihmal edilmemelidir (Demir ve Kılıç, 2010).

Şişen zeminler için sınıflama sistemleri, potansiyel şişmeler nedeni ile temel yapıda oluşacak sorunlara bağlı olarak geliştirilmiştir. U.S. Army Waterways Experiment Station tarafından geliştirilen sınıflama Amerika Birleşik Devletlerinde yaygın olarak kullanılır. Bu sınıflama O'neil ve Poormoayed (1980) tarafından özetlenmiştir.

Bu sınıflamadan başka araştırmacılar, zeminlerin bazı özelliklerine bağlı olarak zeminlerin şişme özelliklerine yaklaşım için sınıflamalar önermişlerdir. Holtz (1959), koloid içeriği, plastisite indeksi ve büzölme sınırına; Seed vd. (1962), kil içeriği ve aktiviteye; Altmayer (1955), lineer büzölme, büzölme sınırı ve muhtemel şişme yüzdesine; Daksanamurty ve Raman (1973), oluşturdukları plastisite kartına; Raman (1967), plastisite indeksi ve büzölme indeksine; Sowers ve Sowers (1970), büzölme sınırı ve plastisite indeksine; Wan der Merwe (1964), kil içeriği, plastisite indeksi ve aktiviteye bağlı olarak gerçekleştirdiği şime potansiyeli abağı; Snethen (1984), likit limit, plastisite indeksi, şişme potansiyeli ve doğal zemin su emmesine; McKeen (1992), su emme, kuruma anında hacim değişikliği ve yumuşak su ölçümlerine; Vijayvergiya ve Ghazzaly (1973), Nayak ve Christensen (1974) ve Westen (1980) ise ortaya koydukları ampirik eşitliklere bağlı olarak sınıflamalar önermişlerdir. şişen killer genellikle %40 dan büyük likit limite, %15 den büyük plastisite indeksine sahiptirler (Das, 1995).

şişen killer, inşaat mühendisliği yapıları için büyük hasara sebep olan dünya çapında bir problemdir. Özellikle, birbirini izleyen yağışlı ve kurak periyodlar olarak tanımlanan iklimler ve büyük yüzeysel kil depozitlerine sahip bölgelerde görülen bu killer temel zemini olarak değerlendirildiklerinde, temel tabanında önemli ölçüde kaldırma basınçlarının oluşmasına neden olur. Suyu doygun olmayan bazı kil zeminlerin su ile etkileşimde bulunarak bünyelerine su alması ve buna bağlı olarak gelişen hacim artışının karşılanması ile ortaya çıkacak aşırı basınç, kilin “şişme” özelliği olarak tanımlanmaktadır. Oluşan bu basınçlar; temel sisteminde veya döşeme elemanında mimari ve hatta yapısal hasarlar oluşturabilmektedir. Zati ağırlığı oldukça düşük olan kaldırımlarda, karayollarında ve havaalanı pistlerinde, bu problem sık sık görülmektedir (Türköz, 2006).

şişme özelliği olan, kısmen doygun zeminler, su ile karşılaştıklarında, hacim değiştirirler ve şişmelerine engel olunduğu taktirde ise basınç uygularlar. Bu basınç ‘şişme basıncı’ olarak adlandırılır. şişen zeminlerin bu özelliklerini ölçmek amacıyla, uygulanan deneysel yöntemler; ‘şişme potansiyeli’ olarak adlandırılan hacim artışını ya da ‘şişme basıncını’, suya doygun hale gelinceye kadar ölçmeye dayanır.

‘şişme potansiyeli’ laboratuvarlarda belli şartlarda sıkıştırılmış veya tabii (örselememiş) bir zemin numunesinin belirli yük altında, sıfır yanal deformasyon

durumunda suya doymuş hale gelinceye kadar göstermiş olduğu düşey şişme miktarının, numunenin ilk yüksekliğinin yüzdesi olarak ifadesidir. Bu değer, sıfır yanıl deformasyon şartlarında aynı zeminde hacimsel artış yüzdesidir. Şişme basıncı ise, şişme potansiyeline sahip killi bir zeminin, bir şekilde su muhtevasının artması durumunda, meydana gelecek hacim değişikliğine engel olabilecek basınç, şişme basıncıdır. Buna, zeminin başlangıç hacmini koruyabileceği basınç da denebilir.

Bu zeminlerin tanımlanması için yapılan laboratuvar deneyleri Çizelge 3.2’de sunulmaktadır.

Çizelge 3.1. Şişen zeminleri belirlemek için yapılan laboratuvar deneyleri (Nelson, vd., 1992)

Deney	Referans	İncelenen Özellikler	Belirlenen Parametreler
Atterberg limitleri	ASTM standartları 1991	Plastisite, Kıvam	
Likit limit (LL)	ASTM D-4308	Plastisitenin üst limiti(w)	$PI=LL-PL$ =plastisite endeksi
Plastik limit(PL)	ASTM D-4318	Plastisitenin alt limiti(w)	$LL=(w-LL)/(LL-PL)$ =likitlik indisi
Rötre Limiti(SL)	ASTM D-427	Zemin rötresinin alt limiti(w)	R=Büzülme oranı $L_s$ =Lineer rötre
Kil yüzdesi	ASTM D-422	İnce tanelerin dağılımı	2 $\mu$ m’den küçük tanelerin yüzdesi
Minerolojik Deneyler	Whitting (1964)	Kil partiküllerinin minerolojisi	
X ışını difraksiyonu	ASTM STP 479	Kristal boyutlarının karakteristikleri	Atom aralıkları
Diferansiyel termal analiz	Barshad (1965)	Isınma karakteristikleri	Termogramlar üzerindeki alan ve genliklerin pik reaksiyonlarının gösterilmesi
Elektron Mikroskobu	McCrone Ve Delly (1973)	Kil partiküllerinin boyut ve şekli	Partiküllerin görsel olarak değerlendirilmesi
Kasyon değişim kapasitesi	Chapman (1965)	Kil partiküllerinin yük ve partiküllerin yüzey aktiviteleri	KDK(meq/100gr)
Serbest şişme deneyi	Holtz ve Gibbs(1959)	Havada kurutulmuş konsolide olmamış numunenin ıslanmaya karşı şişmesi	Serbest şişme= $(V_{yaş}-V_{kuru})/V_{kuru}$ $\times 100\%$

Çizelge 3.1.(devamı) Şişen zeminleri belirlemek için yapılan laboratuvar deneyleri  
(Nelson, vd., 1992)

Deney	Referans	İncelenen Özellikler	Belirlenen Parametreler
Potansiyel hacim değişimi	Lambe (1960)	Arazi gerilmelerinin uygulandığı sıkıştırılmış numunenin tek eksenli şişme özellikleri	SI (şişme endeksi) (lb/ft-) PVC (potansiyel hacim değişimi)
Şişme endeksi deneyi	Uniform Yapı kodu	%50 doygunluk derecesindeki numunenin 144 psf sürsaj yükü altında tek eksenli şişmesi	Şişme indeksi (EI)
Kaliforniya Taşıma Gücü Deneyi	Yolder ve Witczac (1975) Kassiff vd. (1969)	Sıkıştırılmış numunenin Sürsaj basıncı altında kısmen ıslatılması durumundaki tek boyutlu şişmesi	CBR (%) Şişme Yüzdesi
Lineer Genişleme Katsayısı (COLE) deneyi	Brasher vd. (1966)	Doğal zemin parçasının 5 psi'den etüv kurusu konumdaki emme basıncı değerinin lineer değişimi	COLE VE LE(%)

Çizelge 3.2. Şişen zeminlerin tanımlanmasında kullanılan laboratuvar deneyleri (Nelson ve Miller, 1992)

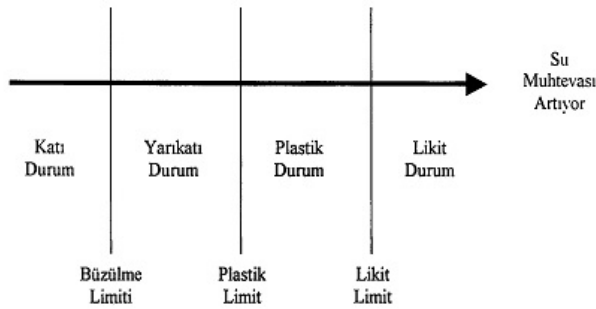
Deney adı	İncelenen özellikler
Kıvam limitleri, Dane çapı dağılımı	Plastisite, kıvam, granülometri
Kil miktarı	İnce daneli zeminlerin dane çapı dağılımı
Mineralojik analizler, X-Işını Kırılımı, Diferansiyel Termal Analiz	Kil partiküllerin mineralojisi
Katyon değiştirme kapasitesi	Kil partiküllerinin yüzeylerindeki yük durumu ve yüzey aktiviteleri
Serbest şişme deneyi	Çevre basıncının uygulanmadığı durumda ıslatılan kuru bir numunenin tek eksenli şişme miktarı ve basıncı
CBR	Sıkıştırılmış numunenin belirli bir sürşarj etkisi altında tek eksenli şişme miktarı
Konsolidasyon şişme deneyi	Farklı gerilmeler altında numune boyundaki artış ölçülür

### 3.1.1. Tanımlama deneyleri

Şişen zeminlerin davranışlarının anlaşılması, şişme mekanizmasının belirlenmesi ve pratik mühendislik uygulamalarında kullanılacak teknikler geliştirilmesi için son yıllarda çok önemli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda zeminlerin şişme davranışını etkileyen pek çok faktör bulunduğu gösterilmiştir (Garaisayev, 2008). Bu faktörler zeminin;

- kil içeriği,
- mineralojisi,
- kıvam limitleri,
- katyon değiştirme kapasitesi,
- tabii su muhtevası,
- aktivitesi,
- kuru birim hacim ağırlığı,
- test edilen numunenin örselenmemiş veya sıkıştırılarak hazırlanmış numune olması olarak sıralanabilir (Chen, 1973).

Atterberg limitleri, kolloid oranı, kil yüzdesi, birim hacim ağırlıkları, başlangıç su içeriği vb. gibi zeminin indeks özellikleri şişen zeminlerin tanımlanmasında ve sınıflandırılmasında en yaygın kullanılan yöntemdir. Atterberg limitleri ince taneli zeminlerin kıvam limitlerindeki su içeriğini belirler. İnce taneli bir zemin dört farklı kıvama sahip olabilir. Şekil 3.1’de bu kıvam ölçüleri ve bunları belirlemede kullanılan su içeriği değerleri görülmektedir. Bu kıvam değerleri zeminin likit, plastik ve büzülme limitleri ile belirlenir.



Şekil 3.1. Atterberg limitleri ve zemin kıvamı arasındaki ilişki

Atterberg limitleri ve zeminin doğal su içeriği belirlenerek iki kullanışlı değere ulaşılabilir. Bunlar plastiklik indisi (PI) ve likitlik indisi (LI)'dir. Özellikle plastiklik indisi (PI) şişen zeminlerin sınıflandırılmasında sıkça kullanılır ve ön araştırmalar sırasında mutlaka belirlenmelidir (Demir ve Kılıç, 2010).

### **3.1.1.1. Mineralojik yöntemler**

Kil mineralojisi şişen zemin davranışını kontrol eden en temel faktörlerden biridir. Kil mineralleri çeşitli yöntemlerle belirlenebilir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı X-ray difraksiyon (XRD) yöntemidir. X ışını analizinde; x ışını dalga boyunun kil mineralinin atom düzlem ağırlığı ile uyumu, bu yöntemin kil minerallerini belirlemede en uygun yöntem olmasının temel nedenidir.

Diğer sık kullanılan mineralojik yöntemler; diferansiyel termal analiz (DTA) ve elektron mikroskobu yöntemleridir. DTA analizi bir kil numunesinin eş zamanlı olarak ısıtılması ve hareketsiz bir nesneden yararlanılarak yapılmaktadır. Sonuçta uygulanan ısıya karşı değişen sıcaklığı gösteren tomografiler elde edilerek, saf minerallerin tomografileri ile karşılaştırılır. Her mineral tomografiler üzerinde farklı endotermik ve egzotermik reaksiyonlar göstermektedir.

Elektron mikroskopları kil minerallerini direkt gözleme olanağını vermiştir. Elektron mikroskobu kullanılarak kil mineralinin şekli ve boyutu hakkında yalnızca nitel tanımlamalar yapılabilmektedir. Kullanılan diğer bazı mineralojik yöntemler ise; kimyasal analiz, infrared spektroskopisi, radyo frekansları ve elektriksel dağılım gibi yöntemlerdir (Çetin, 2003).

### **3.1.1.2. Katyon değişim kapasitesi**

Kil tanesi üzerindeki negatif yüklerin dengelenebilmesi için gereken değişebilir katyonların miktarı, katyon değişim kapasitesi (KDK) olarak bilinir ve meq/100gr ile ifade edilir. Katyon değişimi, zeminlerin temel elektro-kimyasal özelliklerinden biridir ve özellikle killerin davranışı üzerinde önemli etkilere sahiptir. Deney için; öncelikle

zemindeki tuzlar uzaklaştırılarak, zemin bilinen türdeki katyonlarla doyurulur. Değişim meydana gelen bölgeyi doygun hale getirmek için gereken bilinen türdeki katyonların miktarı analitik olarak belirlenir. Kimyasal analizle orijinal katyon kompleksi belirlenebilir. Diğer yöntemler ise; kilin amonyum ( $\text{NH}_4$ ) iyonlarıyla doyurulması, setilpiridinyum iyonları, kobalt hekzamin, bakır dietilendiamin ve bakır trietilentetramin gibi metal organik karışımlarla belirlenmesi hızlı ve kesin sonuç vermektedir. Bununla birlikte, amonyum asetat yöntemi önemini korumakta ve uzun zaman almasına karşın diğer yöntemlerin doğrulanmasında kullanılmaktadır (Ammann, 2003).

KDK kil mineralojisi ile ilgilidir. Yüksek KDK değerleri yüksek yüzey aktivitesini gösterir. Genelde şişme potansiyeli KDK değerleri ile artar. Farklı kil mineralleri için KDK değerleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

KDK değerinin ölçülmesi genellikle zemin mekaniği laboratuvarlarında bulunmayan detaylı ve hassas deney teknikleri gerektirir. Bununla beraber bu deney birçok toprak laboratuvarında kolaylıkla yapılmakta olup pahalı bir deney değildir.

Çizelge 3.3. Çeşitli kil mineralleri için katyon değiştirme kapasitesi değerleri (Grim, 1962)

<b>Kil minerali</b>	<b>KDK (meq/100gr)</b>
Montmorillonit	80-150
Vermikülit	100-150
Halosit $4\text{H}_2\text{O}$	10-40
İllit	10-40
Klorit	10-40
Sepiyolit-Atapulgit	20-30
Halosit $2\text{H}_2\text{O}$	5-10
Kaolinit	3-15

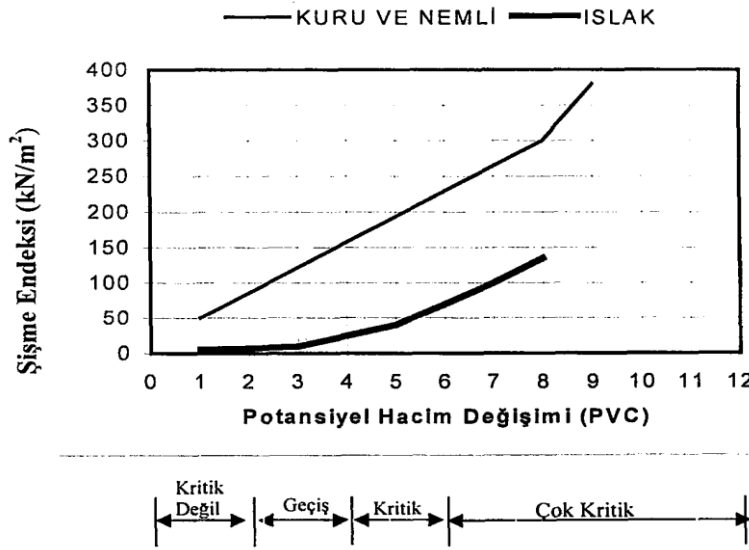


### **3.1.1.3. Serbest şişme**

Serbest şişme deneyi 40 nolu elekten geçen bilinen bir hacimdeki kuru zeminin, dereceli bir silindere konularak; zeminin tam doygun haldeki hareketini tamamladıktan sonra şişmiş haldeki hacminin belirlenmesinden ibarettir. Zeminin serbest şişmesi; hacimdeki ilk değişimin ilk hacme olan oranıdır. Yüksek kaliteli ticari bentonitin (sodyum montmorillonit) serbest şişmesi, %1200-2000'dir. Holtz ve Gibs (1956), %100 gibi düşük şişme yüzdesine sahip bir zeminin arazide, hafif yükleme altında ıslatıldığında önemli miktarda şişme meydana geldiğini göstermişlerdir. %50'nin altında serbest şişme gösteren zeminlerin önemli şişme değişimi göstermediği kabul edilmektedir. Ancak, Dawson (1953) %50 civarında serbest şişme gösteren bazı Texas killerin, şişme nedeni ile önemli zararlara yol açtığını göstermiştir. Bunun nedeninin, zeminin şişme karakteristikleri ile aşırı iklim koşullarının birleşmesi olduğu düşünülmektedir (Nelson vd., 1992).

### **3.1.1.4. Potansiyel hacim değişimi**

PVC metre sıkıştırılmış bir zeminin şişme basıncını belirlemek amacıyla standart hale getirilmiş bir alettir. PVC metre arazide veya laboratuarda kullanılabilir. Bu deneyde örselenmiş numune doğal su muhtevasında Proktor sıkışma enerjisi ile ( $55000 \text{ ft}\cdot\text{lb}/\text{ft}^3$  ( $2600 \text{ kJ}/\text{m}^3$ )) sıkıştırılarak konsolidometre hücersine yerleştirilir. Numune konsolidasyon aletinde bir yük halkasına karşı ıslatılarak şişmesine izin verilir. Şişme endeksi yük halkasına bağlı olarak kaydedilir. Değerlendirme için Şekil 3.2'de verilmiş olan abak kullanılır. Bu deneyin avantajları basitliği ve standart sonuçlar vermesidir. Ancak, örselenmiş numunelerin kullanılması nedeni ile arazideki zemin hakkında tasarımda kullanılabilecek kesin parametreler elde edilemez, bu sebeple tanımlama amacıyla kullanılması daha faydalıdır.



Şekil 3.2. Potansiyel hacim değişikliğine bağlı değerlendirme

### 3.1.1.5. Şişme indeksi deneyi

Şişme indeksi deneyi; 1960'ların sonunda Amerika'nın Güney Kaliforniya bölgesinde, bölgede çalışan firmaların kullanılan deneylerin standartlaştırılması konusundaki istekleri doğrultusunda geliştirilmiştir. Yöntem istatistiksel olarak Kaliforniyadaki beş farklı laboratuarda denenmiş ve UBS standardı No:29-2 olarak standartlaştırılmıştır. Deney PVC deneyine çok benzemektedir, aralarındaki tek fark bu deneyde şişmenin sabit bir sürsaj yükü altında serbest bırakılmasıdır.

Deney için; zeminin 4 numaralı elekten elenerek ASTM-D-1557-66T standardına göre optimum su muhtevasına getirilir. Daha sonra zemin 6-30 saat kür edilerek standart 4-in (10.2 cm) kalıpta sıkıştırılır. Daha sonra numunenin su muhtevası %50 lik bir doygunluk derecesine göre ayarlanır. Numune üzerine 144 psf (6.9kPa)'lık sürsaj uygulanarak ıslatılır. 24 saat boyunca hacim değişimi izlenir. Şişme indeksi aşağıdaki formülle hesaplanarak en yakın tam sayıya yuvarlanır.

$$EI=100 \Delta h \times F \quad (EI=\text{Şişme indeksi}) \quad (1)$$

Burada;

$\Delta h$ =şişme yüzdesi

F=4 numaralı elekten geçen yüzde

Şişme indeksine bağlı olarak şişme potansiyeli aşağıdaki şekilde belirlenir.

Çizelge 3.4. Şişme indeksi değerlerine göre zeminlerin şişme potansiyelleri

EI	Şişme Potansiyeli
0-20	Çok Düşük
21-50	Düşük
51-90	Orta
91-130	Yüksek
>130	Çok Yüksek

### **3.1.1.6. Kaliforniya taşıma oranı**

CBR deneyi, karayolu ve havaalanı kaplamalarının projelendirilmesinde yoğun olarak kullanılan bir penetrasyon direnci deneyidir. Zemin, 6 inç (152 cm) çapındaki CBR deney silindirine farklı su içeriklerinde ve yoğunluklarda sıkıştırıldıktan sonra bir sürşarj yükü altında 4 gün suda bırakılır. Sürşarj yükü zeminin arazide maruz kalacağı statik gerilmeye uygun olarak seçilir. Şişme okumaları 4 günlük ıslatma periyodundan önce ve sonra bir ölçüm saatiyle alınır.

### **3.1.1.7. Doğrusal genişleyebilirlik katsayısı (COLE)**

Doğrusal genişleyebilirlik katsayısı (COLE) deneyi, şişen zeminlerin karakterize edilmesi için kullanılan bir büzülme deneyidir. Deney örselenmemiş örneğin (33 kPa) emme durumu ile fırında kurutulmuş emme (1000 kPa) durumu arasındaki doğrusal deformasyonun belirlenmesinden oluşur. Örselenmemiş zemin örneği, su için geçirimsiz ancak su buharı için geçirimli olan esnek plastik reçine ile kaplanır. Daha sonra bu doğal zemin toprakları, basınçlı bir kap içinde 33 kPa zemin emmesine getirilir. Zeminlerin hacimleri arşimet prensibi yardımıyla belirlenir. Daha sonra örnekler fırında kurutulur ve benzer şekilde diğer hacim ölçümleri yapılır. COLE, nemli durumdan kuru duruma

geçirildiğinde, örnek boyutundaki değişimin ölçümüdür ve 33 kPa emme ile fırında kurutulmuş toprağın hacim ağırlıklarından belirlenir.

COLE yüzde olarak da hesaplanabilmekte ve bu durumda doğrusal genişleyebilirlik yüzdesi (LEP) olarak isimlendirilmektedir. Amerika Birleşik Devletleri Tarım Departmanı Doğal Kaynakları Koruma Servisi tarafından verilen şişme-büzülme potansiyeli sınıflandırması Çizelge 3.5'te görülmektedir (Anonim, 2005).

Çizelge 3.5. Şişme-büzülme potansiyelinin doğrusal genişleyebilirlik katsayısı ve doğrusal genişleyebilirlik yüzdesine bağlı olarak sınıflandırılması (Anonim, 2005)

COLE	LEP	Şişme-Büzülme Potansiyeli
<0.03	<3	Düşük
0.03-0.06	3-6	Orta
0.06-0.09	6-9	Yüksek
≥0.09	≥9	Çok Yüksek

### 3.1.2. Şişen zeminlerin sınıflandırılması

Şişen zeminlerin tanımlama deneyi ile elde edilen parametreleri bazı sınıflandırma şemaları ile birleştirilmişlerdir. Maalesef henüz standart bir sınıflama yöntemi geliştirilmemiştir. Bu yüzden farklı bölgelerde farklı sınıflandırma sistemleri kullanılmaktadır.

Şişen zeminlerin sınıflandırılmasını güçleştiren en önemli neden; şişme potansiyelinin standart bir tanımının olmamasıdır. Şişme deneylerinin yapıldığı numunenin özellikleri (örselenmiş, örselenmemiş), sürsaj yükü ve deneye etki eden diğer faktörler değişiklikler göstermektedir. Örneğin; Holtz (1959), şişme potansiyelini; havada kurutulmuş örselenmemiş numunenin; 1 psi (6.9kPa) basınç altında, doygun hale getirilmesi sonucu meydana gelen hacim değişikliği olarak tarif etmiştir. Seed vd. (1926) ise; şişme potansiyelini; örselenmiş, optimum su muhtevası ve maksimum yoğunluktaki (AASHTO standardı) numunenin 1 psi (6.9kPa) basınç altında yaptığı hacim değişimi

olarak tarif etmiştir. Snethen (1979) şişme potansiyelini; “ şişme potansiyeli doğal su muhtevası ve yoğunluğundaki örselenmemiş numunenin arazideki gerilme şartları altında, ödometre deneyinde denge konumuna geldiği düşey hacim değişimidir” şeklinde tanımlanmıştır. Düşey hacim değişimi bu durumda orijinal yüksekliğe oranı olarak ifade edilmelidir (Nelson vd., 1992).

Arazide gerçekleşecek şişme miktarı çevresel faktörlere bağlıdır. Bu faktörler zeminin doğal konumunda bırakılmasını veya sıkıştırılmasında içerir. Bu durumda şu gerçeğin unutulmaması çok önemlidir; aynı şişme potansiyeline sahip iki farklı zemin arazide farklı miktarlarda şişebilir.

### **3.1.2.1. Zemin sınıflandırma yöntemlerine göre sınıflandırma**

Zeminler genellikle indeks özelliklerine göre, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi(USCS) ve Amerikan Karayolları Sınıflandırma Sistemine (AASHTO) göre sınıflandırılır. USCS sistemine göre CL ve CH, AASHTO sistemine göre A6 veya A7 olarak sınıflandırılan zeminlerin şişme potansiyeline sahip oldukları düşünülür.

### **3.1.2.2. Mühendislik indeks özelliklerine göre sınıflandırma**

Şişme potansiyelinin belirlenmesi için Atterberg limitlerinin kullanılması en yaygın yöntemdir. Bununla beraber pek çok yöntem kil içeriğini sınıflandırmaya dahil etmektedir. Holtz ve Gibs (1956) örselenmemiş zemin numuneleri için Çizelge 3.6’de verilen kriterleri sunmuşlardır. Altmeyer (1959), pek çok laboratuarda hidrometre deneyinin yapılamadığını düşünerek kil içeriğini elimine ederek, rötren limitinin veya lineer rötrenin kullanılmasını önermiştir (Çizelge 3.7). Chen (1965); potansiyel şişmenin belirlenmesi için; 200 No’lu elekten geçen zemin yüzdesi, likit limit ve standart penetrasyon sayısı değerleri arasında bir korelasyon geliştirmiştir (Çizelge 3.8). Chen (1988) ayrıca plastisite endeksine bağlı olarak şişen zemin sınıflandırılması için basit bir yöntem sunmuştur (Çizelge 3.9). Seed vd., (1962); sıkıştırılmış killerin şişme karakteristikleri üzerinde bir çalışma yapmış ve aktivite ve kil yüzdesi değerlerine bağlı bir abak oluşturmuştur (Şekil 3.3) (Nelson vd., 1992; Türköz, 2001; Yalçın, 1997).

Çizelge 3.6. Kolloid içeriği, plastisite indisi, büzülme limiti değerlerine göre şişen zeminlerin sınıflandırılması

İndeks deneylerinde elde edilen değerler <sup>a</sup>			Muhtemel şişme hacim (% Toplam değişimi)	Şişme derecesi
Koloid içeriği (%<0.001 mm)	Plastisite indisi	Büzülme limiti		
>28	>35	<11	>30	Çok yüksek
20-31	25-41	25-41	20-30	Yüksek
13-23	15-28	15-28	10-20	Orta
<15	<18	>15	<10	Düşük

<sup>a</sup> 1 psi düşey yükleme altında

Çizelge 3.7. Rötire limiti veya lineer rötreye bağlı şişen zemin sınıflandırması

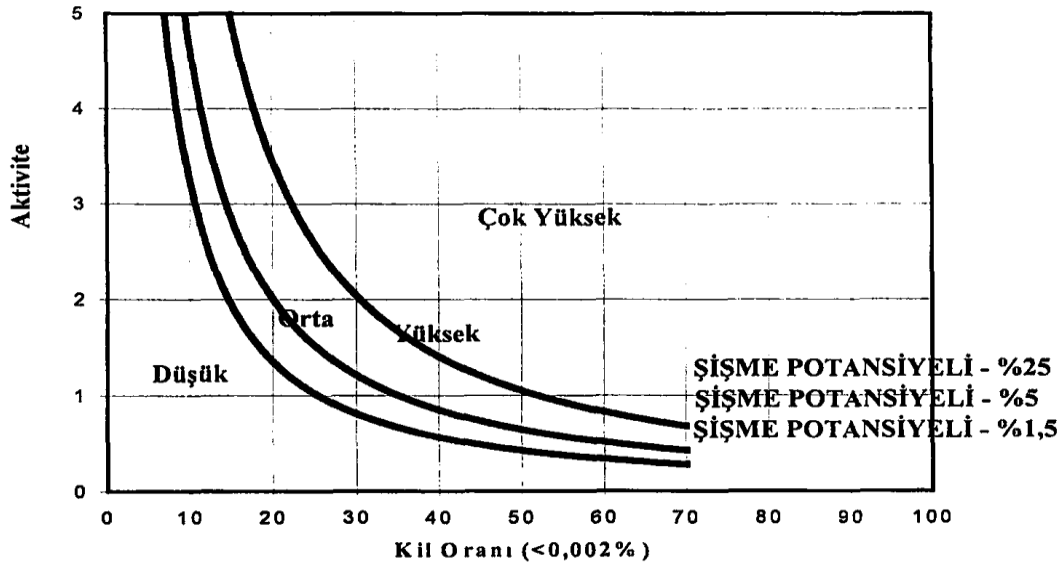
Lineer rötire	Rötire limiti (%)	Muhtemel şişme (%)	Şişme derecesi
<5	>12	<0.5	Kritik değil
5-8	10-12	0.5-1.5	Marjinal
>8	<10	>1.5	Kritik

Çizelge 3.8. 200 No'lu elekten geçen zemin yüzdesi, likit limit ve penetrasyon direncine bağlı şişen zemin sınıflandırması

Laboratuar ve arazi dataları			Muhtemel şişme hacim (% Toplam değişimi)	Şişme derecesi
No.200' den geçen yüzde	Likit Limit (%)	Standart penetrasyon sayısı (vuruş/ft)		
>95	>60	>30	>10	Çok yüksek
60-95	40-60	20-30	3-10	Yüksek
30-60	30-40	10-20	1-5	Orta
<30	<30	<10	<1	Düşük

Çizelge 3.9. Plastisite indisine bağlı şişen zemin sınıflandırması

Şişme potansiyeli	Plastisite indisi
Düşük	0-15
Orta	10-35
Yüksek	20-55
Çok yüksek	>55



Şekil 3.3. Kil oranı-Aktivite değerlerine bağlı sınıflandırma

Yapılan çalışmalar benzer plastisite özellikleri gösteren zeminlerin birbirinden çok farklı şişme potansiyellerine sahip olabileceğini göstermiştir. Bunun nedeni numunenin özellikleri, içinde buldukları ortam ve farklı su içeriğinde deneye tabi tutulmaları vb. olarak açıklanabilir. Bununla beraber yapılan çalışmaların çoğu likit limit ve plastisite indisinin şişme özelliğini belirlemede kullanılabilecek en iyi parametreler olduğunu göstermiştir. Şişen zeminlerin sınıflandırılmasında yukarıda anlatılan yöntemlerden başka kation değiştirme kapasitesi ve COLE değerlerine bağlı olarak geliştirilen yöntemler de vardır.

### 3.1.3. Şişen zeminlere etki eden faktörler

Bir zeminin arazide şişme gösterip göstermeyeceği pek çok faktöre bağlıdır. Şişme özelliği olmayan bir zemin arazideki şartlar ne olursa olsun şişmeye uğramaz. Diğer taraftan şişen zeminler, zeminin başlangıçtaki fiziksel durumuna, daha sonra uğrayacağı gerilme ve su içeriği değişikliklerine bağlı olarak az veya çok şişme ve hatta çökme gösterebilir. Mollamahmutoğlu ve Taşkiran (2000), çalışmalarında, şişme olayına etki eden faktörleri sınıflandırmışlardır (Çizelge 3.10). Çizelgede sıralanan faktörlerden katı madde içeriği, kil minerallerinin türü ve miktarını yansıtır ve potansiyel hacim değişimini belirler. Geriye kalan zemin özellikleri ve çevresel koşullar şişmenin hızı ve miktarını belirlemede etkili olurlar.

Çizelge 3.10. Şişmeyi etkileyen faktörler

Faktörler	Tanımlama
Zemin özellikleri	
Katı madde içeriği:	Montmorillonit içeren aktif kil mineralleri ve montmorillonit ve diğer kil minerallerinin kombinasyonu ile oluşan karışık tabakalı killer.
Boşluk sıvısı tuz kombinasyonu:	Boşluk sıvısındaki yüksek katyon konsantrasyonu şişme özelliğini azaltma eğilimindedir. Osmoz yoluyla şişme uzun sürede önem kazanır.
Boşluk sıvısı içeriği:	Tek değerlikli katyonların fazlalığı büzülme-şişme özelliğini artırır. İki ve üç değerlikli katyonlar ise büzülme-şişme özelliğini engeller.
Kuru yoğunluk:	Yüksek kuru yoğunluk, partiküllerinin daha sıkı dizilmelerine ve şişmenin artmasına yol açar.
Yapı:	Foleküler yapılar, dağınık yapılara oranla daha fazla şişerler, çimentolanmış partiküller ise daha az şişerler. Ayrılmış dokular şişmenin artmasına yol açarlar.
İklim:	Kurak iklimler kurumayı artırırken, ılıman iklimler, zeminin nemli kalmasına neden olurlar.
Yeraltı suyu:	Yüzeysel ve değişken yeraltı suyu zemin nemine kaynak oluşturur ve şişmeye yol açar.
Drenaj:	Yetersiz yüzey drenajı nem birikimi ve göllenmeye neden olur.
Bitki örtüsü:	Ağaçlar, çalılar, otlar zemin neminin azalmasına yol açarlar. Bitki örtüsünün alındığı yerlerde ise nem birikimi oluşur.
Yanal basınç:	Yüksek yanal basınç, şişmenin azalmasına yol açar. Kazı alanları daha fazla şişerler.
Arazi permeabilitesi:	Figürler, permeabiliteyi önemli ölçüde artırır ve daha çabuk şişmeye neden olurlar.



Arazide meydana gelen şişmenin miktarı çok sayıda faktöre bağlıdır. Tabaka kalınlığı, zemine gelebilecek suların kaynakları, başlangıç yoğunluğu ve su muhtevası, sürşaj yükü, yer altı su seviyesi ve aktif bölge derinliği bunlar arasında en önemlileridir. Bunların dışında, zemin yüzeyinde geçirimsiz alanların oluşturulması, kırık su borularından gelen sızıntılar ve insan faktörü gibi etkenlerde şişme olayında etkilidirler.

Killerin şişme davranışında en etkili 3 parametre; başlangıç su muhtevası, başlangıç kuru birim hacim ağırlık ve sürşaj yüküdür. Zeminlerin su muhtevasında bir artış olmadan zeminin şişmesi beklenmez. Kuru bir zeminin ıslak bir zemine oranla daha fazla şişme göstereceğibilinen bir gerçektir. Dolayısıyla kilin su muhtevasının yüksek olması nispetinde şişme potansiyeli ve şişme basıncı azalacaktır. Sabit su muhtevasında kuru birim hacim ağırlığının artması ile şişme yüzdesi ve şişme basıncının arttığı bilinmektedir. Çeşitli sürşaj yükleri altında ölçülen şişme değerlerinde sıkıştırılmış numuneler için sürşaj yükü arttırıldığında numunelerin şişme potansiyellerini azaltıcı yönde etki yapmaktadır.

Fiziksel koşullardaki değişimlerin etkisiyle nemlilik derecesi azalan killi zeminler tekrar kapiler su emdiklerinde, sahip oldukları şişme potansiyeline yeniden kavuşurlar. Ancak, kuruma ve ıslanmanın her çevrimi için zeminin şişme davranışında bir yorulma gözlenir. Kurutma ve ıslatma işlemlerinin tekrarlanması halinde ilk çevrimde oluşan şişmenin sonrakilerden fark edilir derecede büyük olduğu yapılan incelemelerle gözlenmiştir. Şişen zeminlerin bu özelliğine şişme yorulması denmektedir.

Killer üzerindeki mühendislik uygulamalarının hemen hepsi kildeki doğal su içeriğini bozar. Kil üzerine uygulanan gerilmeler, doğal ve yapay yükler kilin yapısında nem hareketine neden olur ve killerdeki hacimsel değişimler genellikle bu nem hareketi ile kontrol edilir. Killerde nem hareketi, kil-su sistemi içerisinde içsel eğimden kaynaklanan kuvvetlerle oluşur. İçsel eğim, sıcaklık değişmesi, doygunluğun artması ve kimyasal bileşimdeki değişimlerden kaynaklanır. Killerde kuruma sonucu büzülme, su emme sonucu şişme gibi istenmeyen sonuçlar nem hareketlerinden dolayı oluşur (Yıldırım, 2009).

Killerin gerilme tarihçesi de nihai şişme miktarını belirleyen faktörlerden biridir. Daha önce aşırı yüklenmiş ve boşaltılmış numuneler ön yükleme almamışlara oranla daha az şişme gösterirler. Ön yükleme işlemi negatif boşluk basıncının azalmasına ve foleküler yapının disper yapıya dönüşmesine yol açmaktadır. Foleküler yapılar şişmeye karşı daha hassastırlar (Mollamahmutoğlu ve Taşkiran, 2000).

Kuruma-ıslanma tekrarlarına maruz kalan doğal depozitlerin yığılma ve depolanma süreçlerinde Ca, Mg, Al ve Fe bileşikleri etkili olurlar. Bu tür çimentolanma süreçleri zeminin kırılma özelliğinin artmasına ve bağlanmış kil gruplarının oluşturduğu kümelerin özgül yüzeylerinin azalmasına neden olur. Neticede örselenmemiş killi zeminler, siltli zeminler gibi davranmakta ve benzer durumdaki sıkıştırılmış zeminlere göre daha az şişmektedir. Bu durum şişme yorulması olarak (fatigue of swelling) adlandırılmaktadır.

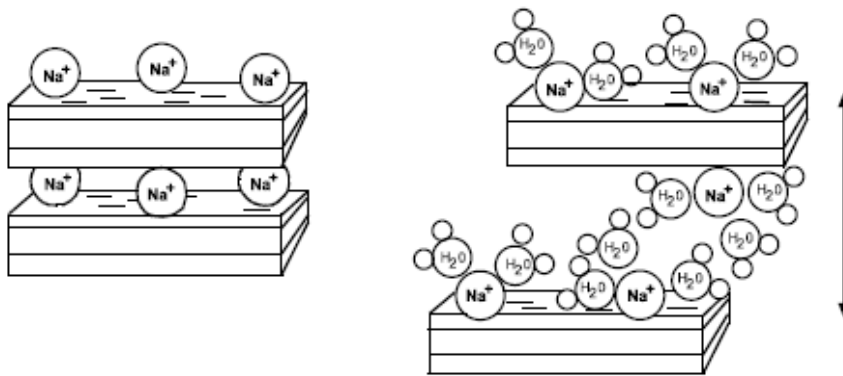
### 3.2. Dispersif Zeminler

Dispersif killer boşluk suyundaki çözülmüş sodyum iyonu yüzdesi yüksek olduğundan su ile temas ettiğinde, ciddi biçimde erozyona uğrayan minerallerdir. Bu killer, düzgün su içerisinde dahi dağılma ve ayrılmaya uğrayarak süspansiyon oluştururlar. Dispersif kil zeminlerin su yapıları, dolgu barajlar ve yol dolguları yapımında kullanımı söz onusu ise, iyi tanımlanmalı ve uygun teknikler ile yapım gerçekleştirilmelidir. Aksi takdirde, sonu göçmelere kadar giden ciddi mühendislik problemleri ile karşı karşıya kalınmaktadır. Dispersif erozyonun gerçekleşmesi, kilin mineralojisi ve kimyasal yapısına ve bu dolgu malzemesinin boşluk suyu ile malzemeyi erozyona zorlayan su kütlesindeki çözülmüş tuz muhtevasının niteliğine ve miktarına bağlıdır. Dispersif bir malzeme suya batırıldığında kil mineralleri, normal killerden farklı olarak, diğer zemin daneleri ile aralarındaki elektrokimyasal bağı yitirirler ve su ile süspansiyon yaparlar (Vural, 2012).

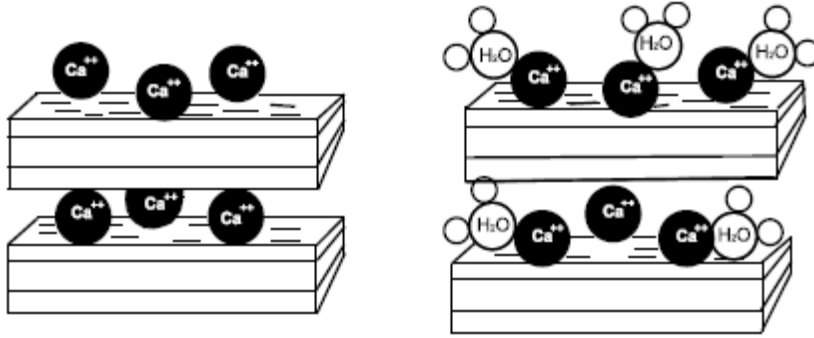
Dispersif kil ifadesinin ilk olarak ortaya atılması, bundan yüz yıl kadar öncelerde olmasına rağmen, 50-60 yıl öncesine kadar zemin araştırmacıları ve ziraat mühendisleri tarafından bu killerin temel yapısı yeterince anlaşılmış değildi. Ancak dispersif kil konusunun inşaat mühendisliği pratiğinde tanımlanması, 1960'lı yılların başlarında olmuştur. Avustralya'da killerin dispersif özelliğinden kaynaklanan toprak barajlardaki

borulanma göçmelerinde yapılan araştırmalar sonucunda, konu açık olarak ortaya konulmuştur. Ülkemizde konu, ilk defa DSİ tarafından düzenlenen bir kongrede dile getirilmiştir (Tuncer, 1985). Konu ile ilgili bir TÜBİTAK projesi, Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü tarafından yapılmış ve sonuçları rapor edilmiştir (Tosun vd., 2001). Bu çalışmada 10 ayrı baraj projesinden alınmış 27 adet numunenin farklı yöntemler ile dispersif özelliği belirlenmiş ve sonuçlar karşılaştırılarak ilgili deneysel yöntemlerin duyarlılığı araştırılmıştır. Sonraki yıllarda dispersif killer, toprak dolgu barajlar açısından daha detaylı incelenmiş ve konu ile ilgili olarak kilin bu özelliğinin belirlenmesi doğrultusunda nitel ve nicel sonuçlar veren deneysel yöntemler geliştirilmiştir.

Dispersif kilin ayrışmasında boşluk suyunda bulunan sodyum iyonunun ( $\text{Na}^+$ ) önemi büyüktür ve iyonun +1 yükü ile yakından ilişkilidir (Şekil 3.4). Aynı negatif elektrik yüküne sahip bir kil partikülü için gereken nötrleştirici pozitif iyon sayısı, iyonun sodyum olması durumunda, iyonun kalsiyum ( $\text{Ca}^{+2}$ ) veya magnezyum ( $\text{Mg}^{+2}$ ) olması durumuna göre iki mislidir (Şekil 3.5). Ozmotik potansiyel, kil partikülü çift tabakasındaki iyon sayısı ile doğru orantılı olduğu için sodyumlu sistemlerde daha fazladır. Bu şekilde, daha çok iyon içeren çift tabakanın kalınlığı artar ve kil parçacıkları arasındaki çekim kuvveti azalır. Ayrıca tek bağlı sodyum iyonunun kil parçacığı yüzeyine Coulomb cinsinden tutunma kuvveti çok bağlı iyonlardan çok daha azdır. Killerde dispersif potansiyel, genellikle kil içeriğinin montmorillonit gibi ağırlıkça 2/1 mineralojik yapıya sahip olduğu durumlar için geçerlidir. İllitlerin bazıları da yüksek dispersif özellik gösterirler. Kaolin tipi killer ise çok nadir dispersibilite problemi sergilerler (Vural, 2012)

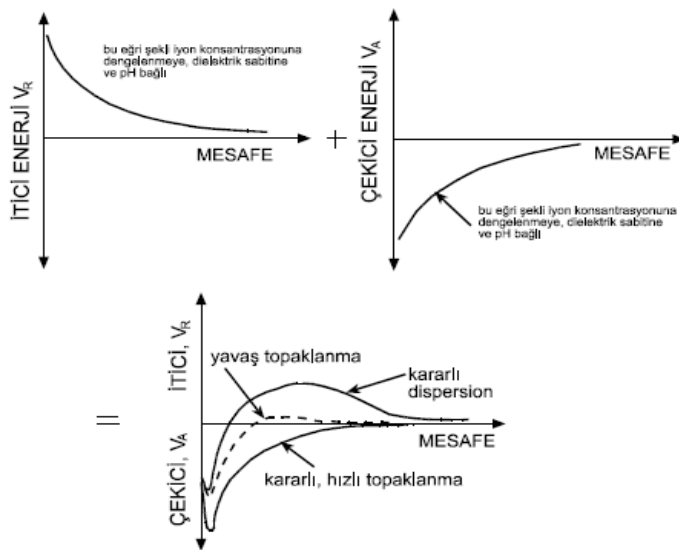


Şekil 3.4. Dispersiyon oluşumuna sodyum etkisinin şematik gösterimi (Mc Kenzie, 1998)



Şekil 3.5. Kalsiyum katyonunun toplanmış yapı oluşumuna etkisi (Mc Kenzie, 1998)

Dispersiyon, zemin tanelerinin su içinde dağılma işlemidir. İki kil partikülü birbirine yaklaştığında potansiyel çekim alanlarının çatışması gerçekleşir. Eğer partiküller oldukça yakınsa, bu itici kuvvetlerin oluşmasına neden olacaktır. Bu itici kuvvetlere Vander Walls çekici kuvvetleri tarafından karşı konulacaktır. Eğer itici kuvvetler çekici kuvvetlerden büyükse zemin dispersif olacaktır (Şekil 3.6). Bu durumda bağımsız kil parçacıkları zemin yüzeyinden ayrılır ve su içinde süspansiyon haline geçer (Tosun, 1994). Eğer su akış halinde ise, kil parçacıkları uzaklara taşınarak kil kütesinin ayrışmasına ve dağılmasına neden olur. Dispersiyon, fiziko-kimyasal bir olaydır ve esas olarak kil minerolojisi ile boşluklardaki ve erozyona neden olan suyun kimyasından etkilenir (Mitchell, 1976).



Şekil 3.6. Kil-su sisteminde fiziko-kimyasal kuvvetler (Mitchell, 1976)

### 3.2.1. Dispersif killerin tanımlanması ve sınıflandırılması

Dispersivitenin, dispersif karakter taşıyan killerin endeks özelliklerinden herhangi birinin ölçüldüğü standart deneylerle tespit edilmesi mümkün değildir. Bir başka ifade ile, dispersif karakter taşıyan killerin dispersivitesiyle, bu killerin endeks özelliklerinden herhangi birisi arasında sistematik bir ilişki gözlenememiştir (Sherard vd., 1972; Mitchell, 1976; Düzceer, 1984). Bu nedenle dispersif killeri belirleyebilmek için özel deneyler geliştirilmiştir. Arazi gözlemleri, çoğunlukla yamaç molozu ve taşkın ovası çökelleri formunda gelişmiş alüvyonların dispersif killerin jeolojik orijinini oluşturduğunu göstermiştir. Ayrıca denizel ortamda çökelmiş şeyl depozitleri ile kil taşının yerinde ayrışması ile oluşan zeminlerin dispersif risk taşıdığı da düşünülmektedir. Zayıf ve bodur bitki örtüsüne sahip alanlar, yüksek oranda tuzlu toprakların göstergesidir ve bunların çoğu dispersiftir. Genellemek gerekirse dispersif zeminler kurak-yarı kurak iklimlere özgü olup en çok Meksika, Güney Afrika, Avustralya, Vietnam, Tayland, Gana, Brezilya, Zimbabwe, Kenya ve Güney Amerikada görülürler. Mühendislik malzemesi olarak oldukça önemli bir yer tutan killerde dispersif özelliklerin elek analizi, hidrometre, Atterberg limitleri, konsolidasyon, kompaksiyon gibi klasik laboratuvar indeks deneyleri ile belirlenmesi mümkün değildir. Bu yüzden özel deney prosedürleri geliştirilmiştir. Bu deneyler fiziksel ve kimyasal olmak üzere iki başlıkta toplanır.

#### 3.2.1.1. Fiziksel deneyler

Çifte hidrometri deneyi; bu deneyde, zemin önce standart hidrometre deneyine tabi tutulur ve numuneye dispersif özellik veren bir madde ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  yada  $\text{Mg}^{++}$ ) ilave edilmek suretiyle mekanik olarak kuvvetli bir şekilde karıştırılır. Aynı zeminde ikinci bir kez başka bir numune, dispersif özellik veren bir madde kullanmadan ve karıştırmaya tabi tutulmadan denir. Her iki numuneye ait boyut dağılım eğreileri çizilerek 0,005 mm den küçük tanelerin ikinci deneydeki yüzdesi birinci deneydekine oranlanarak dispersiyon yüzdesi bulunur ve aşağıdaki bağıntıyla tarif edilir;

$$DY = \Psi / \Phi * 100 \quad (2)$$

Burada; DY: Dispersiyon yüzdesi,  $\Psi$ : Mekanik karıştırma ve dispersan madde kullanmadan 0,005 dane boyutundan küçük danelerin yüzdesi,  $\Phi$ : Mekanik karıştırma ve dispersan madde kullanarak 0,005 mm dane boyutundan küçük tanelerin yüzdesidir. Bu orana göre, dispersiyon yüzdesi %40'dan fazla olan killi zeminler dispersif karakterde kabul edilirler (Vural, 2012)

İğne deliği deneyi; bu deney Sherard vd. (1976) tarafından geliştirilmiştir. Deneyde, kullanılacak olan zeminden, optimum su muhtevasında sıkıştırılmış 38 mm uzunluğunda silindirik bir numune hazırlanır. Numune ortasında açılacak 1 mm çaplı iğne deliğinden belirli bir sabit hidrostatik basınç altında belirli bir süre damıtık su akımı sağlanır. Numuneden çıkan suyun bulanması, iğne deliğinin çapının büyümesi ve ilk 5 dakika içinde artan debi deney zemininin dispersif özellik taşıdığını gösteren işaretlerdir. Numune içerisine açılan bu delikle dolgu barajların geçirimsiz kil çekirdeğinde oluşabilecek bir çatlak ya da kaçak kanalının küçük ölçekte benzeşimi amaçlanmıştır.

Dağılma deneyi; bu deneyde, bir kenarı 15 mm ebadında küp şeklinde bir zemin numunesi 250 ml saf suyun içerisine dikkatlice yerleştirilir. Kaptaki suyun elektriksel iletkenliği ve pH değeri belirli sınırlar içerisinde olmalıdır ( $6,5 < \text{pH} < 8,5$ ). Malzemenin su ile yaptığı reaksiyon ve kolloidal kil parçacıklarının su içerisinde süspansiyon oluşturup oluşturmadığı 5-10 dk süre ile gözlenir. Oluşan bulanıklık derecesine göre zemin; bulanıklık yok denecek kadar az ise "Dispersif Değil", az ise "Ara Zemin", orta derecede ise "Dispersif" ve yüksek bulanıklıkta "Çok Yüksek Dispersif" olarak tanımlanır (Vural, 2012).

### **3.2.1.2. Kimyasal deneyler**

İçsel erozyon ile zemin kimyası arasında güçlü bir ilişki vardır (Aitchison ve Wood, 1965; Sherard vd., 1976). Bu deneylerde zemin numunesi likit limit kıvamına gelinceye kadar saf su ile karıştırılır ve vakum yardımı ile malzemeden boşluk suyu örneği alınır. Boşluk suyundaki  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$  ve  $\text{K}^+$  gibi katyonların miktarı kimyasal yöntemlerle meq/l (mili equivalent/litre) cinsinden belirlenir. İkinci grup deneyler ise kille ilgilidir. Kilin katyon değişimi kapasitesi (CEC: Cation Exchange Capacity), her 100 gr kuru zeminde

mili equivalent (meq/100gr) cinsinden belirlenir. Ayrıca, değişim kompleksi içerisindeki  $\text{Na}^+$  kationunun rölatif miktarı meq/100 gr cinsinden ifade edilir.

Deney sonuçlarına göre boşluk suyundaki toplam çözünmüş tuzlar (TDS), sodyum yüzdesi, sodyum adsorbsiyonu oranı (SAR) ve değişebilir sodyum yüzdesi (ESP) eşitlik 3, 4, 5 ve 6'da verildiği gibi hesaplanır;

$$\text{TDS}=\text{Ca}+\text{Mg}+\text{Na}+\text{K} \quad (3)$$

$$\text{SD}=\text{Na}/\text{TDS}*100 \quad (4)$$

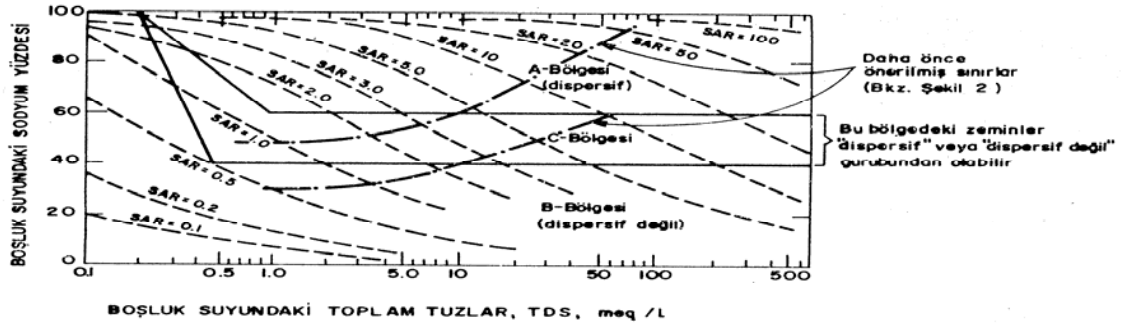
$$\text{SAR}=\text{Na}/[(\text{Ca}+\text{Mg})/2]^{0.5} \quad (5)$$

$$\text{ESP}=\text{Na}/\text{CEC}*100 \quad (6)$$

Burada; TDS: Toplam çözünmüş kation miktarları (meq/l), SD: Sodyum yüzdesi, SAR: Sodyum adsorbsiyon oranı, ESP: Değişebilir sodyum yüzdesi, Na: Değişebilir sodyum iyonu.

Yapılan çalışmalar SAR ile ESP değerlerinin lineer regresyon analizinde 0,923 gibi yüksek bir korelasyon katsayısı ile ilişkili olduğunu göstermiştir (Kinney, 1979). Pratikte ise ölçümü daha kolay olan SAR elde edilerek ESP dolaylı yollardan tayin edilmektedir. Ayrıca  $\text{Na}^+$  yüzdesinin kil dispersiyonunu ve sonuçta erozyonu etkileyen en önemli parametre olduğu ve TDS değerinin artmasıyla dispersiyon ihtimalinin azaldığı söylenebilir.

Killerin dispersif özelliklerinin tespiti için iki faktör oldukça önemlidir. Bunlar ESP değeri, diğeri ise erozyona neden olan suyun TDS ve SAR değerleridir (Aitchison ve Wood, 1965). Bu yaklaşımda, boşluk suyu SAR değerinin 1 veya 2'yi aşması halinde zemin dispersif olarak sınıflandırılır. Avustralya kriterleri olarak bilinen bu kriterleri ve kimyasal deney gözlemlerinden hareketle, dispersibilite sınıflandırması Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7 Dispersibilite ve boşluk suyundaki çözülmüş tuzlar arasındaki ilişki (Sherard vd., 1976)

### 3.2.1.3 Deneilerin değerlendirilmesi

Zemin numunelerinin laboratuara izole edilmiş kaplarda getirilmeleri ve bahsedilen tüm fiziksel ve/veya kimyasal deneylerde kullanılan numunelerin tabii su muhtevasında olmaları gereklidir. Numuneler kesinlikle etüvde kurutulmamalıdır. Bu deneyler iç erozyon potansiyelinin tespiti ve güvenilirlik açısından değerlendirilecek olursa, kimyasal deneylerin öncelik sırasını aldığı görülür.

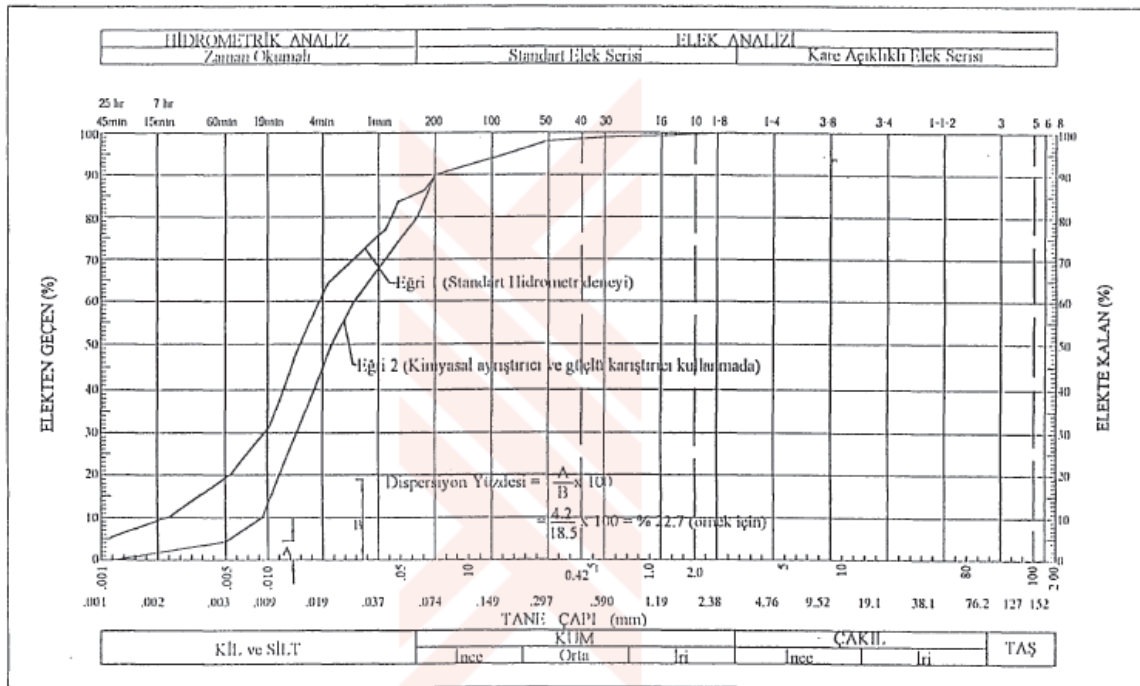
İğne deliği deneyi basit fiziksel bir deney olmakla beraber içsel erozyon olayını direkt olarak gözleme olanağı sağladığından önemlidir. Çifte hidrometri deneyi çoğunlukla başarılı sonuçlar vermekle birlikte elde edilen sonuçlar tek başına kullanıldığı takdirde yanıltıcı yorumlara neden olmaktadır. Dağılma deneyi, kalitatif bir deney olarak dispersibilite hakkında fikir vermekle birlikte yardımcı bir deney sınıfı olarak kabul edilmektedir. ESP deneyi Avustralya’da, bunun haricindeki deneyler ise ABD’de yaygın olarak kullanılmaktadır.

Farklı deneyler arasında, sonuçları açısından zaman zaman bazı uyumsuzluklar görülebilmektedir. Dispersiflik durumunu tayin açısından hangi deneylerin daha güvenilir olduğu ve bunların değerlendirilmesi aşamasında hangi yolların izleneceği konusunda, bazı araştırmacılar tarafından halen çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Ülkemizdeki ve diğer ülkelerdeki genel uygulama, numune üzerinde tüm dispersiflik testleri yaptırmak suretiyle bunların birlikte değerlendirilmesidir (Vural, 2012). Çizelge 3.11’de deneye dayalı yöntemlerin birbirine göre genel bir karşılaştırılması görülmektedir.

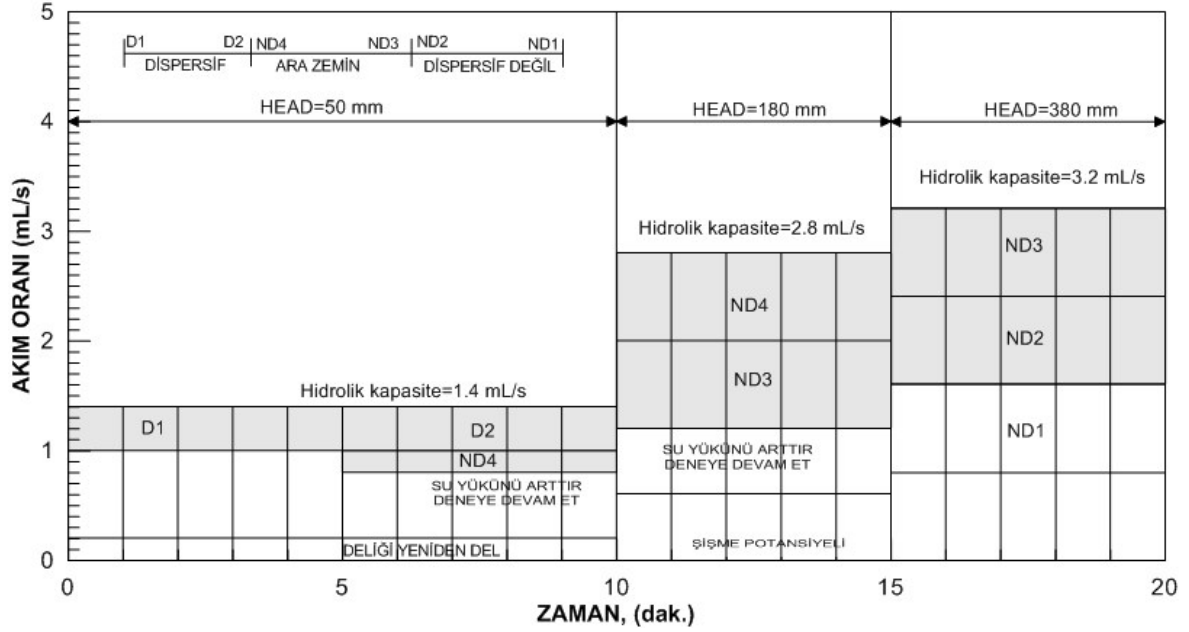


Çizelge 3.11. Deneylerin genel karşılaştırılması (Aydın ve Aydın, 2006)

DENEY	AVANTAJI	DEZAVANTAJI
Çifte Hidrometri Deneyi	Diğer fiziksel deneylere göre daha kesin sonuçlar verir.	Uzun ve hassas işlem gerektirir.
Dağılma Deneyi	Çok hızlı ve pratik şekilde zemin hakkında bir fikir verir.	Yardımcı deney olarak görülür tek başına güvenilir değildir.
İğne Deliği Deneyi	Hızlı ve basit olması ayrıca küçük ölçekli bir iç erozyon modelini gözleme imkanı vermesi	Tek başına güvenilirliği tartışılmaktadır.
Kimyasal Deneyler	Fiziksel deneylere göre oldukça güvenilir sonuçlar vermesi	Uzun ve hassas ölçüm işlemleri gerektirmektedir.



Şekil 3.8. Çifte hidrometre deney sonuçlarına bağlı dispersiyon yüzdesi (Savaş, 2008)



Şekil 3.9. İğne deliği deney sonuçlarına bağlı nicel değerlendirme yöntemi

### 3.2.2. Dispersibilitiyi etkileyen faktörler

Killerin dispersibilite karakteristiklerini etkileyen değişik faktörler vardır. Bu faktörlerin etki derecesi değişik zamanlarda farklı şekilde değerlendirilmiştir. Ancak killerin dispersif özellikleri üzerinde kilin kimyası ve mineralojik yapısı, fiziksel özellikleri, aşındırıcı su ve boşluk suyundaki çözülmüş tuzlar ile dolgu barajlarda kullanılan kilin sıkılığı ve dolgu içindeki suyun miktarı, önemli etkiler olarak tanımlanmıştır. Bu etkiler, kısaca aşağıda değerlendirilmektedir.

#### 3.2.2.1. Kıvam karakteristikleri ve kil muhtevası

Daha önce yapılan çalışmalarda zemin plastisitesi ile dispersiyon borulanması arasında bir ilişki tanımlanmıştı. Sherard vd. (1972); verilen bir kil zeminin kıvam limitleri ile dispersif ve dispersif olmayan killerin ayırt edilemeyeceğini ifade etmiştir. Bu durum, çoğu bilim adamı tarafından belirtilmiş olmasına rağmen, konu ile ilgili bazı temel yaklaşımlarda bulunulmuştur. Zeminin plastisite indisi dört'ten küçük ( $PI < 4$ ) olması halinde zeminin dispersif olmayacağı ve dispersif olan numunelerin hiçbirinin "yüksek plastisiteli silt" olmadığı görülmüştür. Daha sonraki yıllarda ülkemiz barajlarında

kullanılan kil zeminler üzerinde yapılan çalışmalardan da kıvam limitlerinin dispersibilite yönünden ayırt edici bir özellik taşımadığı görülmüştür (Tosun,1997). Dispersif killerin tanınmasında, yaklaşık bir yöntem olarak tanımlanan Skempton Aktivite Katsayısı'nın da etkili olmadığı belirtilmelidir. DSİ çalışmalarında bu katsayının bir ayırt edici kriter olmadığı ortaya konulmuştur (Tosun,1995, 1997).

Kil içeriğinin dispersif karakteristiklerinin belirlenmesinde etkili olup olmadığının ortaya konulması amacıyla değişik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalardan kil içeriğinin ayırt edici bir özellik olmadığı görülmüştür. Ancak bu çalışmalar sonucunda, “% 10'dan daha az kil ihtiva eden zeminlerin dispersif borulanmanın oluşması için gerekli koloidal yapıya sahip olmadıkları” tespiti yapılmıştır (Ryker,1977; Sherard vd., 1972).

### **3.2.2.2. Kilin minerolojik yapısı**

Avustralyalı araştırmacılar; daha iddialı bir şekilde “dispersiyon göçmesine, montmorillonit tipi kilin varlığının önemli ölçüde etkili olduğunu“ belirtmişlerdir (Stapledon and Casinader, 1972). Sherard vd. (1976); deneye tabi tutulan ve dispersif bulunan çoğu numunenin önemli ölçüde montmorillonit ihtiva ettiğini belirtmişlerdir. Ouhadı and Goodarzi (2006), montmorillonit tipi killerdeki dispersiyonun etkisini vurgulamışlardır. Kil minerallerin değişik fraksiyonlarının dispersif karakteristikleri, kimyasal çevre tarafından önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu nedendir ki; kil minerolojisi ve kilin kimyasal kompozisyonu, Avustralya'daki killerin dispersif karakteristiklerinin tanımlanmasında önemle dikkate alınmaktadır. Yüksek ESP (Değişebilir Sodyum Yüzdesi) değerleri, çoğunluğu monmorillonit ve diğer 2:1 tabakalı kil minerallerinden oluşan killerde vardır. Bazı illitler, yüksek dispersif kil özeliği taşımaktadır. Çok miktarda kaolinit içeren kil zeminlerde, dispersif davranış yaygın değildir. Ancak kaolinit içeren granit kökenli zeminlerde dispersif davranış gözlenmiştir (Bell and Walker, 2000).

### **3.2.2.3. Erozyona neden olan sudaki çözünmüş tuzlar**

Erozyona neden olan sudaki çözünmüş tuzların miktarı, zeminlerin dispersibilitesine etkiyen önemli bir değişkendir. Yapılan çalışmalarda görülmüştür ki; erozyona neden olan suyun düşük iyon konsantrasyonu, erozyona karşı düşük bir direncin oluşmasına neden olur. Çünkü itici kuvvetlerin büyüklüğü boşluk suyu içerisindeki iyon konsantrasyonuna bağlıdır. İtici kuvvetler, iyon konsantrasyonunun artmasıyla azalmaktadır. Halbuki Vander Walls çekme kuvvetleri iyonların konsantrasyonundan bağımsızdır (Resendiz, 1977). Erozyona neden olan suyun içindeki iyonların konsantrasyonu, boşluk suyu konsantrasyonuna eşit veya büyük olduğunda erozyon beklenmemektedir. Eğer erozyona neden olan suyun içindeki tuz konsantrasyonu, boşluk suyunun tuz konsantrasyonundan düşük ise, su osmos hareketi ile kil taneleri yüzeyine doğru hareket edebilir ve tabakanın şişmesine neden olur. Bir başka ifade ile, taneler arasındaki bağ zayıflar. Sonuç olarak erozyona neden olan suyun tuz konsantrasyonu düşük ise, borulanma açısından yüksek bir şüphe oluşmaktadır.

Bir başka önemli nokta, erozyona neden olan suyun içindeki iyonların tipidir. Bu faktör, zemin davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Erozyona neden olan su içindeki iyonların düşük değerliliğe sahip olması, borulanma şüphesini arttırmaktadır. Dispersif killerde oluşan borulanma, genellikle barajın ilk dolumu esnasında gelişmektedir. Ancak bunun aykırı örnekleri de vardır. Örneğin Avustralya'da tuzlu bir alana inşa edilen baraj, yüksek iyonik konsantrasyona sahip bir rezervuar suyu (26 meq/L) ile, sürekli sızma kaçağı olmasına rağmen, uzun yıllar hizmet vermiştir. Ancak sonradan rezervuara 32 km'lik bir boru hattı ile düşük iyonik konsantrasyonlu (1.2 meq/L) su derivasyonu yapılmıştır. Baraj, bu işlemten üç gün sonra göçmüştür (Knodel, 1991).

### **3.2.2.4. Sıkılık ve su muhtevası**

Dolguların, özellikle toprak dolgu barajların geçirimsiz zonunun, yeterli enerjiyle ve uygun su muhtevasıyla sıkıştırılması, dolgu stabilitesi açısından önem arz etmektedir. Dispersif olmayan zeminler açısından bile, bu iki faktör önemle dikkate alınmalıdır. Sıkıştırılmış dispersif killerin erozyonu üzerinde dolgunun kuru yoğunluğu ve başlangıç su muhtevası değişik zamanlarda araştırılmıştır. Bunlardan birinde, en düşük erozyonun

optimum su muhtevasının % 2-3 ıslak yönünde olduğu görülmüştür (Lewis and Schmit, 1977; Wan and Fell, 2004). Aynı araştırmacılar; aynı su muhtevasında oluşan erozyonun, kuru yoğunluğunun artmasıyla azalma eğilimini gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

DSİ uygulamalarında da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Aynı zeminin yoğunluğunun artmasıyla dispersibilite sınıfının değiştiği gözlenmiştir. Ancak burada mekanik erozyon ile dispersif erozyon ayrımı yapılmamıştır. Yoğunluğun ve su muhtevası kontrolünün, tek başına erozyonun oluşmasının önlenmesi yönünden yeterli olmadığı görülmeye rağmen, dikkatli kontrol ve optimum su muhtevası üzerinde sağlanan sıkıştırma işlemi, zemin kütlelerinin esnek davranışının gelişmesine neden olmaktadır. Bu şekilde farklı oturma çatlaklarının ve hidrolik çatlamların oluşması önlenmektedir.

Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Anabilim Dalında, sıklık derecesinin borulanma üzerindeki etkisini araştıran bir çalışma yürütülmüş ve sonuçları yayınlanmıştır (Tosun vd., 2002). Bu çalışmada, sıklık derecesinin erozyonun hızı üzerinde önemli bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma sırasında görülmüştür ki; dispersif zeminler uygun koşullarda sıkıştırılmış olsalar bile, yine benzer içsel erozyona maruz kalmaktadırlar.

#### 4.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

İnsanoğlu tarafından gerek yapılar için taşıyıcı tabaka olarak gerekse inşaat malzemesi olarak tarih boyunca kullanılan zemin, özellikleri su ile beton özellikleri kadar farklılık gösterebilen bir malzemedir. Bu nedenle arazide karşılaşılan zeminler, her zaman üzerinde gerçekleştirilecek mühendislik faaliyetleri için uygun özellikleri sağlamayabilmektedir. Bu nedenle, zeminin özelliklerinin mühendislik çalışması için yeterli olmaması durumunda çözüm için projenin değiştirilmesi, proje arazisinin değiştirilmesi veya zeminin arazide yerinde iyileştirilmesi gibi seçenekler kullanılabilir. ( Kılıç, 2008)

Stabilizasyon kavramı genellikle zeminin kayma mukavemetini artıran, geçirgenlik ve sıkışma özelliğini azaltan işlemler için kullanılır. Benzer şekilde Karayolları Teknik Sözlüğüne göre; zeminin mühendislikle ilgili özelliklerini ıslah etmek için, stabilizesini arttırmak veya muhafaza etmek amacıyla kimyasal ve mekanik işlemlere tabi tutulması olarak tanımlanmaktadır. (Kılıç, 2008)

Zemin özelliklerinin mühendislik yönünden uygun olmaması durumunda geoteknik mühendisi aşağıdaki alternatiflerden birine karar vermek durumundadır. Bunlardan birincisi stabilizasyon amacına uygun olmayan zemini olduğu gibi kabul etmek, ikincisi stabilizasyon amacına uygun olmayan zemini atıp, yerine amaca yönelik uygun zemin yerleştirmek, üçüncüsü stabilizasyon amacına uygun olmayan zemini ıslah etmektir. Zeminlerin dirençlerini arttırmak veya belirli koşullarda sahip oldukları direnci her türlü hava koşullarında korumak ve aynı zamanda değişken yük ve iklim koşullarının zararlı etkileri altında uzun zaman dayanacakları hale getirilmeleri amacıyla, mekanik veya katkı maddeleri kullanılarak iyileştirilmesi işlemi stabilizasyon olarak tanımlanmaktadır. Zeminlerin üzerinde yapılan işlemler sonucunda, hacimsel stabilite, geçirimsizlik, sıkışabilirlik ve konsolidasyon gibi mühendislik özelliklerinde pozitif değerler elde edilmektedir. Zeminlerin stabilizasyonu, zeminin kayma direncini, dayanımını arttıran, geçirimsizlik ve hacimsel değişim yeteneğini azaltan işlem olarak da tanımlanmaktadır (Angın vd., 2005).

#### 4.1. Dispersif Zeminlerin Stabilizasyonu

Pratikte çok kullanılan yollardan biri kimyasal katkı malzemeleri kullanarak dispersif zemin özelliklerini değiştirmektir. Özellikle en geçerli tedbir, zeminin Na<sup>+</sup> kasyonu muhtevasını düşürmektir. Bunun için sönmüş kireç (Ca(OH)<sub>2</sub>) kullanılması durumunda Ca<sup>++</sup> kasyonu, Na<sup>+</sup> kationunun yerine geçerek zemindeki Na<sup>+</sup> kasyonu muhtevasının azalmasına ve dispersif karakterin değişmesine neden olmaktadır (Forbes vd., 1980). Zeminin kuru ağırlığına göre %1,0–2,0 oranında sönmüş kireç ilavesinin dispersif zeminleri tamamen değiştirerek dispersif olmayan karaktere dönüştürdüğü görülmüştür (Aydın ve Aydın, 2006).

Dispersif killerin erozyonunu önleyen diğer bir kimyasal katkı malzemesi ise alüminyum sülfattır (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>). Zeminin kuru ağırlığına göre %0,5–2,0 oranında alüminyum sülfat ilavesi, dispersif karakteri bertaraf etmektedir (Landau and Altschaeffl, 1977). Alüminyum sülfatın zemine tatbiki, kolay eriyebilir olması nedeniyle, kireçten daha ucuz ve daha az tehlikelidir. Bu tür katkıların kile ilavesi; baraj gövdesi üzerinde olabileceği gibi, kilin temin edildiği ocakta da gerçekleştirilebilir. Ancak bu tür uygulamaların bir dezavantajı, işleme tabi tutulacak malzeme hacminin çok büyük olması durumunda ekonomik olmamasıdır (Aydın ve Aydın, 2006). Bu durumda zeminle etkileşime geçen rezervuar suyuna kimyasal madde katılması daha ekonomik olmaktadır. Kimyasal işlemin, su veya zeminden hangisine yapılması gerektiğine karar vermek için mutlaka ekonomik mukayese yapılmalıdır. Bu yönetime dayalı uygulamalarda başarılı sonuçlar alınmadığını rapor eden araştırmacılar olduğu gibi (Ingles, 1972), Avustralya’da rezervuar suyunun alçı (CaSO<sub>4</sub>) ile muamelesi sonucu başarılı olmuş uygulamalara ait raporlar da mevcuttur (Grant vd., 1977).

Savaş (2008), dispersif killerin tanımlanmasında etkili olarak kullanılan iğne deliği deneyinin yeniden tasarımını gerçekleştirmiştir. Deney sistemi, standart zemin örneklerinin iki, üç ve beş katı büyüklükte örneklerin kullanılabilmesi gibi geliştirilmiş ve her boyut için tasarım kartları oluşturulmuştur. Teorik ve deneysel çalışmalardan elde edilen veriler, boyut etkisi dikkate alınarak mukayeseli olarak değerlendirilmiş ve değerlendirmede bulanık mantık ve yapay sinir ağları yöntemleri kullanılmıştır. Tanımlanmış örnekler üzerinde farklı boyutta deneyler yapılarak, geliştirilen sistemin hassasiyeti ölçülmüştür.

Çalışma sonucunda, dispersif killerin tanımlanmasında daha gerçekçi verileri tahmin etmek için büyük boyutlu örneklerin etkili olarak kullanılabilceği görülmüştür.

Türköz vd. (2011), magnezyum klorür solüsyonunun kil zeminlerin şişme potansiyeli ve dispersibilite karakteristikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla, Afyon ilinden elde edilen üç değişik zemin numunesi üzerinde tanımlama ve kompaksiyon deneyleri öncelikli olarak yapılmıştır. Numunelerin şişme potansiyelinin belirlenmesinde şişme yüzdesi deneyleri, dispersibilite özelliklerinin değerlendirmesinde de iğne deliği deneyi, dağılma deneyi, çifte hidrometri deneyi ve kimyasal deneyler yapılmıştır. Dispersif özelliğe ve şişme potansiyeline sahip bu numunelerin magnezyum klorür solüsyonu kullanılarak iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Katkının etkisini değerlendirmek için standart Proctor enerjisinde ve farklı magnezyum klorür katkı oranlarında ( %0, 1, 3, 5, 7, 10) hazırlanan numuneler üzerinde şişme ve dispersibilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, problemlili kil zeminlerin iyileştirmesinde magnezyum klorür solüsyonun kullanılabilceği ve özellikle %7 katkı oranında sonra etkin bir iyileştirme sağlandığı görülmüştür.

Tosun ve Savaş (2001), dolgu barajlarda oluşan göçmenin önemli bir nedeni olarak içsel erozyon gösterilmektedir. İçsel erozyon, zemin cinsine göre farklı şekilde oluşmaktadır. Bu tip göçmenin oluşmasında da, zeminlerin dispersif özelliğinin önemli bir etkisi vardır. Bu killerin doğru tanımlanması, sonradan oluşacak problemlerin çözümündeki zorluk ve yüksek maliyetten dolayı önemli bir aşama olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada Afyon, Eskişehir ve Bilecik illerinde inşa edilmekte olan veya işletme aşamasında bulunan on barajın kil ocağından alınmış düşük plastisiteli yirmi yedi adet zemin örneği üzerinde, önce tanımlama deneyleri yapılmış, daha sonra çifte hidrometri, dağılma ve iğne deliği gibi dispersibilite deneyleri gerçekleştirilmiş ve bu deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

Aydın ve Aydın (2006), çalışmalarında, baraj mühendisliğinde önemli ekonomik bir malzeme olarak kullanılan killerde, dispersibilite ve bundan kaynaklanan içsel erozyon olayı ele alınarak, dispersibilitenin nedenleri ve tespit yöntemlerini tartışmışlardır. Ayrıca bu olayın oluşmasını önlemek amacıyla uygulamada dolgu baraj gövdesi içerisine yapılacak filtre, dispersif özellikteki kil çekirdeğin etrafının dispersif olmayan kil ile



koruyucu bir zarf içerisine alınması ve bunun haricinde pratikte çok kullanılan kile sönmüş kireç ilavesi, alüminyum sülfat ilavesi ve rezervuar suyuna alçı ilavesi gibi alınabilecek tedbirler tartışmaya sunmuşlardır.

#### **4.2.Şişen Zeminlerin Stabilizasyonu**

Hacim değiştirme özellikleri taşıyan kil minerallerine sahip şişen killere ülkemizin birçok bölgesinde rastlanmaktadır. Şişen killerin hacim değiştirme kapasitesine sahip olması düşey hacim değişimine neden olmakta ve yapısal hasarlara neden olmaktadır. Karayolu, istinat duvarları ve elastik zemin üzerinde inşa edilen plak temeller gibi birçok inşaat mühendisliği uygulamalarında zeminin hacim değiştirme özelliğine sahip olması durumunda yapısal problemler ve dizayn problemleri ile karşılaşılabilir. Hafif yüklenmiş yapılarda temel zemininin şişme özelliği gösteren kil minerallerine sahip şişen kil içermesi durumunda yapının aktardığı düşük düşey basınç nedeniyle yapı farklı oturmalara maruz kalmakta ve büyük hasarlar meydana gelebilmektedir. İklim ve çevre koşullarının değişmesi şişen killerin zemin emme basınçlarında önemli miktarda değişiklik oluşturmaktadır (Angın vd., 2005). Şişen zeminlerin iyileştirilme yöntemleri aşağıdaki başlıklar altında toplanabilir:

- Kimyasal katkı maddeleri
- Ön ıslatma
- Sıkıştırma kontrolü ile zeminin yerleştirilmesi
- Sürsaj yüklemesi
- Isı ile iyileştirme
- Elektrokimyasal yöntemlerle zemin iyileştirilmesi
- Su muhtevasının korunması

##### **4.2.1. Kimyasal katkı maddeleri**

Problemlili zeminler kireç, çimento, uçucu kül gibi katkı malzemeleri kullanılarak da stabilize edilirler. Bu malzemeler su ile birlikte kile karıştırıldığında zeminlerin birçok mühendislik özelliğine pozitif yönde etkide bulunur. Zemin stabilizasyonu için en çok kullanılan katkı malzemesi kireçtir.

#### **4.2.1.1. Kireç stabilizasyonu**

Kireç insanoğlunun kullandığı ilk kimyasal yapı malzemelerinden biridir ve birçok zemin içinde stabilizasyon amacıyla kullanılabilir. Kil zeminlere kireç katılması kilin plastisitesinin ve şişme potansiyelinin azalmasını sağlar. Kireç stabilizasyonu, zeminde oluşacak olan şişmeyi azaltmak ve işlenebilirliği artırmak için çoğu projede kullanılmıştır. Özellikle karayolu projelerinde başarıyla uygulanmaktadır. Kireç katkısı aynı zamanda malzemenin kompaksiyon karakteristiklerini de etkiler. Maksimum kuru birim hacim ağırlık azalırken, optimum su muhtevası artar. Şişen killerin stabilizasyonu için kullanılan farklı kireç tipleri bulunmaktadır. (Taşçı, 2011)

Bu kireçler arasında kalsiyum yönünden zengin sönmüş kireç ve sönmemiş kireç pratikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Şişen killerin stabilizasyonu için gereken kireç miktarının; ağırlıkça %2-8 arasında olduğu ifade edilmektedir (Chen, 1988). Sönmemiş kireç (CaO), kireç taşının yüksek sıcaklıkta işlenmesiyle elde edilen bir malzemedir. Sönmüş kireç (Ca(OH)<sub>2</sub>) ise sönmemiş kirecin suyla kimyasal reaksiyona girmesi sonucunda oluşur.

#### **4.2.1.2. Çimento stabilizasyonu**

Portland çimentosunun hidratasyonu, değişik bileşik ve jeller oluşturan karmaşık bir puzolanik reaksiyondur. Kil ile çimento karışımının sonuçları, kireç stabilizasyonu sonuçları ile benzerlik göstermektedir. Bu uygulama ile likit limit, plastisite indisi, zeminin hacim değişikliği potansiyeli azalır ve rötre limiti ile kayma dayanımı artar (Chen, 1988). Ancak yüksek plastisiteli killer için portland çimentosu kireç kadar etkili değildir. Kireç ile iyileştirilemeyen zeminlerde, çimento kullanımı genellikle başarılı olmaktadır. Portland çimentosunun etkili olduğu killer için karıştırma, kireç uygulamasında yapıldığı gibi yapılmaktadır. Ancak bu teknikte çimento ilavesi ile son karıştırma arasında geçen zaman, kireç uygulamasında dikkate alınandan daha kısa olmalıdır. Çünkü portland çimentosu daha kısa hidratasyon ve priz süresine sahiptir. % 2-6 oranında portland çimentosu muhtevası, zeminin yarı rijit bir kaplama gibi davranmasına yol açar. Ancak çimento ile stabilize edilen bir malzemenin çatlama eğilimi vardır. Kullanımdan önce ve sonra bu etkisi göz önünde bulundurulmalıdır (Gündüz, 2008).

### **4.2.1.3. Uçucu kül stabilizasyonu**

Uçucu kül; alüminyum, silisyum, çeşitli oksitler ve alkaliler içeren puzolanik bir malzemedir. Kendi kendine bağlayıcı özelliği ya hiç olmayan ya da çok az olan, ancak su ve kireçle birlikte kimyasal reaksiyona girdiklerinde bağlayıcılık kazanan malzemelere puzolan malzeme denir. Uçucu kül bu özelliği ile kireç ve kil arasındaki puzolanik reaksiyonu artırmak ve böylece zeminin tane çapını büyütmek için zemine ilave edilir. Bunun yanında yapısında kireç içeren uçucu küller de vardır ve bunlar normal uçucu küllerle karıştırılarak daha etkili sonuçlar elde edilebilir (Taşçı, 2011).

Öntürk(2011), Seyitömer uçucu külü, yapay granit atığı (polisaj) ve bağlayıcı malzeme olarak da kireç kullanılarak, mevcut olan zayıf zeminlerin iyileştirmesi üzerine etkilerini araştırmıştır. Esas zemin numunesi olarak ele alınan kaolen kiline uçucu kül, polisaj ve kireç belirli oranlarda katılarak homojen karışımli numuneler oluşturulmuştur. Hazırlanan yapay numunelere kireç ve uçucu kül miktarı %15 oranında sabit tutularak, %10, %15, ve %20 oranlarında polisaj malzemesi ilave edilerek deneyler yapılmıştır. Çalışmada kullanılan her malzemenin laboratuvar ortamında özgül ağırlık değerleri, zemin sınıflandırma deneyleri ve kompaksiyon deneyleri (Atterberg limitleri, hidrometre, yıkamalı elek analizi) yapılmıştır. Yapılan kompaksiyon deneylerinden elde edilen sonuçlara göre en iyi sonuç alınan zemin numunesi üzerinde de California Taşıma Oranı (CBR) deneyi yapılarak elde edilen yeni zemin numunesinin taşıma kapasitesi bulunmuştur. CBR deneyleri için hazırlanan numuneler 1 gün, 7 gün, 14 gün, 28 gün ve 56 gün sürelerinde sabit nem ve sabit sıcaklığa sabit bir ortamda bekletildikten sonra deneye tabi tutulmuşlardır. Yapılan tüm deneysel çalışmalar sonucunda kaolen kiline ilave edilen katkı maddeleri ile hazırlanan zemin numunesinin mevcut durumdaki zeminin mukavemet değerlerini artırdığı gözlemlenmiştir.

Ferguson (1993), çalışmasında altı farklı zemin üzerinde uçucu kül katkısının zeminin şişme potansiyelini düşürdüğü sonucuna varmıştır. %14 civarında şişme potansiyeli olan kil zemine %16 uçucu kül katkısıyla şişme potansiyelinin %0.8 değerine kadar indiğini göstermiştir.

Nicholson ve Kashyap (1993), tropikal Hawai kiline (yüksek şişme potansiyeline sahip) uçucu kül ve kireç eklenmesiyle iyileştirilmesinde CBR değerinde artma, sıkışma özelliklerinde iyileşme ve şişme potansiyelinde azalma olduğunu belirlemişlerdir.

Aksoy vd., (2008), yaptıkları çalışmada killi bir zemin, Tunçbilek uçucu külü ile stabilize edilmiştir. Killi zemine %0, %3, %5 ve % 10 oranlarında uçucu kül katılarak dört farklı numune elde edilmiştir. Optimum su muhtevasında hazırlanmış her bir numune üzerinde 1 günlük, 7 günlük ve 30 günlük serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Uçucu kül ilavesi ile, zeminin plastisitesi pek değişmezken, optimum su muhtevası ve serbest basınç mukavemeti artan uçucu kül oranı ile artmıştır.

Tan vd., (1996), uçucu kül katkısının kilin mukavemet özelliklerine olan etkisini araştırmıştır. Deneysel sonuçlarda, kilin kayma direncinde önemli artışlar meydana gelmiştir. %20 uçucu kül-%80 kil karışımının permabilitesi  $10^{-9}$  m/s olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, uçucu küllerin zemin stabilizasyonunda, katı atık sahalarında, taban ve örtü tabakalarında kullanılabileceğini göstermektedir.

Wasti (1990), uçucu küllerin geoteknik uygulamalarda kullanılabilirliğini araştırmak üzere, Soma ve Çatalağzı Termik santrallerinden alınan uçucu küllerin geoteknik özelliklerini (indeks, kompaksiyon, kayma mukavemeti ve kompressibilite) incelemiştir. Uçucu küllerin toprak dolgu malzemesi yerine ve yüksek plastisiteli killerin iyileştirilmesinde kullanılarak değerlendirilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Çokça (1997), çalışmasında Soma uçucu külüne kireç, çimento ve bentonit ekleyerek hazırladığı karışımlara yaptığı permeabilite deneyleri sonucunda Soma uçucu külünün tek başına atık depolama alanlarında istenen permeabilite katsayısını sağlayamadığı, kireç çimento ve bentonit katkısıyla geçirimsizlik tabakaları için istenen permeabilite katsayısı değerine ulaşıldığını göstermiştir.

Chu ve Kao (1993), çalışmalarında uçucu kül ve cüruf katkısıyla 12 farklı karışım üzerinde yaptıkları konsolidasyon deneylerinde uçucu kül ve cüruf katkısının artmasıyla sıkışabilirliğin azaldığını belirlemişlerdir.

Aytekin(2009), çalışmasında Afşin-Elbistan-B Termik Santrali uçucu külünün zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini deneysel olarak incelemiştir. Zemine katılan uçucu kül ilk anda likit limit ve plastik limit değerlerini arttırmaktadır. Plastisite indisi düşmektedir. Plastisite indisinin düşmesi işlenilebilirliği arttırmaktadır.. Çalışmalardan elde edilen sonuca göre; zemine uçucu kül katkısı ile maksimum kuru birim hacim ağırlık değerini azaltmakta, optimum su muhtevasında ise artış meydana getirmektedir. Kuru birim hacim ağırlığı artan kompaksiyon enerjisi ile arttırılabilmektedir. Uçucu kül katkısı zeminin kompaksiyon özelliklerini iyileştirmektedir. Uçucu kül katkısı ve kür süresinin artmasıyla içsel sürtünme açısı ve kohezyonda belirgin artış meydana gelmiştir. Kayma mukavemetin artmasında kohezyondaki artma daha etkindir. Uçucu kül katkısıyla permeabilite katsayısı ve konsolidasyon katsayısı azalmıştır. Ön konsolidasyon basıncının artışı boşluk oranının azaldığını göstermektedir. Afşin – Elbistan Termik Santrali uçucu külünün zemin stabilizasyon çalışmalarında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır

#### **4.2.1.4 Diğer katkılarla stabilizasyon**

Zemin stabilizasyonunda tuz ve organik bileşikler gibi diğer bazı katkılarda kullanılmaktadır. Bu amaçla en çok kullanılan tuzlar sodyum klorit ve kalsiyum klorittir. Zemin özellikleri üzerinde sodyum kloritin etkisi değişkenlik göstermektedir. Bu uygulama genellikle yüksek likit limite sahip zeminlerde büyük bir etkiye sahiptir. Zemin tipine bağlı olarak sodyum klorit, büzülme limitini ve kayma dayanımını artırır. Sodyum kloritle reaksiyona giren zeminlerde, aynı zamanda don kabarmasında kontrolü sağlanmaktadır. Kuru zemin ağırlığının %1'i oranında kalsiyum klorit kullanımı, çoğu zemin stabilizasyonu için yeterlidir. Kalsiyum klorit kullanımının bir de dezavantajı mevcuttur. Bu kalsiyum kloritin zemin içinden kolayca yıkanmasıdır. Bu uygulama yapılmadan önce nispi nem miktarının, en az %30 oranında olması da, uygulamanın diğer bir dezavantajını oluşturmaktadır (Nelson and Miller, 1992). Zeminlerin stabilizasyonu için değişik organik bileşikler kullanılmaktadır. Piyasada farklı uygulamalarda kullanılabilen farklı bileşikler mevcuttur. Bu sebepten dolayı, uygulamaya geçilmeden önce arazide eneyler yapılmak suretiyle kullanılacak bileşik tercih edilmelidir. Unutulmaması gereken ise organik bileşiklerin başarısının sınırlı seviyede olduğudur (Gündüz, 2008).

Gündüz (2008), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi kampüs alanında yer alan yüksek

şişme potansiyeline sahip Meşelik killerin Tinkal atığı ile stabilizasyonunu araştırmıştır. Araştırmada Tinkal atığı şişme yüzdesi ve serbest basınç değerlerinin zamanla değişimi incelenmiştir. Deney sonuçlarında, Tinkal atığının killerin şişme potansiyelinin kontrolünde başarı ile kullanılamayacağı, taşıma gücüne de katkısının olmadığı belirlenmiştir. Bu aşamada Tinkal atığının bünyesinde bulunan kil mineralleri bulunması ve dolomitin kil mineralleriyle herhangi bir reaksiyon vermemesi sonucu elde edilmiştir.

Türköz (2001),Eskişehir Osmangazi Üniversitesi kampüs alanında yer alan yüksek şişme potansiyeline sahip Meşelik killerin kireç katkısı ile stabilizasyonunu araştırmıştır. Araştırmada sönmüş kireç katkısı-şişme yüzdesi, kireç katkısı-şişme basıncı ilişkisi ile şişme yüzdesinin ve şişme basıncının zamanla değişimi incelenmiştir. Bu amaçla üç ayrı lokasyondan alınan, standart Proktor ve modifiye Proktor sıkıştırma koşullarında ve farklı kireç katkı seviyelerinde (%0, 1, 3 ve 5) hazırlanmış 110 ayrı numune üzerinde klasik ödometre cihazı ile serbest şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Deney sonunda, sönmüş kireç katkısının killerin şişme potansiyelinin kontrolünde başarıyla kullanılabileceği, bu katkının %3 seviyesinden sonra etkili olduğu ve etkinin yüksek enerji seviyelerinde nispi olarak daha yüksek görüldüğü belirlenmiştir.

Kılıç (2008), laboratuvarında farklı oranlarda çimento karıştırılarak hazırlanmış bazı kil zemin örnekleri üzerinde veyn, serbest basınç ve üç eksenli basınç deneyleri yapılarak, çimento stabilizasyonunun bu zeminlerde etkinliği belirlenmeye çalışmıştır. Çimento katkısının killerin mukavemetinde yol açacağı artışı incelemek amacı ile West Ashling, Hamble ve Emsworth bölgelerinden alınan kil numunelerine farklı oranlarda çimento katılarak, çimento ile stabilizasyonun killin mukavemetine olan etkisi araştırılmıştır. Çimento katkısının kilin mukavemetine etkisini araştırmak için %6, %10 ve %15 çimento katkılı numunelerde veyn ve üç eksenli basınç deneyleri %20 ve %25 çimento katkılı numunelerde ise 7. 14. ve 28. günlerde serbest basınç deneyleri uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda farklı çimento miktarları (%6, %10, %15, %20 ve %25) eklenerek hazırlanmış West Ashling, Emsworth ve Hamble killlerinden elde edilen numunelerde çimento ile yapılan iyileştirmenin mukavemeti artırdığı gözlenmiştir.

İpek (1998), şişen zeminlerin kireç, çimento ve uçucu kül kullanılarak stabilizasyonunu incelemiştir. Çalışmada şişen bir zemin %0-8 arasında çimento ve kireç

ile stabilize edilmiştir. Ayrıca %0-25 arasında uçucu kül kullanılarak stabilize edilmiş, 7 ve 28 günlük kürlerin etkileride incelenmiştir. Deneyler sonucunda; katkı maddesindeki artışın, silt miktarını arttırdığı, kil miktarını düşürdüğü, likit limit ve plastisite indisinin azaldığı, %8 çimento, %8 kireç ve %25 uçucu kül katkısının zemin sınıfını değiştirdiği, ilave malzeme miktarının artması ile zemin aktivitesinin azaldığı, kür süresinin şişme için gereken zamanı şişme potansiyelinde neden olduğu azalmaya oranla daha fazla azalttığı, %3-5 mertebesinde katkı maddesinin şişme potansiyelinin azaltılmasında daha önemli etkiye sahip olduğu bulunmuştur.

Yılmaz (2014), çimento fırını tozunun şişme potansiyeline etkisini incelemiştir. Kullanılan şişen zemin numunesi laboratuvarda kaolin ve bentonit karıştırılarak hazırlanmıştır. Çimento fırını tozu ağırlıkça %0 ila %12 oranında katılmıştır. Örneklerin dane çapı dağılımı, kıvam limitleri, şişme yüzdeleri ve şişme hızı tespit edilmiştir. Ayrıca 7 ve 28 gün kür uygulanmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonucunda, çimento fırını tozu eklenmesinin laboratuvar ortamında yapay olarak hazırlanmış şişen zeminin şişen potansiyeline ve şişme hızına etkisine bakılmıştır. Çalışmada, %12 çimento fırın tozu kullanılarak şişen zeminin şişme yüzdesi kürsüz %6,63 den %6,74'e, 7 gün kür ile %35,58'den %6,32'ye ve 28 gün kür ile %33,63'den %6'ya düşmüştür. Deneyler sırasında elde edilen olumlu sonuçlar neticesinde, şişen zeminlerin çimento fırın tozu kullanılarak iyileştirilebileceği sonucuna varılmıştır.

Waddah S. Abdullah and Ahmed S. Alsharqi (2011), çalışmasında şişen ve büzülen zeminlerin çimento kullanılarak iyileştirilmesine üzerine çalışmıştır. Bu çalışmada orta derecede genleşen zeminler ( $12 < PI < 24$ ) seçilmiştir. Zemin numuneleri çeşitli çimento yüzdeleriyle karıştırılmıştır (1%, 2%, 3% ve 4%) ve kalıba ön-ıslanma kuru yoğunluk ve nem oranı öngörülerek dökülmüştür. %2 oranında çimento içeren numune 28 gün kür edilmiştir orta derecede genleşen zemin için yeterli düşüş sağlanmış ve şişme yüzdesi %7.4'ten %0.4'e kadar düşmüştür. Potansiyel şişme basıncı, her nasılsa, zarar verici yüksek değerden(333kPa) aynı şartlarda iyileştirilmemiş zemin için tolere edilebilir değere (20 kPa) düşmüştür. Şişme potansiyeline karşı zaman ilişkisi doğal ve iyileştirilmiş zemin için dikedörtgen hiperbolik fonksiyon olarak tam bir şekilde temsil edilir.

Aziz (2012), lignin, kablo kaplaması plastik, pirinç kabuğu unu , pirinç kabuğu külü

ve araba lastiği külü kullanarak şişen killerin iyileştirilmesine çalışmıştır. Deneylerde kullanılan şişen kil kırmızı kil ile bentonitin karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Lignin, kablo kaplaması plastik ve pirinç kabuğu unu ağırlıkça %20 ye kadar ve pirinç kabuğu külü ile araba lastiği külü ise %10 a kadar değişik oranlarda şişen kile katılmıştır. Hazırlana numuneler üzerinde kıvam limitleri, şişme ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlarında %20 lignin katılan numune hariç bütün numunelerde likit limit ve plastisite indislerinde azalma gözlenmiştir. Ayrıca, kablo kaplaması plastik, pirinç kabuğu unu ve pirinç kabuğu külü oranı artmasıyla şişme yüzdesinde azalma gözlenmiştir. Bununla beraber, lignin %10 a kadar ve araba lastiği külünde %5 e kadar şişme oranında azalma gözlenmiştir. Lignin ve araba lastiği külü oranlarının artmasıyla şişmede yüzdesinde artış gözlenmiştir. Lignin, pirinç kabuğu unu ve pirinç kabuğu külü katılması ve ayrıca kür zamanının şişen kilin serbest basınç dayanımı üzerinde iyileştirici etkisi olduğu gözlenmiştir.

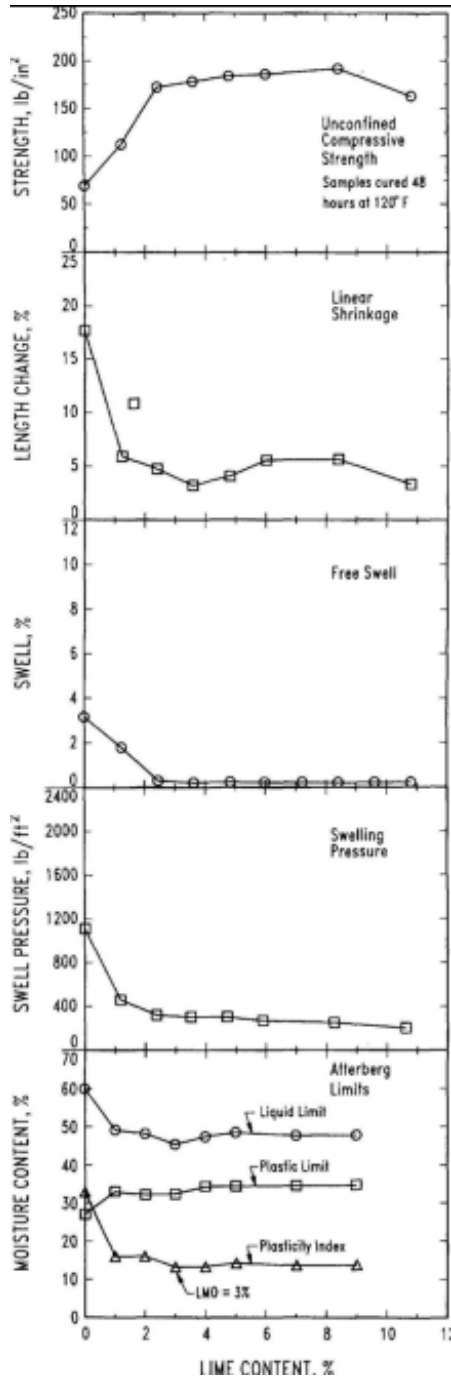
Genç (2009), yaptığı çalışmada; kaolin kili ile yüksek plastisiteli ve şişme özelliği gösteren montmorillonit (bentonit) kili belirli oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25, %30) karıştırılarak altı farklı karışım hazırlanmıştır. Standart Proktor enerjisi ile çeşitli su muhtevalarında sıkıştırılan numuneler üzerinde, ASTM - D4546'da belirtilen A deney yöntemi kriterlerine göre ödometre aletinde şişme deneyleri yapılarak, karışımların şişme özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla öncelikli olarak numunelerin indeks ve mühendislik özellikleri belirlenmiştir. Numuneler üzerinde dane birim hacim ağırlığı ( $\gamma_s$ ) deneyleri yapılmış, kil numunelerinin kıvam özellikleri, likit limit ve plastik limit deneyleriyle bulunmuştur. Standart Proktor (kompaksiyon) deneyi yapılarak ödometrede şişme deneyine tabi tutulan karışımlara ait numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlarda bentonit oranı arttıkça şişme yüzdesi de artmaktadır. Şişme yüzdesi su muhtevasının artması ile azalmaktadır. Bentonit yüzdesi arttıkça likit limit ve plastisite indisi lineer olarak artmaktadır. Modifiye Serbest şişme deneyinde ise ağırlıkça bentonit oranı arttıkça şişme yüzdesinin arttığı gözlenmiştir.

Harichane vd (2011), çalışmalarında doğal puzolanla kirecin kombine edilerek zemin iyileştirmedeki uygulamasını incelemiştirler. Bu çalışmada laboratuvar testleriyle kohezyonlu zeminlerin fiziksel ve mekanik karakteristiklerinin üzerindeki etkisi doğal puzolan, kireç veya ikisi kombine edilerek incelenmiştir. İki kohezyonlu zemine doğal



puzolan, kireç ve doğal puzolan –kireç karışımı sırasıyla %0-20 ile %0-8 olarak ilave edilmiştir. İyileştirilmiş zeminler 1, 7, 28 ve 90 gün kür edilmiştir. Sonuçlar gösterdiği kohezyonlu zeminlerin stabilizasyonunda doğal puzolan ve kireç başarılı olmuştur.

Garaisayev (2008), şişme potansiyeli yüksek olan bir kilin sönmüş kireç ile stabilizasyonu incelemiştir. Bu amaçla, İstanbul-Esenyurt'tan alınan ve şişme özelliği olan bir zemin üzerinde çalışılmıştır. Bu kilin farklı miktarlarda kireç ile stabilize edilmesi durumunda çeşitli geoteknik özelliklerinde meydana gelecek olan değişiklikler incelenmiştir. Arazide kilin yeterince ufalanmamış olması, topraklar halinde iken kireç ile karıştırılması ve kompaksiyon öncesinde su ile ıslatılmaması/bekletilmemesi gibi faktörler laboratuvarında temsil edilerek numuneler hazırlanmıştır. Bu parametreleri kapsayacak şekilde hazırlanmış numunelerin mikro yapıları incelenmiştir. Bunun için elektron mikroskop ile ESEM deneyleri, kimyasal analiz deneyleri ve boşluk yapısının nasıl değiştiğini gösteren cıvalı porozimetre analizleri yapılmıştır. Kireç ilavesi ile şişen kilin kıvam limitlerinde değişiklikler meydana gelmiştir. Bunun sonucunda zemin sınıfı değişmiştir. Zeminin kompaksiyon özelliklerinde de değişiklikler olmuş, kireç kilin işlenebilirliğini artırmıştır. Yapılmış olan serbest basınç deneyleri sonucunda %3 kireç ilavesinin kısa dönem etkilerini oluşturmakla birlikte, uzun dönemde yeterince çimentolaşma oluşturamadığı ve serbest basınç değerlerinde önemli değişikliklere sebep olmadığı görülmüştür. %6 ve %9 oranında kireç ile hazırlanan numunelerde serbest basınç mukavemetinde önemli artışlar meydana gelmiştir. Tüm kireç ilaveleri için Elastisite Modülü değerlerinde ise önemli miktarda artış oluşmuştur.



Şekil 4.1. Killi bir zeminde kireç stabilizasyonu sonucu meydana gelen geoteknik değişimler (Rollings ve Rollings, 1996)

#### 4.2.2. Ön ıslatma

Bu yöntem; su içeriği yüksek olan zeminlerin daha düşük şişme göstereceği ilkesine dayanır. Eğer zemin yeterince yüksek su içeriğine sahip ise önemli bir hacim değişimi olmayacağı kabul edilebilir. Plastik limit değerinin üzerine kadar ıslatılan zeminlerde şişme potansiyeli önemli ölçüde azalmaktadır. Ancak bu yöntemin kullanımını sınırlandıran önemli sakıncalar mevcuttur. Şişen zeminler genellikle çok düşük permeabilite değerlerine sahiptirler bu nedenle zemini yeterince ıslatmak çok uzun zaman alabilir. Ayrıca zeminin su içeriği arttırıldığında zemin dayanımının ve şev stabilitesinin önemli ölçüde azalabileceği unutulmamalıdır. Su içeriği arttırılan kısımdaki su zamanla alt tabakadaki zemine etkiyecektir. Bunun da yapı üzerinde beklenmeyen hasarlara neden olabileceği unutulmamalıdır (Çetin, 2003).

#### 4.2.3. Sıkıştırma kontrolü ile zemin iyileştirmesi

##### 4.2.3.1. Kaldırıp yeniden yerleştirme

Şişme özelliği gösteren bir zemini kaldırarak yerine şişmeyen zemin konulması sağlam temel zemini oluşturmak için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem şişen tabaka düşük bir kalınlığa sahip ise bu tabakanın tamamının kaldırılması, şişen tabakanın çok kalın olması durumunda ise yeterli kalınlığın belirlenip bu noktaya kadar olan kısmın değiştirilmesi ilkesine dayanır. Kaldırılması gereken kısmın kalınlığı, alttaki zeminin şişme potansiyeline bağlı olarak belirlenir. Dolgu malzemesi olarak kullanılacak zeminin, alt tabakaya su iletmemesini sağlamak amacıyla dolgu malzemesi olarak granüler zeminlerin kullanılması önerilmez. Dolgu tabakası yüksek yoğunluklarda sıkıştırılarak, yüksek taşıma gücü elde edilebilir. Bu yöntem özel aletler gerektirmediği ve kısa sürede tamamlanabildiği için ekonomik olabilir. Ancak dolgu malzemesinin yapıya yakın bölgede bulunması gereklidir. Aksi halde malzemenin taşınması fazladan maliyet getirebilir. Bazı durumlarda kaldırılması gereken tabaka pratik olarak uygulanmayacak kadar yüksek olabilir (Çetin, 2003).

#### **4.2.3.2. Örselevip veniden sıkıştırma**

Şişen zeminlerde şişme potansiyeli kuru yoğunluğu azaltarak düşürülebilir. Optimum su içeriğinin üzerinde en az kuru yoğunluk sağlayacak şekilde hazırlanan zeminler daha düşük şişme potansiyeline sahiptirler. Arazide bulunan zeminin dolgu malzemesi olarak kullanılması, uygulamaların ekonomik olmasını sağlar. Eğer doğru sıkıştırma uygulanırsa, zemin yeterince geçirimsiz olur, bu da alt tabakalara suyun geçmesini engeller. Ancak yoğunluğun düşük olması taşıma gücü problemlerine neden olur (Çetin, 2003).

#### **4.2.4. Sürsaj yüklemesi**

Şişen killerde şişme basıncı değerine yakın değerlerde bir sürsaj yüklemesi yapılarak şişme engellenebilir. Bu yöntem ancak düşük-orta derecede şişme potansiyeline sahip zeminlerde pratik olarak kullanılabilir. Şişme değerleri ile şişme basıncı arasındaki ilişkinin doğrusal olmaması, şişme basıncının artması yöntemin uygulanmasını güçleştirmektedir (Çetin, 2003).

#### **4.2.5. Isı ile iyileştirme**

Zeminler 200 °C'ye kadar ısıtıldıklarında şişme özelliklerini önemli ölçüde kaybetmektedirler. Günümüzde yöntemin pratik olarak uygulanması henüz geliştirilememiştir (Çetin, 2003).

#### **4.2.6. Elektrokimyasal yöntemlerle zemin iyileştirme**

Elektroozmoz ve kildeki baz değişimi elektrokimyasal zemin iyileştirmesini oluşturur. Elektroozmoz sonucunda zeminin suyu uzaklaştırılır ve zemin sertleşir. Elektrokimyasal sertleştirmede amaç kil içerisinde istenilen katyonların yoğunluğunu artırarak zeminin fizikokimyasal özelliklerinin iyileştirilmesidir (Çetin, 2003).

#### 4.2.7. Su muhtevasının korunması ile zemin iyileştirme

Zemindeki şişme problemleri su muhtevsındaki değişimlerden kaynaklanmaktadır. Eğer zemin içerisindeki su muhtevsının değişimi uygun bir yöntemle engellenebilirse şişme problemleri büyük ölçüde çözümlenebilir. Su tutucu bariyerlerin zeminlerde su muhtevsının değişimini engellemek için kullanılabilir. Burada amaç yapıya yakın bölgelere geçirimsiz bir tabaka oluşturarak yapının altında kalan zeminde oluşabilecek su muhtevası değişimlerini minimuma indirmektedir. Yapımdan önce olduğu gibi koruma amaçlı olarak da uygulanabilir. Düşey ve yatay su tutma bariyerleri olarak iki farklı şekilde imal edilebilirler (Çetin, 2003).

#### 4.3. Uçucu Kül

Genelde ısı ile çalışan güç üretim tesislerinde öğütölmüş taş kömürü yada linyit yakılarak elektrik üretilir. Öğütölmüş bu kömürün %80'lik kısmı 75µ (no:200) elekten geçebilecek inceliğe sahiptir. Bu kömür tozları sıcak hava ile karıştırılarak yanma için fırına gönderilir. Bu yanmanın sonucunda çeşitli atıklar ve bazı gazlar açığa çıkar (Erdoğan, 1993). Bu kalıntıların büyük bir bölümü (%75-%80) bacalardan çıkıp gazlarla birlikte, sıcaklıktan dolayı, uçup giden küllerdir. Bunların bacalardan uymasına izin verilmez. Aksi takdirde çevre kirliliğine neden olurlar. Bu küller bacadan yukarı giderken elektrostatik filtreler ya da filtre torbaları yardımı ile tutulurlar. Çağdaş güç üretim tesislerinde gazla birlikte hareket eden bu küllerin %99'undan fazlası tutulmaktadır (Erdoğan, 1997).

Santrallerde, baca gazlarından uçucu küllerin tutulması amacıyla genel olarak yüksek verimli elektrofiltreler ve siklon denilen toz tutucular kullanılmaktadır (Morrison, 1970).

Bu işlemler esnasında daha iri taneli olan ve baca gazları ile birlikte atmosfere sürüklenemeyerek kazan tabanına düşen küllere de taban külü denilmektedir (Mehta, 1986). Termik santralin tipine göre 1100-16000 °C sıcaklıkta yakılan kömürlerin %10-20'si kazan altına düşerek su ile uzaklaştırılır. Buna kazan altı cürufu denir. Çok ince taneli olup baca gazları ile taşınan küller de uçucu kül olarak adlandırılmaktadır. Bunların tane

çapları 20mikron–3mm arasındadır (Alataş, 1996; Bayazıt, 1980; Türker vd.,2009). Türkiye’de halen sadece kömür ile çalışan 15 tane termik santral faaliyet göstermektedir. Bu santrallere ait bilgiler, alfabetik olarak Çizelge 4.1’de verilmiştir (Aruntaş, 2006). Tablo 1’de görüldüğü gibi; Çatalağzı, Çolakoğlu ve Sugözü-İskenderun termik santrali haricindeki bütün santraller, linyit kömürü ile çalışmaktadır. Türkiye’de elektrik enerjisinin yaklaşık yarısının üretildiği termik santrallerde 55 milyon ton/yıl düşük kalorili linyit kömürü yakılmakta ve bunun sonucunda da bacalardan 1993 yılı verilerine göre 13,5 milyon ton/yıl, 1998 yılı verilerine göre ise yaklaşık 13 milyon ton/yıl UK elde edilmektedir . Bu miktar, A.B.D.’de 45 milyon ton/yıl ve Hindistan’da 50 milyon ton/yıl dolayındadır (Aruntaş, 2006).

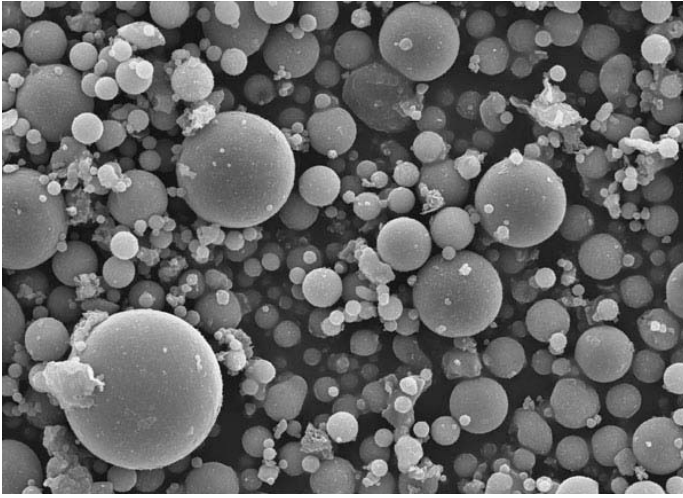
Çizelge 4.1. Türkiye’deki kömürle çalışan termik santraller (Aruntaş, 2006)

No	Santral adı	Yakıt cinsi	Kurulu güç (MW)	Bulunduğu il
1	Afşin-Elbistan A	Linyit	1355	Kahramanmaraş
2	Afşin-Elbistan B	Linyit	1440	Kahramanmaraş
3	Çan	Linyit	320	Çanakkale
4	Çatalağzı	Taşkömürü	300	Zonguldak
5	Çayırhan Park	Linyit	620	Ankara
6	Çolakoğlu 2	Taşkömürü	190	Kocaeli
7	Kangal	Linyit	457	Sivas
8	Kemerköy	Linyit	630	Muğla
9	Orhaneli	Linyit	210	Bursa
10	Seyitömer	Linyit	600	Kütahya
11	Soma A-B	Linyit	1034	Manisa
12	Sugözü-İskenderun	Ithal kömür	1210	Adana
13	Tunçbilek A-B	Linyit	429	Kütahya
14	Yatağan	Linyit	630	Muğla
15	Yeniköy	Linyit	420	Muğla



Şekil 4.2. Uçucu Kül

Uçucu küller alüminli, silisli ve demirli malzemelerdir. Genellikle gri renklidir. Renkleri koyu ise içlerinde yanmamış karbon parçacıkları çok miktarda bulunmaktadır. Kireçle birleştiklerinde bağlayıcılık özelliği taşımaktadır. Silisyum oksit, demir oksit ve alüminyum oksit içeren karmaşık yapıları çoğunlukla camsı küresel taneciklerden oluşur. Çapları 1-300 mikron arasında değişen uçucu külün özelliklerine etki eden faktörler, yakılan kömürün cinsi, yakma randımanı, kömürün yakıldığı fırının sınıfı, kömürün inceliği, kömüre ilave edilen katkı maddeleridir (Demiröz, 2009) Şekil 4.3’de uçucu külün elektron mikroskobu görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.3 Uçucu külün elektron mikroskobu görüntüsü (Anonim)

#### 4.3.1. Uçucu küllerin ASTM C 618’e göre sınıflandırılması

Uçucu küller kimyasal kompozisyonları ve üretildikleri kömür cinsi göz önünde tutularak C618 no’lu ASTM standardına göre 2 sınıfa ayrılmaktadır.

1. F tipi uçucu kül
2. C tipi uçucu kül

Mineralojik ve kimyasal özellikler açısından uçucu küller, içi boşluklu ve boşluksuz, camsal kürecikler süngerimsi mineral parçacıklar ve yanmamış taneciklerden oluşurlar. Kimyasal yapılarında element olarak Si, Al, Ca ve S bulunur. Uçucu küllerin matrisi esas olarak alümina silikatlardan ve bunlarla birlikte bulunabilen Fe, Mg, Na, K,

Ca, Ti ve nadir toprak elementlerinden oluşur. Uçucu olan veya uçucu oksitleri oluşturan As, Cd, Ga, Mo, Pb, Se ve Zn gibi elementler matrise girme eğilimi göstermezler (Çana vd., 1997)

#### **4.3.1.1. F sınıfı uçucu kül**

Genellikle antrasit ve taşkömürün yakılmasıyla elde edilir. Silisyum oksit+demir oksit+alüminyum oksit  $\geq$  % 70 olduğu zaman F sınıfı uçucu kül olarak tanımlanır. Yapısında kireç serbestçe bulunmaz. Genel olarak içerisinde % 10'dan daha az CaO içerdikleri için düşük kireçli uçucu kül olarak isimlendirilir. Kendi kendine sertleşme özelliğine sahip değildirler. Sulu ortamda kireçle reaksiyona girerek çimentolaşma özelliği gösterirler.

#### **4.3.1.2 C sınıfı uçucu kül**

Linyit ve bitüm miktarı düşük kömürlerin yakılmasıyla elde edilirler. Yapılarında Silisyum oksit+demir oksit+alüminyum oksit  $\geq$  % 50 ve %1-3 kireç olduğu zaman C sınıfı uçucu kül olarak isimlendirilir. Çimentolaşma özelliğine sahip oldukları için kendi kendilerine sertleşebilirler.

### **4.3.2. Uçucu küllerin Avrupa çimento standardı ENV 197-1'e göre sınıflandırılması**

- Çimentolarda kullanılabilecek uçucu küller silisli uçucu küller (V)
- Kalkerli uçucu küller (W)

V sınıfı küller esas itibariyle reaktif silika ve aluminadan meydana gelmiş olan, reaktif CaO miktarı %5'in altında, reaktif SiO<sub>2</sub> miktarı ise %25'in üstünde olan uçucu küllerdir.

W sınıfı uçucu küller ise reaktif CaO, reaktif SiO<sub>2</sub> ve aluminadan oluşan, reaktif CaO miktarı %5'in üstünde olan uçucu küllerdir (Tokyay ve Erdoğan, 1998).



#### 4.3.3. Uçucu küllerin elde edildikleri kömürün tipine göre sınıflandırılması

- Linyit uçucu külü: Uçucu maddesi fazla ve genel olarak esmerdir. Bu uçucu küllerin kullanılma imkanları tamamen fiziksel ve kimyasal yapılarına bağlıdır. Etkili fiziksel özellikleri, su absorpsiyonu, görünen yoğunluk, spesifik yüzey olarak tanımlanabilir. Spesifik yüzey ve granülometri kömürün ezilme durumuna göre her ülkede ve santralde farklıdır.
- Taş kömürü uçucu külü: Taş kömürü uçucu külü genel olarak 3 – 1000 mikron incelikte ve 200 no'lu elekte %16-20 kalacak şekilde elde edilir. Bunlar tamamen kuru olarak elde edilirler (Alataş, 1996; Bayazıt, 1980).

#### 4.3.4. Uçucu küllerin kimyasal yapılarına göre sınıflandırılmaları

-Uçucu küllerin içerdiği analitik CaO miktarına göre sınıflandırılması

- CaO miktarı %10'dan az olanlara düşük kireçli/kalsiyumlu uçucu küller,
- CaO miktarı %10'dan fazla olanlara yüksek kireçli/kalsiyumlu uçucu küller,

olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (ASTM-C 618, 1991).

-Uçucu küllerin yapısındaki kireç ve SO<sub>3</sub> miktarına göre sınıflandırılması

- Esas yapısı siliko aluminatlardan meydana gelen, SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (S+A+F) toplamı %70'in üzerinde olan ve genellikle taşkömüründen elde edilen siliko alüminalı uçucu küller,
- Genellikle linyit kömüründen elde edilen, S+A+F toplamı %50 ile %70 arasında olan ve kireç ile silika miktarı yüksek olan siliko kalsik uçucu küller,
- Genellikle linyit kömüründen elde edilen, S+A+F toplamı %50'in üzerinde olan ve diğerlerine göre daha fazla SO<sub>3</sub> ve CaO ihtiva eden sülfü kalsik uçucu küllerdir (Aitcin, 1986).

Yukarıda belirtilen siliko alüminalı uçucu küller, F sınıfındadır. Siliko kalsik uçucu küllerin bazıları F sınıfı içinde, bazıları da C sınıfı içinde yer almaktadır. Sülfü kalsik uçucu küllerin çoğu, C sınıfı uçucu küller olarak isimlendirilmektedir (Aitcin, 1986).

#### **4.3.5. Uçucu küllerin özellikleri**

Uçucu küllerin kimyasal ve mineralojik kompozisyonları arasında doğrudan bir ilişki bulunmamasına rağmen, yalnızca kimyasal oksit analizi kullanılarak bu malzemelerin kullanılabilirliği belirlenmektedir. Mineral malzemenin çoğu kil, pirit ve kalsitten oluşur. Minerallerin %85'den fazlası minerallerin termal işlemlerle şekillendirilmiş camsı, içi boşluklu ve dolu kristalimsi taneciklerden oluşmaktadır. Linyitten elde edilen külde CaO ve MgO oranı  $Fe_2O_3$ 'den fazladır. Taşkömüründen elde edilen külde ise  $Fe_2O_3$  oranı CaO ve MgO oranından daha fazladır (Demiröz, 2009)

Uçucu küllerin endeks ve mühendislik özellikleri genelde oldukça dar bir aralıkta değişir. Düşük geçirgenliğe sahip olan uçucu küller kireç ile reaksiyona girdiği zaman sertleşmektedir. Oturmalar kil zemine nazaran çok daha hızlı oluşmakta ve suya doygun olmadığı zaman suyun yüzeysel gerilimlerinden dolayı görünen kohezyon oluşmaktadır (Demiröz, 2009).

##### **4.3.5.1. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri**

Uçucu külün fiziksel özellikleri, genel olarak termik santralde yakılan kömürün özelliklerine ve yanma sistemine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Uçucu kül, genellikle gri renktedir ve rengi, içindeki yanmamış karbon miktarı arttıkça daha koyu bir hal almaktadır. Uçucu kül, % 60-90 camsı bileşen ihtiva eden çok ince taneciklerden meydana gelmektedir. Uçucu külün tane şekli, yuvarlaktır ve çapları, 1-200  $\mu m$  arasında değişir. Taneciklerin yaklaşık % 75'inin çapı 45  $\mu m$ 'den, % 50'den çoğu ise 20  $\mu m$ 'den daha küçüktür. Uçucu külün yoğunluğu, 2.2- 2.7  $g/cm^3$  dolayındadır. Uçucu külün özgül yüzeyi, çimento inceliğine yakın olup öğütme yapılmadan kullanılabileceğini göstermektedir (Aruntaş, 2006)

##### **4.3.5.2. Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları**

Uçucu küllerde S+A+F toplamının, genellikle % 70 değerinden fazla olduğu görülmektedir. Kullanılan kömür cinsine bağlı olarak bazı uçucu küllerde önemli oranda CaO bulunmaktadır. CaO miktarı % 10'un altında olan uçucu küller, düşük kireçli veya düşük kalsiyumlu, % 10'un üstünde olanlar ise yüksek kireçli veya yüksek kalsiyumlu

uçucu kül olarak adlandırılmaktadır. ASTM C 618'e göre uçucu küller, S+A+F toplamı % 70'in üzerinde ise F sınıfı uçucu kül, S+A+F toplamı % 50'nin üzerinde ise C sınıfı uçucu kül olarak gruplandırılmaktadır (Aruntaş, 2006)

Uçucu külün kimyasal bileşeni yanan kömürün tipine, bu kömür içinde bulunan yanıcı olmayan maddelerin miktarına, yanmanın ne kadar etkili olduğuna ve sürekliliğine bağlıdır. Genelde linyit kömürünün yanmasıyla elde edilen uçucu külün CaO bileşeni fazla, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bileşeni ise taş kömürünün yanmasıyla elde edilen külün Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bileşeninden azdır. Linyitten elde edilen uçucu külün yanmamış karbon içeriği çok azdır (Aytekin, 2009)

- Suda Çözünürlük: Uçucu küller %2-3 oranında suda çözünürler. Çözelti kalsiyum ve sülfat bileşenleri nedeni ile oluşmaktadır. Uçucu küller saf su içersine bırakıldıklarında birkaç saat içinde içlerindeki sülfatın tamamı çözünür. SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, MgO, Na<sub>2</sub>O ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> suda çok az çözünürler. Sıcaklık arttıkça çözünürlük artar. Puzolanik özellik istenen karışımlarda ve iyi bir uçucu külde suda çözünebilir maddeler az olmalıdır (Toros, 1987).
- Asitlerin Etkisi: Uçucu küllere asitlerin etkisi çok azdır. Seyreltik asit içerisinde uçucu küllerin çözünürlüğü en fazla %15'tir. Ancak bu miktar küllerin kimyasal ve mineralojik yapıya bağlı olarak değişebilmektedir.
- Kimyasal Yapıları: Uçucu külün %85'inden fazlası SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'den oluşmuştur. Bu oksitlere ilaveten düşük oranda MgO ve SO<sub>3</sub> ve alkaliler de bulunur. Uçucu kül bacadan toplanırken; içinde bazı yanmamış karbon partikülleri de uçucu külün önemli bir bileşenini oluştururlar. Kullanılan kömüre bağlı olarak bazı tiplerinde yüksek miktarda CaO bulunabilmektedir (Aytekin, 2009)

#### **4.3.5.3. Uçucu küllerin mineralojik yapıları**

Uçucu küllerin puzolanik özellikleri, kimyasal bileşiminden daha çok mineralojik yapıları ile ilişkilidir. Düşük kireçli uçucu küllerin ana aktif bileşeni, silis ve alüminadan

oluşan amorf ya da camsı fazdır. Bu tip uçucu küller, rutubetli ortamda sönmüş kireç ( $\text{CaOH}_2$ ) ile reaksiyona girdikleri için puzolanik özelliğe sahiptirler. Yüksek kireçli uçucu küller ise, hem puzolanik özellik gösterirler hem de sahip oldukları serbest kireç, trikalsiyum alüminat, amorf silis ve alumina vb. sebebiyle kendi başlarına bir miktar bağlayıcı özelliğe sahip olabilirler

Düşük kireçli uçucu küllerdeki camsı faz miktarı, yüksek kireçli uçucu küllerden daha fazladır. Düşük kireçli uçucu küllerde mineral faz olarak; camsı faz, mullit ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ), hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), manyetit ( $\text{Fe}_2\text{O}_4$ ), kuvarz ( $\text{SiO}_2$ ) vb. var iken yüksek kireçli uçucu küllerde sayılanlara ek olarak serbest kireç ( $\text{CaO}$ ), anhidrit ( $\text{CaSO}_4$ ), trikalsiyum alüminat ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ), plajiyoklaz, gehlenit, feldspat gibi kalsiyum silikatlar bulunmaktadır (Aruntaş, 2006). Türkiye'deki bazı uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Türkiye'deki bazı uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları (Aruntaş, 2006)

Mineral, %	Uçucu kül					
	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Seyitömer	Soma B	Tunçbilek	Yatağan
Mullit	1.0	18.1	1.2	4.3	8.8	6.0
Kuvarz	4.5	10.9	5.6	5.1	13.9	22.4
Manyetit	0.8	0.2	2.5	0.6	4.1	2.9
Hematit	4.0	0.1	6.0	2.0	3.0	7.0
Anhidrit	12.2	-	9.3	7.4	-	-
Serbest CaO	18.6	0.7	5.5	9.8	0.9	1.0
Plajiyoklaz	~28	-	~15	~20	-	~25
Camsı ve amorf faz	~30	~70	~50	~50	~70	~35

#### 4.3.6. Deneysel çalışmada kullanılan uçucu küllerin özellikleri

##### 4.3.6.1 Çatalağzı Termik Santrali uçucu külü

Türker vd.ne (2009) göre Çatalağzı Termik Santralinden, beş gün süreyle alınan uçucu kül numunelerinin kimyasal analizleri yapılmış; sonuçlar ve ortalama sonuçların standartlardaki sınır değerlere uygunluğu sırasıyla Çizelge 4.3 ve 4.4'de gösterilmiştir. Kimyasal bileşim açısından, bileşen yüzdelerinin birbirine çok yakın olması nedeniyle, bu santralden üniform özellikte kül elde edilebileceği anlaşılmıştır. Çatalağzı uçucu külü, reaktif kireç miktarının % 10'un altında olması nedeniyle TS EN 197-1 standardına göre V

sınıfına (silissi uçucu kül) girmektedir. Yine ASTM C618 standardına göre  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  değerinin % 70'in üzerinde olması ve CaO miktarının % 10'dan az olması (%1.46) nedeniyle F sınıfına (düşük kireçli) dahil olmaktadır.  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ 'in % 70'in üzerinde olması nedeniyle TS 639'da istenen şarta uymaktadır.  $\text{SO}_3$  ve serbest kireç yüzdeleri ,sırasıyla % 0.08 ve % 0.13 olup, bu bileşenler için TS EN 450 standardında istenilen en fazla % 3.0 ve % 1.0 koşullarına uymaktadır. Buna sonuçlara göre, Çatalağzı uçucu külü, dört standartta da kimyasal bileşen bazında istenilen koşullara tamamı ile uygun bir kül olduğu anlaşılmaktadır.

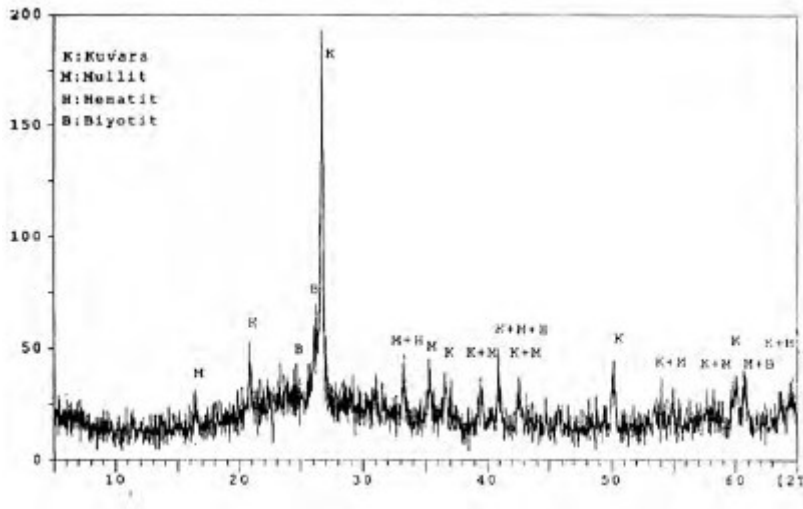
Çizelge 4.3. Çatalağzı uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları (Türker vd., 2009)

Oksit (%)	Numune					Ortalama	St.sapma	Varyasyon kats.,%
	1	2	3	4	5			
$\text{SiO}_2$	58.69	58.48	58.55	58.95	59.07	58.75	0.25	0.43
$\text{Al}_2\text{O}_3$	25.10	25.34	25.48	24.94	25.36	25.24	0.22	0.87
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5.80	5.77	5.66	5.81	5.74	5.76	0.06	1.05
S+A+F	89.59	89.59	89.69	89.70	90.17	89.75	–	–
CaO	1.49	1.48	1.34	1.55	1.45	1.46	0.08	5.48
MgO	2.22	2.22	2.22	2.22	2.20	2.22	0.01	0.45
$\text{SO}_3$	0.12	0.12	0.10	0.03	0.05	0.08	0.04	50.00
$\text{K}_2\text{O}$	4.04	4.09	4.04	4.02	4.05	4.05	0.03	0.74
$\text{Na}_2\text{O}$	0.59	0.59	0.59	0.61	0.61	0.60	0.01	1.83
KK	1.28	1.01	1.33	1.02	0.98	1.12	0.17	15.18
Cl <sup>-</sup>	0.013	0.027	0.011	0.016	0.010	0.015	0.007	50.00

Çatalağzı Termik Santrali uçucu külünün mineralojik bileşimine ait x-ışınları difraktogramı Şekil 4.4' de verilmiştir. Buna göre camsı ve az oranda kristal fazlardan oluştuğu görülmektedir. Kristalize fazlar kuvars, mullit, biyotit (mika grubu) ve hematit' den meydana gelmektedir. Çatalağzı uçucu külünün X-ışınları difraktogramında, camsı fazın  $23-25^\circ 2\theta$  arasında maksimum duruma geldiği görülmüş, dolayısıyla camsı fazın silisyumca zengin alüminosilikat bileşiminde olduğu anlaşılmıştır.

Çizelge 4.4. Çatalağzı uçucu külünün kimyasal analiz sonuçlarının değerlendirilmesi (Türker vd., 2009)

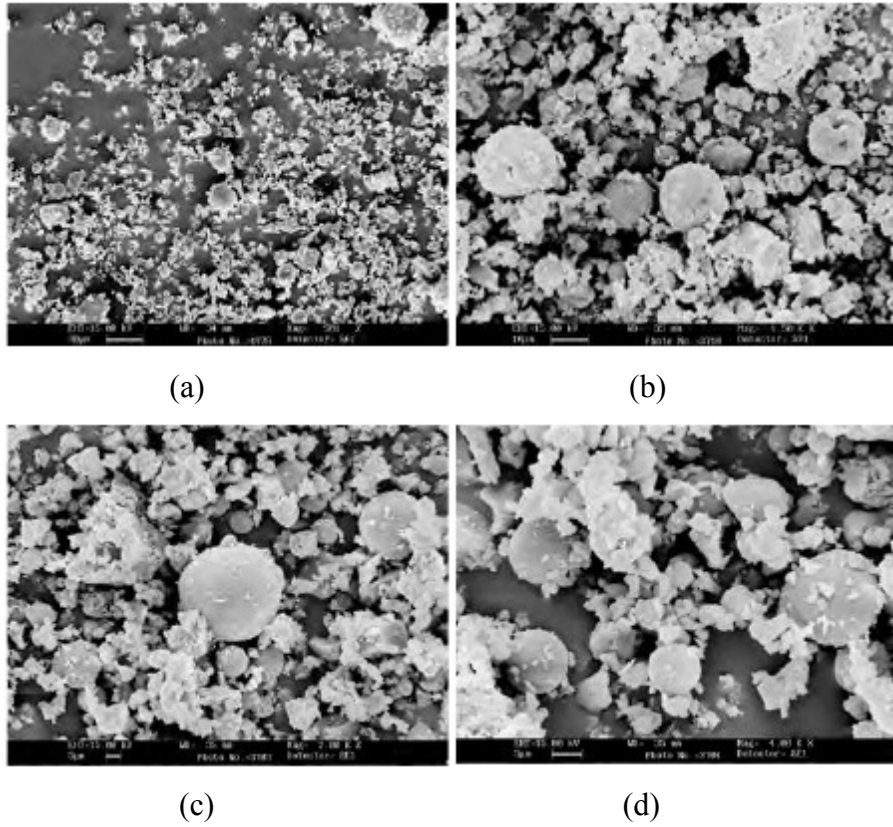
Standartlara Uygunluk Sınırları							
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO <sub>2</sub>	58.75						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25.24						
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.76						
S+A+F	89.75				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	1.46						
MgO	2.22				<5.00		
SO <sub>3</sub>	0.08	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K <sub>2</sub> O	4.05						
Na <sub>2</sub> O	0.60						
KK	1.12	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<5.00	<6.00
-	0.015	<0.10					
Serb.CaO	0.13	<1.00					
Reak.SiO	34.18	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak.CaO	0.65		<10.00	>10.00			



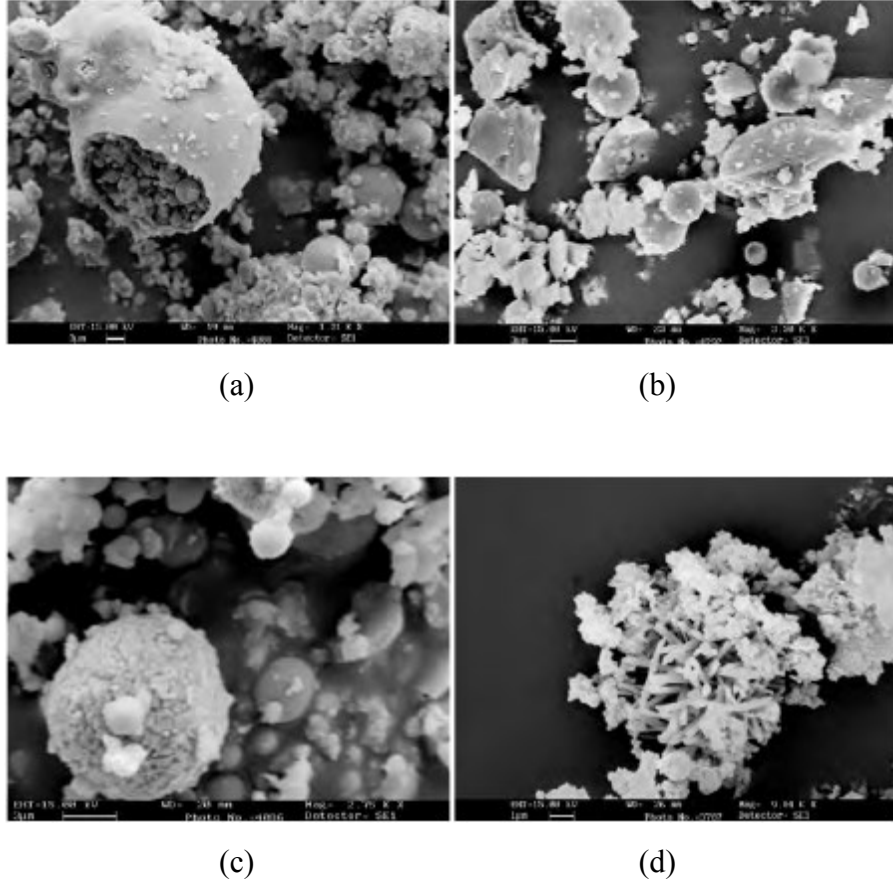
Şekil 4.4 Çatalağzı uçucu külünün mineralojik bileşimine ait X-ışınları difraktogramı (Türker vd., 2009)

Çatalağzı uçucu külü, çoğunluğu tam küresel tanecikler (1-20 µm)'den olmakla birlikte yarı-köşeli tanecikler de içermektedir (Şekil 4.5). Ayrıca içi mikroküreler ile dolu iri küresel tanecikler (plerosferler)'de bulunmaktadır. Bunlar belli bir kürenin(senosfer) oluşum sırasında kısmen kırılması bunların daha küçük olanlar ile doldurulması veya

ergimiş kildeki gaz çıkışıdaki kısmen düzensizlik olması nedeniyle, senosfere ilaveten farklı boyutlarda meydana gelen camsı kabarcıkların oluşumu ile meydana gelirler. Taneciklere yapılan mikroanaliz sonucunda tam küresel yapıların alüminyum silikat bileşiminde olduğu; köşeli yapıların kuvars, biyotit bileşiminde olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.6). Uçucu küle HF-asit uygulaması sonucunda, bazı küresel taneciklerde camsı fazın çözünmesi sağlanmış ve ince-prizmatik (psödohegzagonal) mullit kristalleri ortaya çıkmıştır (Şekil 4.6). Senosferler ve mullit kristalleri, kömürün yüksek sıcaklıklarda yanması sırasında kilin termal bozunmasının ürünleridir. Biyotit minerali, kuvars gibi yüksek termal stabilitesi nedeniyle yanma sırasında reaksiyona girmeyerek, uçucu küle karışmıştır.



Şekil 4.5. Çatalağzı uçucu külünün yüzey yapısına ait fotoğraflar (Türker vd., 2009)  
a) Taneciklerin genel olarak dağılımı (x500), b) Senosferler ve köşeli yapılar (x1500), c) ve d) Tam küresel ve yüzeyinde kısmen birikintiler olan tanecikler



Şekil 4.6. Çatalağzı uçucu külünün mikroyapısı (Türker vd., 2009) a)Plerosfer küresi (x1200), b) Kütle halinde biyotit (x3500), c)Ferrosfer küresi(hematit taneciği) (x2750), d) Mullit kristalleri içeren tanecik(~x10000)

#### **4.3.6.2 Soma Termik Santrali uçucu külü**

Türker vd.ne (2009) göre Soma Termik Santrali uçucu külünün, üç ayrı ünitesinden (1-2, 3-4, 5-6) beş gün boyunca alınan uçucu kül numunelerinin kimyasal analizleri yapılmış; sonuçlar ve ortalama değerlerin standartlardaki değerler ile karşılaştırmasını incelenmiştir (Çizelge 4.5). Sonuçlara göre, Soma uçucu kül numunelerinin kimyasal bileşen yüzdeleri üç ayrı ünitenin kendi içinde birbirine yakın değerlerdir. Ancak, ünitelerin ortalama değerlerinin karşılaştırmasında iki ünitenin (1-2, 3-4) benzer kimyasal bileşimde diğer ünitenin (5-6) daha farklı bileşimde olduğu görülmektedir. Bu nedenle Soma Teknik Santralinden tek ünite bazında uniform özellikte kül elde edilebileceği; ancak üniteler arasında stabilite olmadığı sonucuna varılmıştır. Soma uçucu külü, reaktif kireç miktarının % 10'un üzerinde olması (% 17.71) nedeniyle TS EN 197-1'de göre W sınıfı



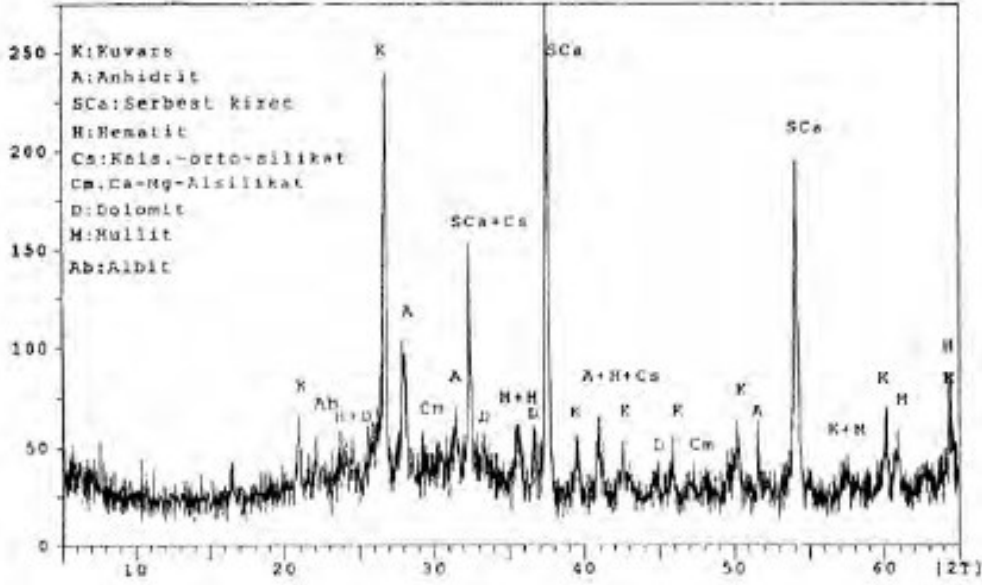
(kalkersi uçucu kül) kapsamına girmektedir. Buna karşılık standartta reaktif silis için istenilen  $> \% 25$  koşulunu da ( $\% 32.04$ ) sağlamaktadır. Buna göre TS EN 197-1 standardına tamamen uymaktadır. ASTM C-618 standardına göre,  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  miktarının  $\% 50$ 'nin üzerinde ( $\%70.48$ ) olması ve CaO miktarının  $\% 10$ 'u geçmesi ( $\% 20.95$ ) nedeniyle, C sınıfı (yüksek kireçli) uçucu kül şartlarına uygun olmaktadır.  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  miktarı için TS 639'da istenilen  $\% 70$  veya üzerinde olma koşulunu da sağlamaktadır. TS EN 450'de,  $\text{SO}_3$  miktarı için getirilen en fazla  $\% 3.0$  'lük sınırı ortalama geçmemekle ( $\% 2.55$ ) birlikte; 5-6 no'lu ünitelerde bu değer  $\% 4.11$  olup,  $\% 3.0$ 'ün üzerindedir. Yüksek kireçli kül olması nedeniyle, serbest kireç miktarı da TS EN 450'deki en fazla  $\% 1.00$ 'lik sınırın üzerindedir (ortalama  $\% 7.22$ ). Sonuç olarak, Soma uçucu külü üç standartta (TS EN 197-1, TS 639, ASTM C-618) istenilen koşullara tamamen; diğer standartta (TS EN 450) belirtilen koşullara kısmen ( $\text{SO}_3$  ve serbest kireç hariç) uygun bir küldür.

Çizelge 4.5. Soma uçucu külünün ortalama kimyasal analiz sonuçlarının değerlendirilmesi (Türker vd., 2009)

Standartlara Uygunluk Sınırları							
Oksit (%)	Uçucu	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO <sub>2</sub>	44.04						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.07						
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.37						
S+A+F	70.48				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	20.95						
MgO	1.66				<5.00		
SO <sub>3</sub>	2.55	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K <sub>2</sub> O	1.22						
Na <sub>2</sub> O	0.34						
KK	2.09	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00
Serb.CaO	7.66	<1.00					
Reak.SiO <sub>2</sub>	31.50	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak.CaO	17.71		<10.00	>10.00			

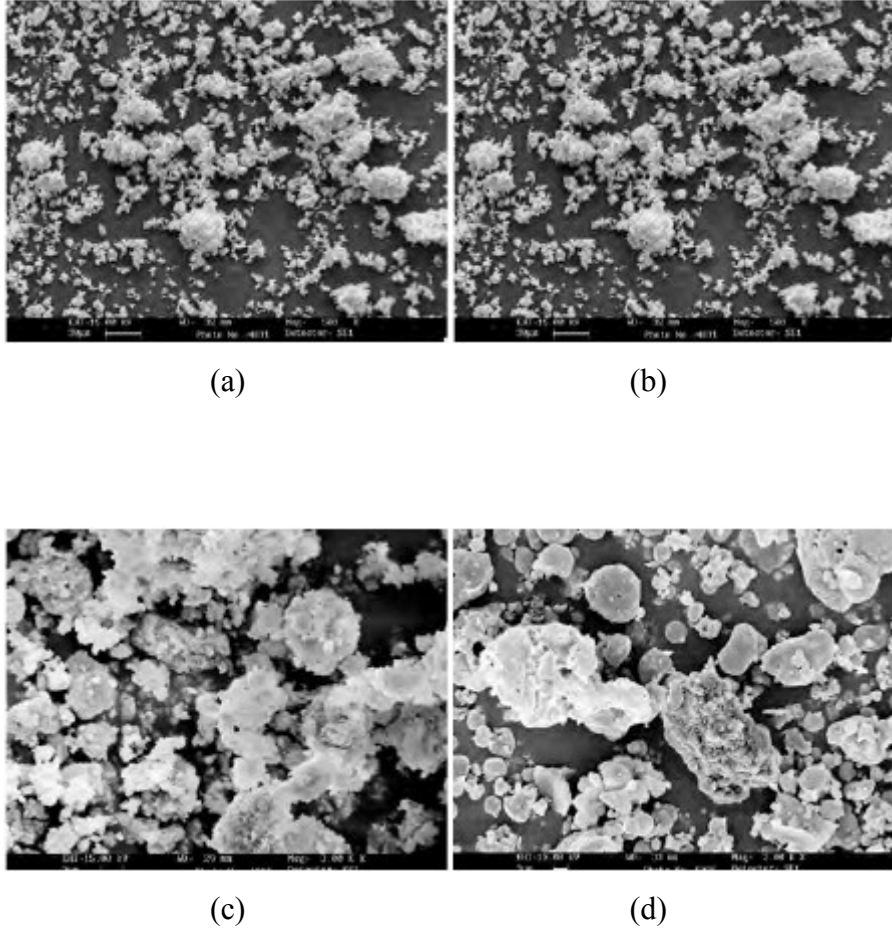
Soma Termik Santrali uçucu külünün mineralojik bileşimini gösteren x-ışınları difraktogramı Şekil. 4.7'de verilmiştir. Soma uçucu külünün, başlıca kuvars, anhidrit, serbest kireç ve bunun yanı sıra albit, kalsiyum-orto-silikat, hematit ,dolomit ve mullit içerdiği tespit edilmiştir. Kristalize fazların yanısıra camsı faz da belirgin olarak mevcut

olup, 27-32o 2θ arasında maksimuma yükselmiştir. Bu durum, camsı fazın yapısında silisyum da içeren kalsiyum alüminat fazı, dolayısıyla kalsiyum alüminasilikat fazı bileşiminde olduğunu göstermiştir.

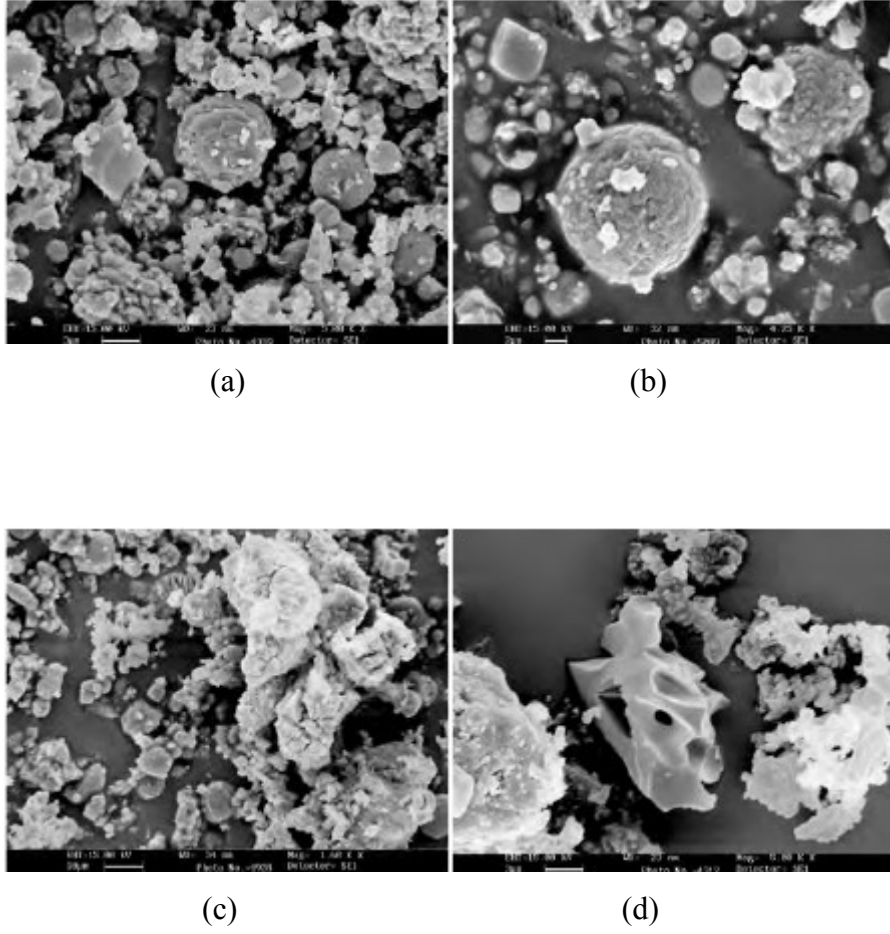


Şekil 4.7. Soma uçucu külünün mineralojik bileşimine ait X-ışınları difraktogramı (Türker vd., 2009)

Soma uçucu külünün morfolojik analizinde, genellikle büyüklükleri 0.5-20 µm arasında değişen, çoğunluğu düzensiz şekilli olmak üzere yüzeyi pürüzlü küresel ve yarı küresel tanecikler içerdiği gözlenmiştir. Özellikle 2-3 mikronluk taneciklerin tam küresel olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.8) Taneciklere uygulanan mikro analiz sonucunda, köşeli yapıların anhidrit, kuvars, yanmamış kil kalıntıları, serbest kireç bileşiminde olduğu; poröz yapıların yanmamış karbon (1-2 ve 3-4) bileşiminde olduğu saptanmıştır (Şekil 4.9). Deforme olmuş yarı-küresel tanecikler, kömürden gelen kil mineralinin (illit) yanması sonrasında ergime sıcaklığının altında soğutulmasıyla, küresel yapılu ürünün parçalanması sonucunda meydana gelmektedir.



Şekil 4.8. Soma uçucu külünün mikroyapısına ait fotoğraflar (Türker vd., 2009)  
a) Taneciklerin genel dağılımı (x500), b) 1-2. Ünite külünün mikroyapısı (x3000), c) 3-4. Ünite külünün mikroyapısı (x3000), d) 5-6. Ünite külünün mikroyapısı (x2000)



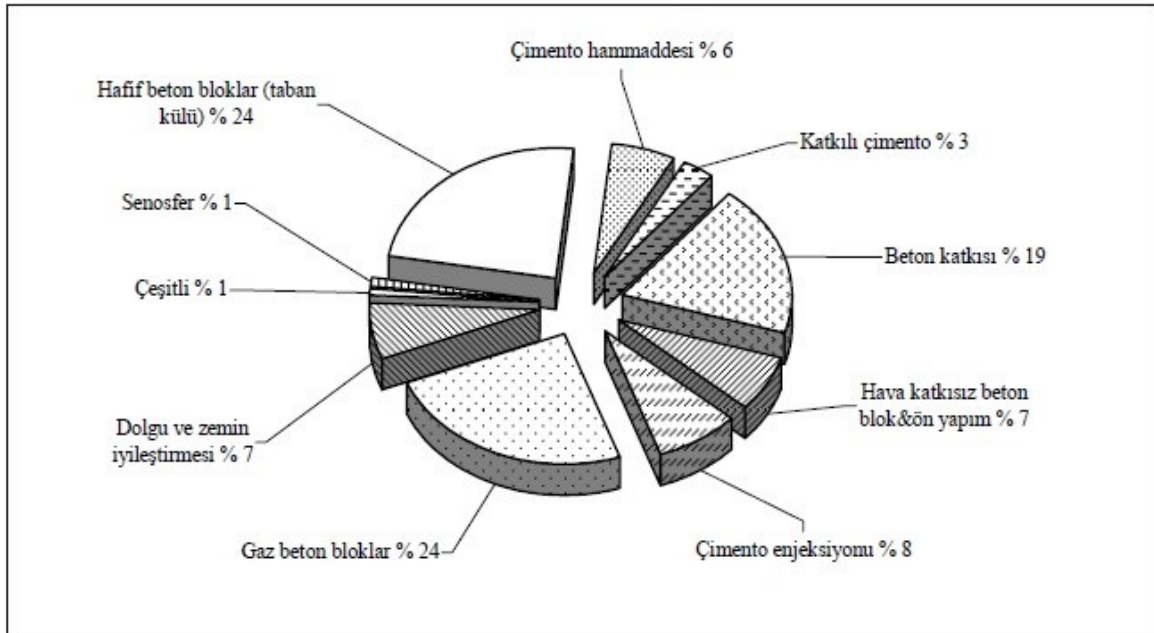
Şekil 4.9. Soma uçucu külündeki kristaller (Türker vd., 2009) a) Kuvars kristali, anhidrit kaplı küreler ve yüzeyi pürüzsüz küreler (x5000), b) Anhidrit kristali ve anhidrit kaplı tanecikler (x4250), c) Serbest kireç kümesi (x1600), d) Yanmamış karbon kalıntısı (x5000)

#### 4.3.7. Uçucu küllerin inşaat mühendisliğinde kullanımı

Uçucu küllerin arazide dolgu halinde depolanması çevre açısından bir problem oluşturmaktadır. Kül içindeki ağır metallerin ayrışarak yeraltı suyuna karışması durumunda tehlikeli olmaktadır. Stabilizasyon uçucu küllerin permeabilitesini azaltır ve böylelikle uçucu külden kimyasal ve biyokimyasal maddelerin süzülmesini önlemektedir. Uçucu küller çok miktarlarda üretildiklerinden ve de puzolanik özellikten dolayı inşaat mühendisliğinde çok yüksek hacimlerde kullanılmaktadır (Eftelioğlu ve Bowders, 1992).

İnşaat mühendisliğinde uçucu kül;

- Dolgu malzemesi,
- Zemin stabilizasyonunda zemin özelliklerini iyileştirici malzeme,
- Yalıtım malzemesi,
- Maden ocaklarında filler olarak,
- Gaz beton üretiminde yardımcı hammadde,
- Katkılı çimento ve beton üretiminde katkı malzemesi,
- Hafif agrega üretiminde yardımcı hammadde,
- Tuğla üretiminde yardımcı hammadde,
- Donatılı zeminlerde duvar arkası dolgusu, (Eftelioğlu ve Bowders, 1992).
- Katı atık sahalarında yeraltı suyunu kirletmemesi için çevresinde düşey geçirimsiz perdelerin oluşturulmasında bentonit-çimento ve zemin-bentonit karışımlarında katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4.10 İngiltere'deki termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin kullanım alanları (Aruntaş, 2006)

Geoteknik Mühendisliğinde yüzeydeki zeminler için stabilizasyon katkı malzemesi, derindeki zeminlerin iyileştirilmesinde ise yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Genel olarak geoteknik mühendisliğinde şu amaçlar için kullanılmaktadır:

- Temel alt dolgusu
- İstinat duvarı arkası dolgusu
- Baraj dolgularında katkı malzemesi olarak,
- Zemin stabilizasyonu ve yollarda,
- Beton üretiminde reolojik özellikleri düzenleyici olarak,
- Kireç-uçucu kül enjeksiyonunda,
- Asfalt-uçucu kül enjeksiyonunda,
- Çimento-Bentonit ve Uçucu Kül enjeksiyonunda,

Uçucu küllerin enjeksiyonda kullanımı oldukça yenidir. Tane boyutu ve şekli, tane dağılımı ve puzolanik aktivitesi uçucu küllerin enjeksiyonda kullanımını sağlayan özelliklerdir. Taneleri çimentodan daha ince olduğu için etkili bir enjeksiyon malzemesidir. Basınçla kireç-uçucu kül enjeksiyonu, zeminlerin arazideki hacim değiştirme potansiyellerini azaltmak ve taşıma kapasitelerini arttırmak amacıyla yapılır. Kil oranı düşük olan zeminlerde, kireç tek başına istenilen iyileştirmeyi sağlayamamaktadır. Uçucu küller silisyum oksit, demir oksit ve alüminyum oksit bileşimlerinde sahip oldukları için, kendi kendine sertleşmesinden dolayı zemin içerisinde çatlak ve boşluklar arasında çimentolaşmayı sağlamaktadır. Kireç ve uçucu kül,

- Bina ve park alanlarının yapımını desteklemek amacıyla yapılan dolguların stabilizasyonunda ve onarımında,
- Dolguların oturmasını azaltarak taşıma kapasitelerini artırır,
- Geçirimsizliği sağlamak amacıyla kullanılır.

Uçucu küller, kimyasal yapısından kaynaklanan özelliğinden dolayı zararlı atık sularından az etkilenmektedir. Bu da çöp sahalarında yapılan geçirimsiz kil tabakasında kullanılmasına imkan sağlamaktadır. Kül daneleri fiziksel olarak silt veya daha küçük boyutdadır. Genellikle düşük plastisiteli olup donmaya karşı hassastırlar. Bu özelliğinden donma-çözünme durumunda kaplama olarak görev alan uçucu külün bozulabileceğine

dikkat edilmelidir. C-tipi uçucu külün arazide yerleştirilmeden ve sıkıştırılmadan önce sertleşeceği göz önünde tutulmalıdır (Demiröz, 2009).

Geoteknik uygulamalarda uçucu kül, dolgu yapmak, zemin stabilizasyonu sağlamak ve bent yapmak amacıyla kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra uçucu kül sızdırmazlık sağlamak amacıyla atık depolama sahalarında, yol kaplaması altındaki dolgu tabakası yapımında, donatılı zemin duvarlarda duvarın arka dolgusu olarak ve ayrıca çöp atık sahaları üzerinde yapılan beton kaplama veya döşemelerdeki farklı oturma hasarlarının onarımı için kireç ile birlikte enjeksiyon uygulamasında kullanılmaktadır. Deneysel bir araştırma, yol dolgularının yapımında uçucu külün çimento ile birlikte pratik olarak kullanılabileceğini göstermiştir (Aruntaş, 2006)

## 5.MATERYAL VE YÖNTEM

Araştırmada kullanılan zemin numunesinin özelliklerinin belirlenmesine yönelik olarak öncelikle tanımlama ve sınıflama deneyleri (elek analizi, kıvam limiti, özgül gravite deneyi) yapılmıştır. Numunelerin kompaksiyon karakteristiklerinin belirlenmesine yönelik olarak da kompaksiyon deneyi yapılmıştır. Belirlenen kompaksiyon karkteristiklerine bağlı olarak numunlerin şişme potansiyellerini değerlendirmek amacıyla şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyi, dispersibilite özelliğini belirlemek amacıyla iğne deliği ve dağılma deneyine ilaveten serbest basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Örneklerin alınması, deneye hazırlanması ve deneylerin yapılmasında ilgili standart yöntemlere uyulmuştur (ASTM-1994). Çalışma kapsamında yürütülen deneysel çalışma programı Çizelge 5.1 de sunulmaktadır.

### 5.1. Materyal

Bu çalışmada Afyon kili üzerinde değişen katkı oranlarda (%0 %5, %10, %15, %20, %25, %30) Çatalağzı ve Soma uçucu külü ilavesiyle deneyler yapılmıştır. Zemin numunesinin özelliklerini belirlemek amacıyla elek analizi, kıvam limiti ve özgül gravite deneyleri yapılmıştır. Afyon kili Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi'ne (USCS) göre CL (düşük plastisiteli kil) olarak tanımlanmıştır. Çizelge 5.2'de numunenin tanımlama deney sonuçları, Şekil 5.1'de numuneye ait granülometre eğrisi, Şekil 5.2'de numunenin plasitite kartındaki yeri verilmiştir.

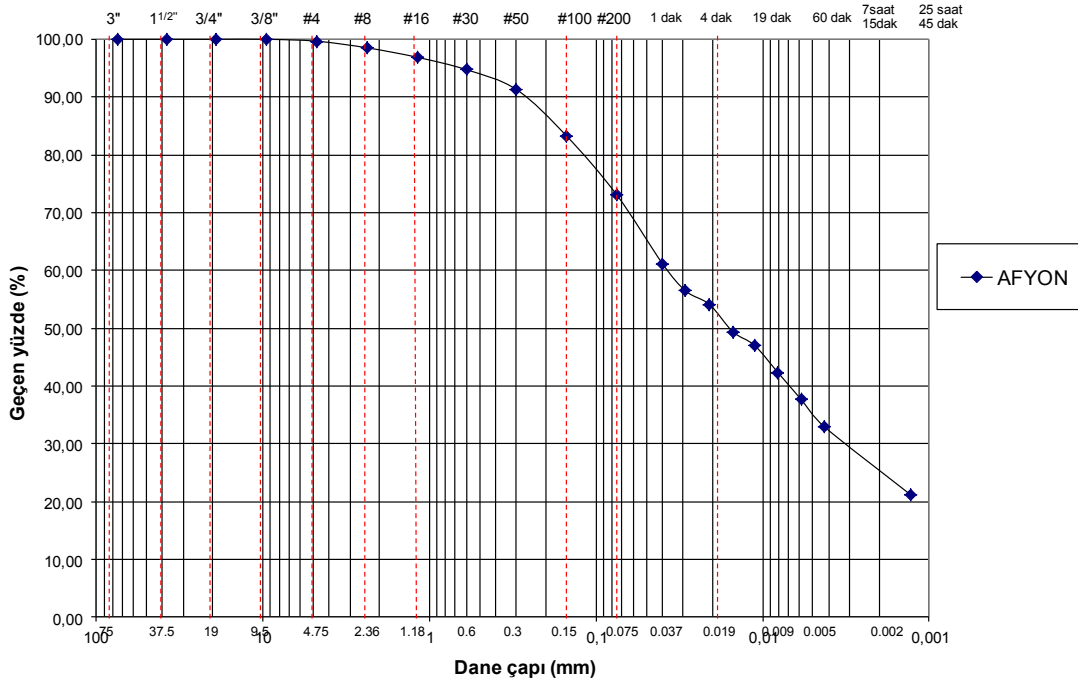


Çizelge 5.1. Deneysel çalışma programı

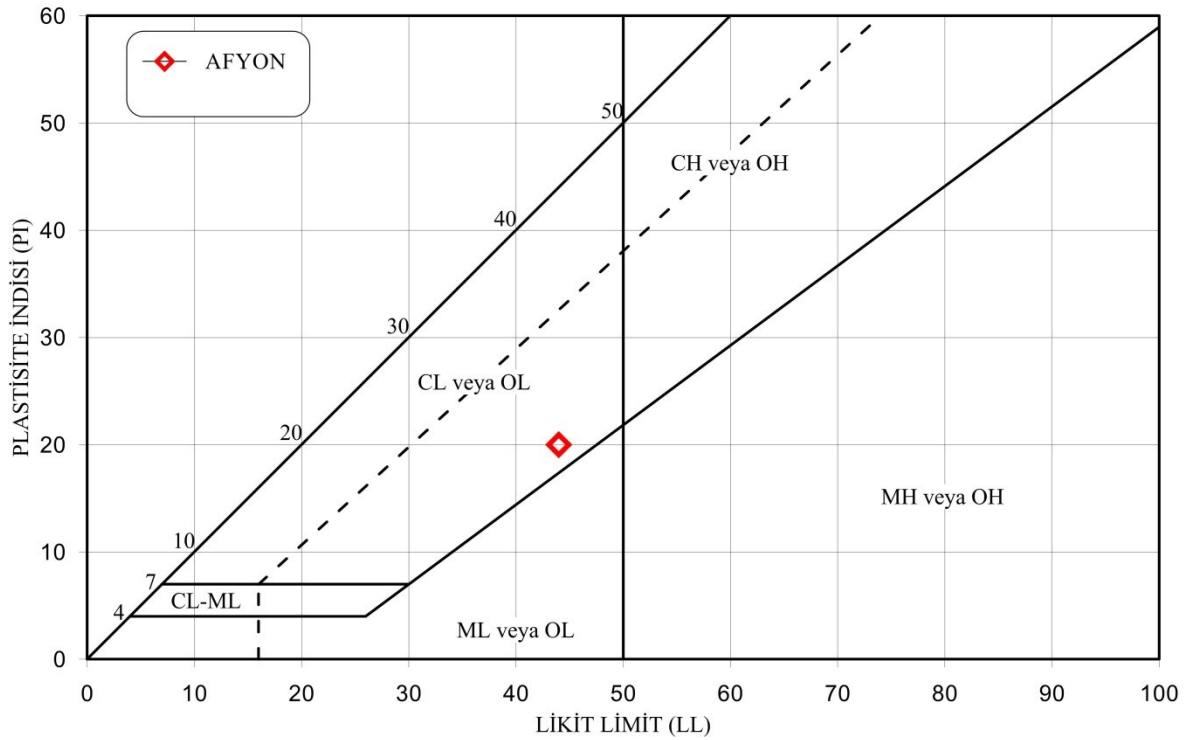
	Deney	Numune sayısı		
Tanımlama ve Sınıflama Deneyleri	Tane dağılımı			
	-Elek analizi	1		
	Kıvam limitleri			
	-Likit limit	1		
	-Plastik limit	1		
	Özgül gravite	1		
	Kompaksiyon karakteristikleri			
	-Standart proctor	2*7		
Şişme Deneyleri	Şişme yüzdesi	2*7		
	Şişme basıncı	2*7		
Dispersibilite Deneyleri	Dağılma deneyi	2*7		
	İğne deliği deneyi	2*7		
Dayanım Deneyleri	Serbest basınç deneyi	Kür süresi		
		1 gün	7 gün	28 gün
		2*7	-	-
	TOPLAM	88		

Çizelge 5.2. Numunenin tanımlama deney sonuçları

Numune	<0.075 mm (%)	<4.75 mm (%)	<0.002 mm (%)	LL	PL	PI	Grup Sembolü	Gs
Afyon	73,0	100,0	25	44	24	20	CL	2,64



Şekil 5.1. Numuneye ait tane dağılımı eğrisi



Şekil 5.2. Afyon kilinin plastisite kartındaki yeri

Kompaksiyon karakteristiklerinin belirlenmesine yönelik, standart Proctor enerji seviyesinde (katkısız, %5, %10, %15, %20, %25, %30) Çatalağzı ve Soma uçucu küllü

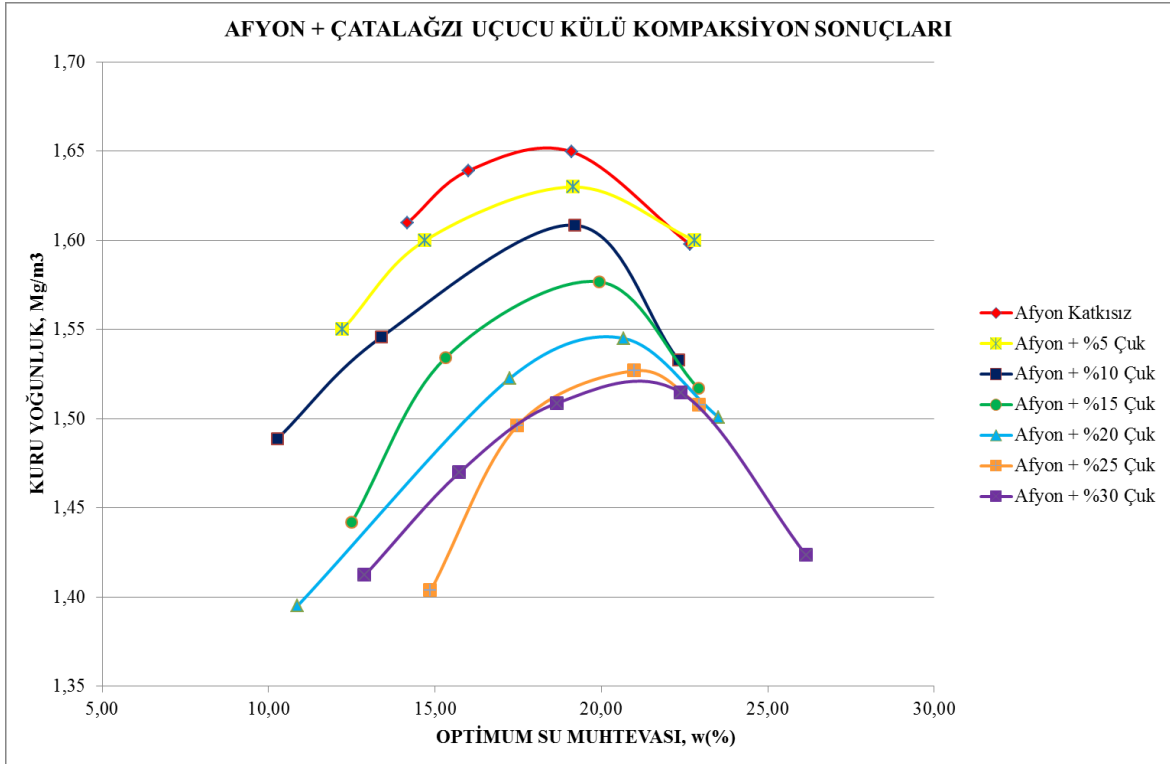
katkılı kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Çizelge 5.3 ve 5.4'de numunelerin kompaksiyon karakteristikleri ve Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'de numunelere ait kompaksiyon eğrileri verilmiştir.

Çizelge 5.3. Afyon kili + Soma uçucu külü katkıli numunelerin kompaksiyon karakteristikleri

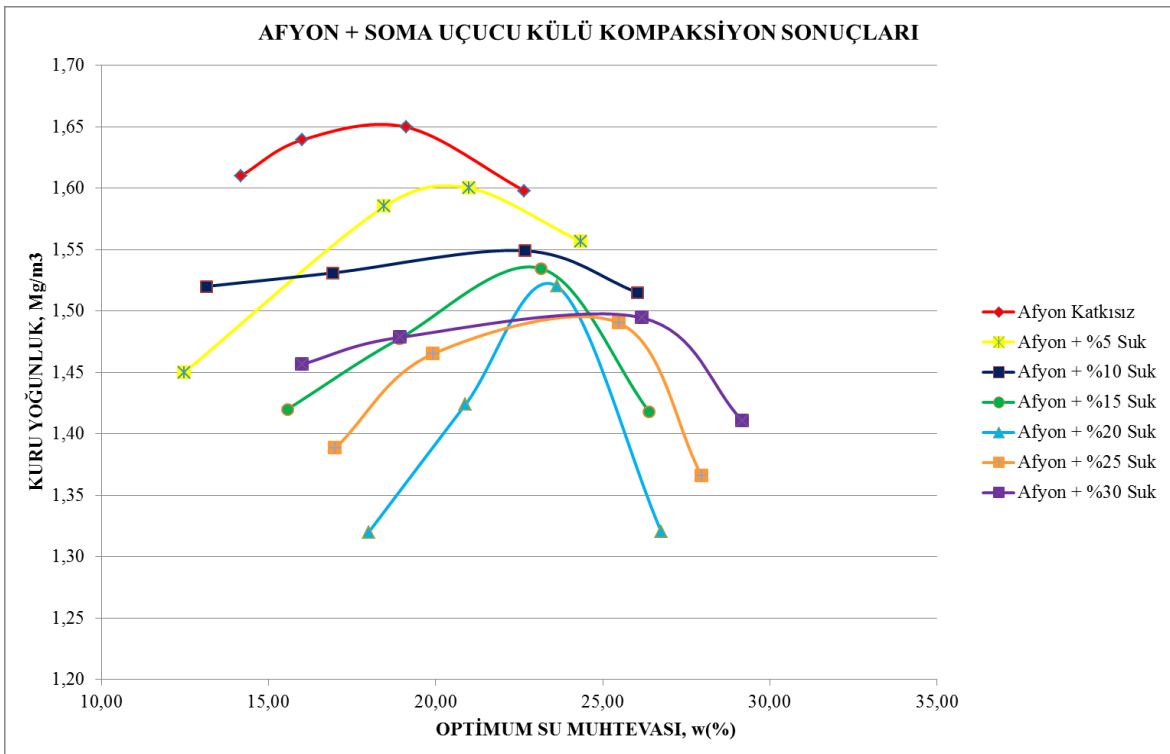
Katkı Oranı (%)	Kuru Yoğunluk (Mg/m <sup>3</sup> )	Optimum Su Muhtevası (%)
Katkısız	1,653	18,7
Afyon + %5 SÜK	1,600	20,5
Afyon + %10 SÜK	1,548	22,3
Afyon + %15 SÜK	1,534	22,95
Afyon + %20 SÜK	1,520	23,6
Afyon + %25 SÜK	1,500	24,25
Afyon + %30 SÜK	1,487	24,9

Çizelge 5.4. Afyon kili + Çatalağzı uçucu külü katkıli numunelerin kompaksiyon karakteristikleri

Katkı Oranı (%)	Kuru Yoğunluk (Mg/m <sup>3</sup> )	Optimum Su Muhtevası (%)
Katkısız	1,653	18,7
Afyon + %5 ÇÜK	1,632	19,0
Afyon + %10 ÇÜK	1,611	19,3
Afyon + %15 ÇÜK	1,577	19,9
Afyon + %20 ÇÜK	1,543	20,5
Afyon + %25 ÇÜK	1,529	21,15
Afyon + %30 ÇÜK	1,515	21,8



Şekil 5.3. Afyon kilinin değişen oranlarda Çatalağzi uçucu külü katkılı kompaksiyon grafikleri



Şekil 5.4. Afyon kilinin değişen oranlarda Soma uçucu külü katkılı kompaksiyon grafikleri

## 5.2. Yöntem

### 5.2.1. Elek analizi

Elek analizi için, etüvde ortalama 105 °C 'de 24 saat kurutulan zemin malzemesi gerekir. Numune kil ve silt sınırı olan 0.075 mm. açıklıklı (200 no'lu) elek üzerinde elek altından çıkan su berraklaşana kadar yıkanmıştır. Elek üzerinde kalan numune etüvde 24 saat kurumaya bırakılmıştır. Kalan numune tartılarak yıkama esnasındaki kayıp (silt ve kil) miktarı belirlenir. Bu numune büyükten küçüğe doğru sıralanmış eleklerden (3", 1 ½", 3/4", 3/8", 4#, 8#, 16#, 30#, 50#, 100# ve 200#) elenerek elek üzerinde kalan ve başlangıçta kullanılan zemin miktarına göre elekten geçen yüzdeler belirlenerek granülometri eğrisi çizilir. Afyon kili için deneyler yapılmıştır. Deneyde TS 1900-2 ve BS 1377 standardı göz önüne alınarak uygulama yapılmıştır.

### 5.2.2. Kıvam limitleri

Kıvam, kohezyonlu zeminlerde zeminin sertlik-yumuşaklık durumunun ölçüsüdür. Plastiklik veya plastisite ise ince taneli zeminlerde kırılmadan şekil verilebilmeyi ifade eder. Likit kıvamda zemin kendi ağırlığı altında yavaşça akabilir. Plastik durumda zemine istenilen şekil kolayca verilebilir. Yarı katı durumda zemine istenilen şekil zorlukla verilir, zeminde çatlamlar oluşur. Katı durumda ise zemine şekil verilemez. Atterberg (1911), tarafından bu kıvamları ayıran sınır su muhtevaları tanımlanmıştır. Deneyde TS 1900-1 ve ASTM D 4318 standardı uygulanmıştır.

#### 5.2.2.1. Likit limit deneyi

Kullanacağımız kil malzeme öncelikle 40 nolu elekten geçirilmiştir. 150-200 gr zemin saf su ile homojenleştirilerek Casagrande aletine yerleştirilmiştir. Aletin özel bıçağı ile zemin tabanında göz kararı ile 2 mm. genişliğinde oyuk açılır. Casagrande aletine yerleştirilen numune 1 cm yükseğe çıkıp yüzeye düşmektedir. Alet yaklaşık 2 devir/sn hızla çevrilmelidir. Bu işlem ortadaki oyuk birleşinceye kadar devam eder. Bu andaki vuruş sayısı ve numunenin su muhtevası deney föyüne kaydedilmiştir. 25 vuruş sayısına karşılık gelen su muhtevası numunenin likit kıvamdaki su muhtevasıdır.

### **5.2.2.2. Plastik limit deneyi**

24 saat etüvde kurutulmuş ve 40 nolu elekten elenerek hazırlanan numuneler homojen olacak şekilde saf su ile karıştırılarak plastik kıvama getirilir. Daha sonra cam levha üzerine konarak avuç içiyle göz kararı 3 mm çaplı silindirler oluşturulmuştur. Kopma ve çatlamların başladığı andaki su muhtevası plastik limit kıvamlarını vermiştir.

### **5.2.3. Özgül gravite deneyi**

Malzemenin birim hacmindeki ağırlığının aynı hacimdeki suyun ağırlığına oranı olarak tanımlanır. Zeminlerin dane özgül ağırlığı, birim hacim ağırlığı gibi malzemenin hacim ve ağırlık ilişkisinin tespit edilmesi için gereklidir. Deneyde TS 1900-1 ve ASTM D 422-63 standardı uygulanmıştır.

Numunenin özgül ağırlığı ( $G_s$ ) bir piknometre ve vakum cihazı yardımıyla tayin edilmiştir. Piknometre şişesi kapağı ile beraber etüvde kurutulduktan sonra tartılmıştır ( $W_1$ ). Etüvde kurutulmuş 50 gr kadar zemin numunesi piknometre şişesine doldurulur ve tartılır ( $W_2$ ). Piknometre şişesi üç aşamada doldurulacak şekilde havası alınmış saf su ilave edilerek içerideki hava vakum uygulanarak dışarıya atılmış (Şekil 5.5) ve tekrar tartım yapılmıştır ( $W_3$ ).

$$G_s = \frac{W_2 - W_1}{50 - W_3 + W_2} \quad (7)$$



Şekil 5.5. Özgül ağırlık deneyinde vakum uygulaması

#### 5.2.4. Standart Proctor kompaksiyon deneyi

Deneyin kullanılmasındaki amaç optimum su muhtevasının tespitidir. Deney Afyon kili için katkısız ve değişen katkı oranlarında (%5, %10, %15, %20, %25, %30) Soma uçucu külü ve Çatalağzı uçucu külü katılarak tekrarlanmıştır. Hazırlanan numunelerde hemen kırım yapılmıştır. Deneyde kullanılacak zemin numunesi (kuru ağırlığı üzerinden hesaplanır) üç tabaka halinde serilmiştir ve her bir tabaka 30,5 cm den serbest düşen 2,5 kg. ağırlığındaki bir tokmakla 25 vuruş ile sıkıştırılmıştır. Kullanılan tokmak ve vuruş sayılarının standart olması sebebiyle zemine sıkıştırma yolu ile verilen enerji de standarttır. Kullanılan moldun içindeki sıkıştırılmış zeminin yaş ağırlığı belirlenmiştir. Sıkıştırılmış zeminin su muhtevasının belirlenmesi için, alttan ve üstten olmak üzere iki yerden numune alınmıştır ve bu iki değer ortalama hesaplarında esas olmuştur. Bulunan su muhtevası değeri ( $\omega$ ) kullanılarak, kuru birim hacim ağırlığı ( $\rho_{dmaks}$ ) bulunmuştur. Ayrıca deney değişik su muhtevaları için hazırlanmış numuneler üzerinde tekrarlanmak suretiyle proktor eğrisi, dolayısıyla da optimum su içeriğiyle maksimum kuru

birim hacim ağırlıklar elde edilmiştir. Deneyde TS 1900-1 ve ASTM D 1557 - ASTM D 698 göz önüne alınmıştır.

### **5.2.5. Şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleri**

Araştırmada, numunelerin şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleri direkt yöntemler kullanılarak yapılmıştır. Bu esasa, şişme basıncının belirlenmesinde Potential Volume Change (PVC) meter ekipmanı kullanılmıştır. PVC metre deneyinin yapılmasına ait standart bir yöntem bulunmamaktadır. Çalışmada Lambe tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır (Lambe, 1960).

#### **5.2.5.1. Şişme yüzdesi**

Şişme yüzdesi; bir zemin numunesinin yatay yönlerde hacim değişirmesi engellendiği durumda, sabit bir sürşarj yüklemesi altında su altına bırakılması durumunda tek boyutta meydana getirebileceği hacim değişimi olarak tanımlanmaktadır.

Şişme yüzdesinin belirlenmesinde kullanılan genişleme indisi deneyi ASTM D 4829 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Optimum su muhtevası değerlerinde belirli kuru ağırlıklarda numuneler hazırlanmış ve su kaybını önlemek amacıyla koruma altına alınmıştır. Bu kapsamda yapılan şişme deneyleri; standart şişme kalıbının boyutları belli olduğundan (D=70 mm ve H=20 mm) kalıba yerleştirilecek malzeme miktarı belli olup 3 tabakada sıkıştırılmıştır. Bu sıkıştırma işlemi sonrasında numuneler ekipmana yerleştirilmiş ve suya doymun hala getirilmiştir. Şişme potansiyelinin önemli bir değişkeni olan şişme yüzdesi, 7 kPa basınç altında suya boğulan numunenin 24 saat veya şişme tamamlanana kadar gelişen nihai deformasyonun, numunenin başlangıç boyuna oranıdır. Numunelerin suya boğulmasından hemen sonra, farklı zaman aralıklarında sisteme bağlı dijital deformasyon saatlerinden (0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 60, 120, 240, 360 .... 2880 dakika) şişme yüzdesi değişimleri ölçülmüştür.



### **5.2.5.2. Şişme basıncı**

Şişme basıncı; bir zemin numunesinin yatay yönde hacim değiştirmesi engellendiğinde, su altında bırakıldığında tek boyutta meydana getirebileceği hacim değişimini engellemek için uygulanması gereken düşey basınçtır.

Bu esasa, şişme basıncının belirlenmesinde PVC metre ekipmanı kullanılmıştır. PVC metre deneyinin yapılmasına ait standart bir yöntem bulunmamaktadır. Çalışmada Lambe tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır (Lambe, 1960). PVC metre deneyin esası, sıkıştırılmış zemin numunesinin ıslatılmasından sonra gelişen şişme deformasyonunun engellenmesiyle oluşan basıncının belirlenmesidir. Yük halkası kolu, sıkıştırması yapılan ve sisteme yerleştirilen numune üzerine gelecek şekilde yerleştirilir. Numune suya boğulur ve belirli aralıklarla yük halkasından değer okunur. Yük halkasından okunan değer, kalibrasyon eğrisi kullanılarak veya yük halka faktörüyle çarpılarak birimi bilinen yüke çevrilir. Yükün numune alanına bölünmesiyle basınç değeri elde edilir.

### **5.2.6. Dispersibilite deneyleri**

Dispersif killer, inşaat mühendisliği pratiğinde sıkça kullanılan, elek analizi, hidrometre, Atterberg limitleri limitleri, konsolidasyon, kompaksiyon gibi klasik laboratuvar indeks deneyleri ile tanımlanamamaktadır. Bu yüzden özel deney prosedürleri geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında hem katkısız hem de katkılı numunelere ABD Su İşleri Teşkilatı (USBR) standart yöntemleri dikkate alınarak iğne deliği deneyi ve dağılma deneyi uygulanmıştır (USBR 5400; USBR 5410; 1989).

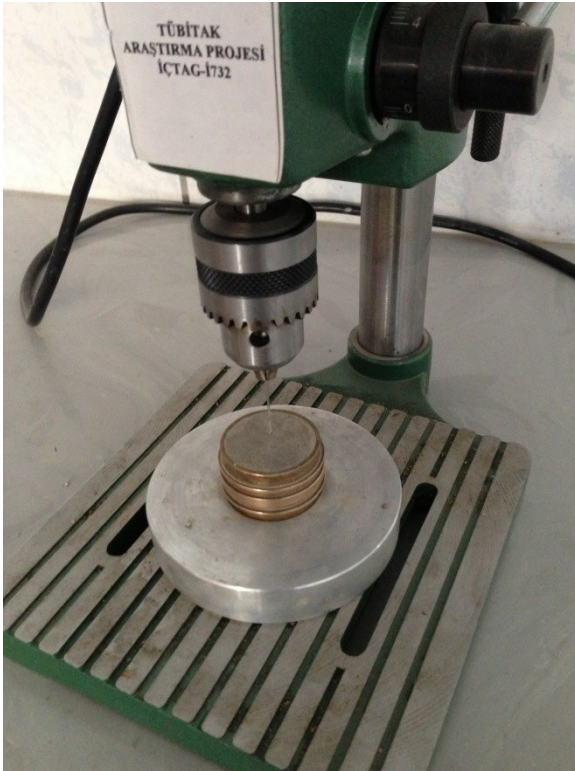
#### **5.2.6.1. Dağılma deneyi**

Bu deneyde, bir kenarı 15 mm ebadında küp şeklinde bir zemin numunesi 250 ml saf suyun içerisine dikkatlice yerleştirilir. Zeminin su ile reaksiyona girmesi ile kolloidal (<0.002 mm) boyutundaki parçacıklar ayrılmaya başlar ve su içinde süspansiyon haline geçer. Bu esaslarla belirli zaman aralıklarında gözlemler yapılarak sınıflama yapılmıştır (USBR 5400, 1989). Oluşan bulanıklık derecesine göre zemin; bulanıklık yok denecek kadar az ise “Dispersif Değil”, az ise “Ara Zemin”, orta derecede ise “Dispersif” ve yüksek

bulanıklıkta “Çok Yüksek Dispersif” olarak tanımlanır. Dağılma deneyi iğne deliği deneyinin yardımcı deneyi olarak kabul edilir. Tek başına dağılma deneyi ile dispersibilitiyi belirlemek güvenilir olmaz. Nitel bir deneydir.

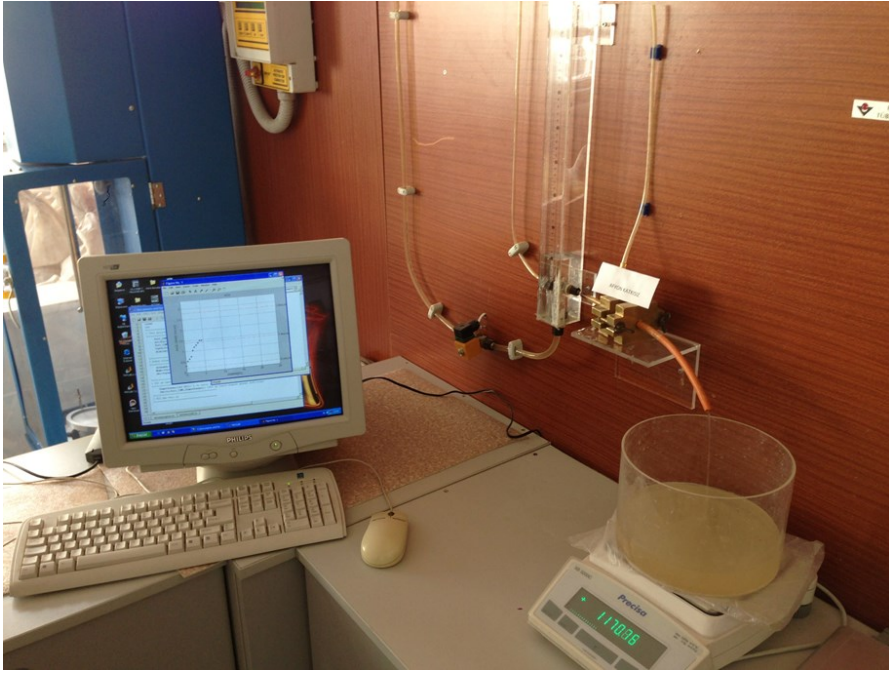
### **5.2.6.2. İğne deliği deneyi**

Bu deneylerden en güvenilir olarak kabul edilen iğne deliği deneyi, kil zeminlerin dispersibilite özelliğinin değerlendirilmesi için önerilmiş fiziksel ve nicel sonuçlar sunan bir deney yöntemidir. Deneyde, standart Proctor enerji seviyesinde sıkıştırılmış 25 mm boya ve 33 mm çapa sahip silindirik zemin numunesi içine 1.0 mm çapında bir delik açılır (Şekil 5.6). Saf su; 50, 180 ve 380 mm (hidrolik eğimleri yaklaşık 2, 7 ve 15) yük altında bu delikten geçirilir. Suyun akım debisi ve bulanıklık derecesi kaydedilir. İğne deliği deneyinin yapılması ve sonuçlarının değerlendirilmesine yönelik aşamalar USBR 5410 (1989) standardında uygun olarak ve deney sonuçlarına bağlı nicel değerlendirme de Acciardi (1985) tarafından önerilen şekliyle yapılmıştır.

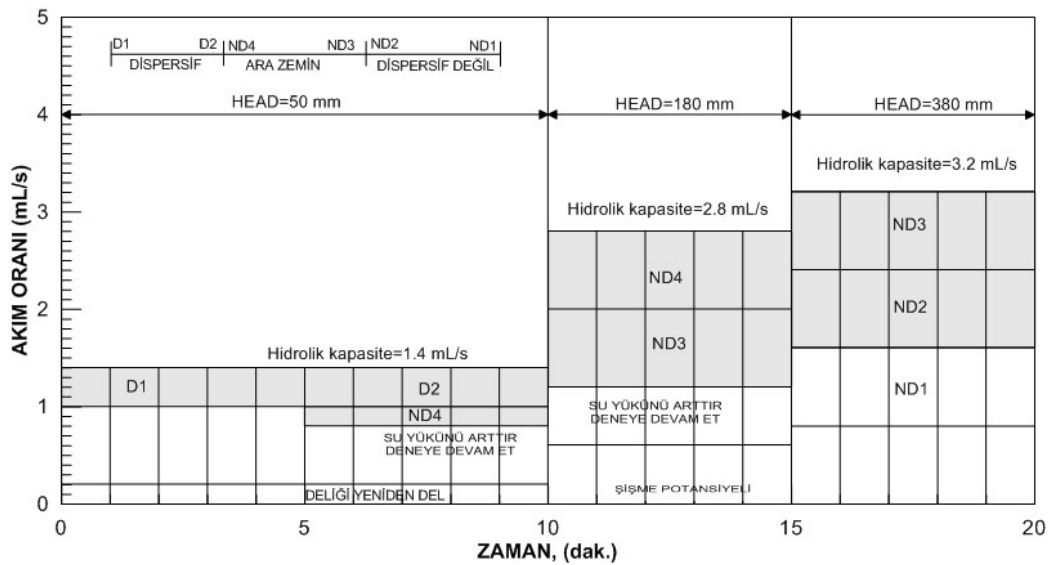


Şekil 5.6. İğne deliği deneyi numune delme makinesi

Deney sonucunda malzeme 50 mm su yükü altında hızla dağılıyorsa “dispersif”, 50 veya 180 mm yük altında yavaşça erozyona uğruyorsa “ara zemin”, 380 veya 1020 mm yük altında erozyon gözlenmiyorsa “dispersif değil” olarak rapor edilir. Numune içinde açılan bu delikle, dolgu barajların geçirimsiz çekirdeğinde oluşabilecek bir çatlak ya da kaçak kanalının küçük ölçekte simülasyonu hedeflenmiştir. Kullanılan deney düzeneği ve deney abağı şekil 5.7 ve şekil 5.8’de verilmiştir



Şekil 5.7. İğne deliği deney düzeneği

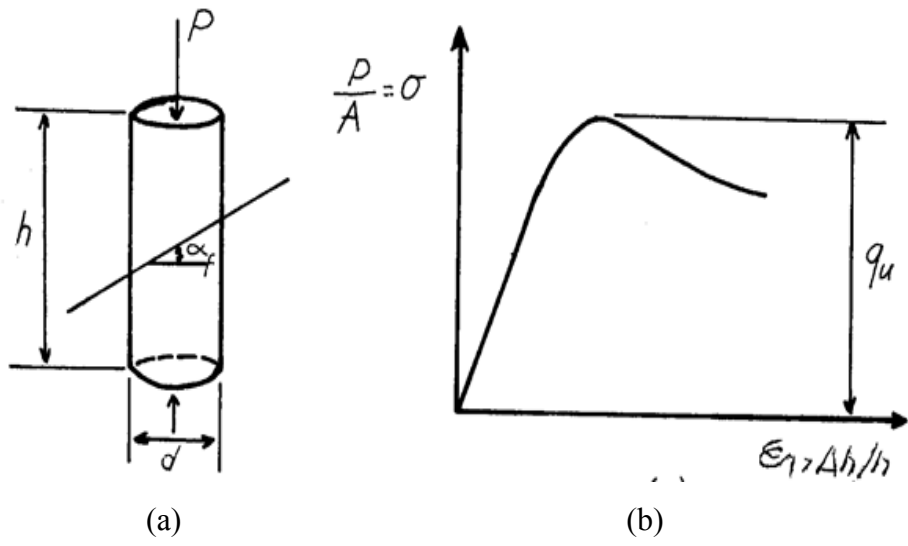


Şekil 5.8. İğne deliği deneyinde kullanılan tasarım kartı

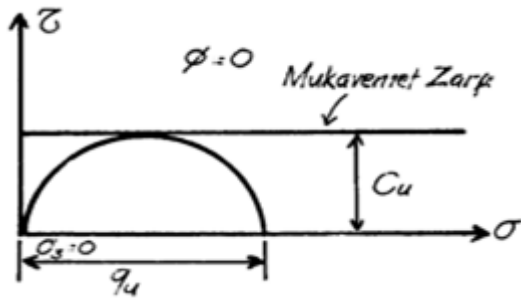
### 5.2.7. Serbest basınç deneyi

Kayma dayanımının en basit şekilde ölçümü, numunenin düşey ekseninde basınç uygulanarak kırılması şeklindedir. Silindirik zemin numunesi yalnızca eksenel doğrultuda yüklemeye tabi tutulmaktadır (Şekil 5.9a). Bu deneyde, eksenel yük artışları altında meydana gelen numunenin boyunun kısalması yani eksenel şekil değiştirmesi ölçülür ve gerilme şekil değiştirme eğrileri elde edilir (Şekil 5.9b). Eksenel gerilmenin en büyük değeri (veya göçme kabul edilebilecek şekil değiştirme seviyesine karşılık gelen değeri) zeminin serbest basınç dayanımı ( $q_u$ ) değerini vermektedir. Serbest basınç deneyini özel bir deney olarak tanımlamak mümkündür. Serbest basınç deneyi ancak herhangi bir yanıl destek olmaksızın kendi kendini dik tutabilecek özelliklere sahip zeminler üzerinde uygulanabilmektedir. Bu yönden kumlar üzerinde uygulanması mümkün değildir. Yalnızca killi zeminler için kullanılan bir deney yöntemi olmaktadır. Drenaj koşulları kontrol edilemediğinden drenajsız kayma mukavemeti hızlı yükleme yapılarak elde edildiği varsayılır (Önalp, 2007).

Bu deneyde zemini konsolide etmek, boşluk suyu basınçlarını ölçmek imkansızdır. Ancak bu deney drenajsız kayma mukavemetini belirlemede en çok kullanılan deney yöntemidir. Bir serbest basınç deneyinde göçme anındaki gerilme durumunu gösteren Mohr dairesi ve drenajsız kayma mukavemeti zarfı Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Drenajsız kayma mukavemetinin  $\tau = c_u = q_u/2$  olarak elde edilebileceği bu sekilden açık olarak görülebilmektedir. Numunede oluşan kayma düzleminin alt ve üst yükleme başlıkları ile kesişmemesi için, boy uzunluğu/çap oranının  $h/d > 2$  olarak seçilmesi uygun olmaktadır. Şekil 5.10'da deney anından bir görüntü verilmiştir



Şekil 5.9. Serbest basınç deneyi ve sonuçları (Özaydın, 1989)



Şekil 5.10. Serbest basınç deney sonuçlarını gösteren Mohr dairesi ve mukavemet zarfi



Şekil 5.11. Serbest basınç deney sistemi

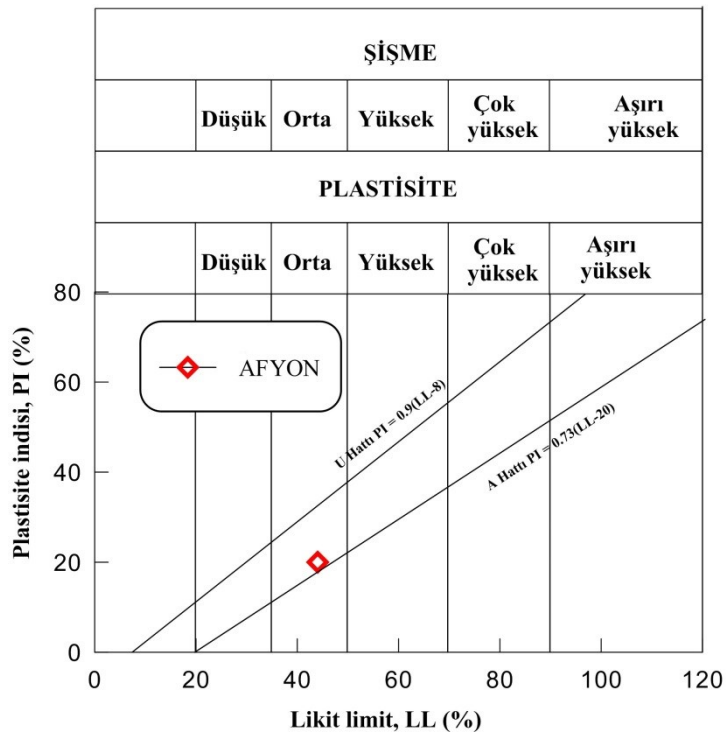
## 6.BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında yapılan deneysel çalışmalar; öncelikle tanımlama ve sınıflama deneyleri olup; daha sonra, çalışmanın amacına yönelik olarak şişme deneyleri, dispersibilite deneyleri ve dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, numunenin alınması, deneye hazırlanması ve deneylerin yapılmasında ASTM (1994) standart yöntemlerine uyulmuştur. Tanımlama deney sonuçlarına bağlı olarak numune, Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi'ne (USCS) göre sınıflandırılmıştır (ASTM D 2487-00). Numunenin dispersibilite ve şişme özellikleri belirlendikten sonra bu özelliklerin Çatalağzı ve Soma uçucu külü katkı ilavesi ile değişimleri incelenmiştir. Bu kapsamda; şişme yüzdesi deneyi, şişme basıncı deneyi, dağılma deneyi, iğne deliği deneyi ve serbest basınç deneyleri her bir numune için belirlenen standart Proctor enerjisinde ve Afyon kiline değişen yüzdelerde (% 0, %5, %10, %15, %20, %25, %30) Çatalağzı ve Soma uçucu külü katkı ilavesiyle hazırlanan numuneler üzerinde yapılmıştır. Deney sonuçları ana başlıklar halinde sunulmaktadır.

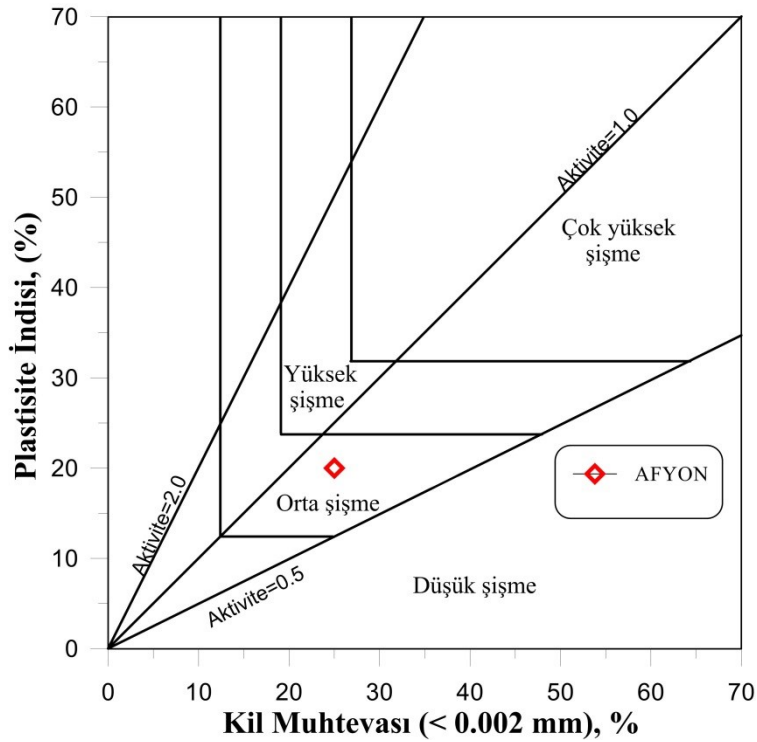
### 6.1. Şişme Deney Sonuçları

Bu bölümde şişme deneylerine ait sonuçlar verilmektedir. Şişme deneyleri, değişen katkı oranlarında numunelerin şişme yüzdesi ve şişme basıncı üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır.

Afyon kilinin plastisite karakteristiklerine (LL ve PI) bağlı olarak dönüştürülmüş plasitisite kartında(Şekil 6.1) ve şişme potansiyeli kartında( Şekil 6.2) orta derece şişme değerleri vermesi beklenmektedir. Yapılan deney sonuçlarına göre beklenen şişme değerlerine ulaşılmıştır.



Şekil 6.1. Numunenin dönüştürülmüş plastisite kartındaki yeri (Daksanamurty ve Raman, 1973)

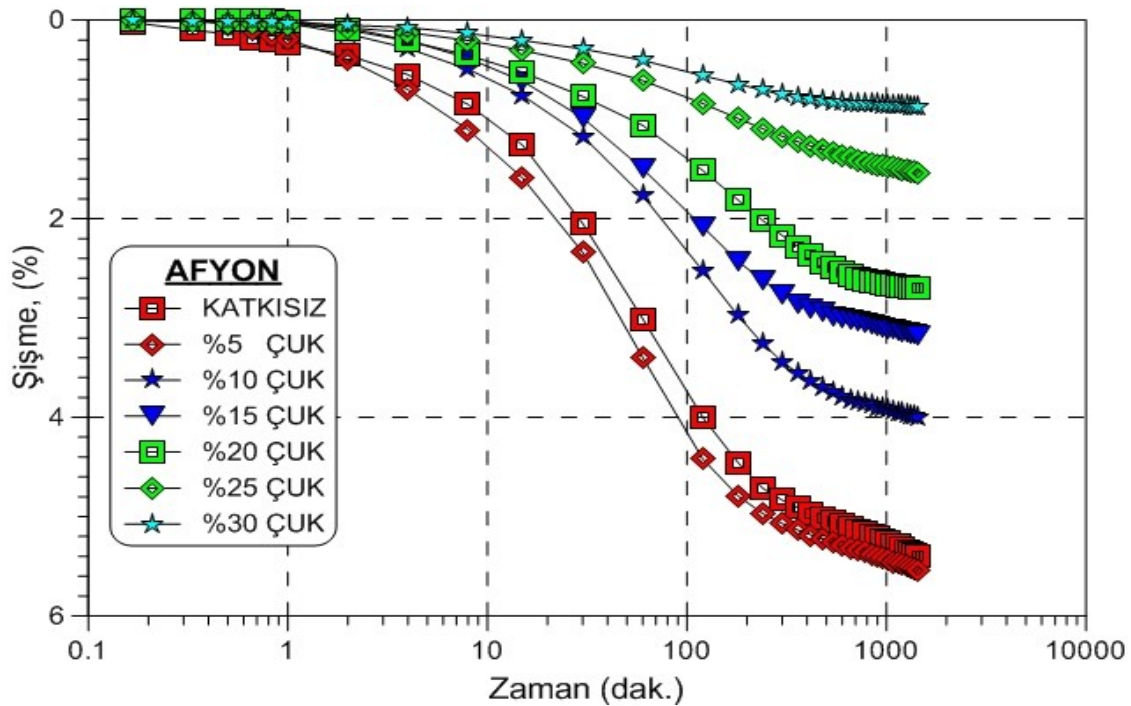


Şekil 6.2. Numunenin şişme potansiyeli sınıflama kartındaki yeri (Van der Merwe, 1964)

### 6.1.1. Şişme yüzdesi deney sonuçları

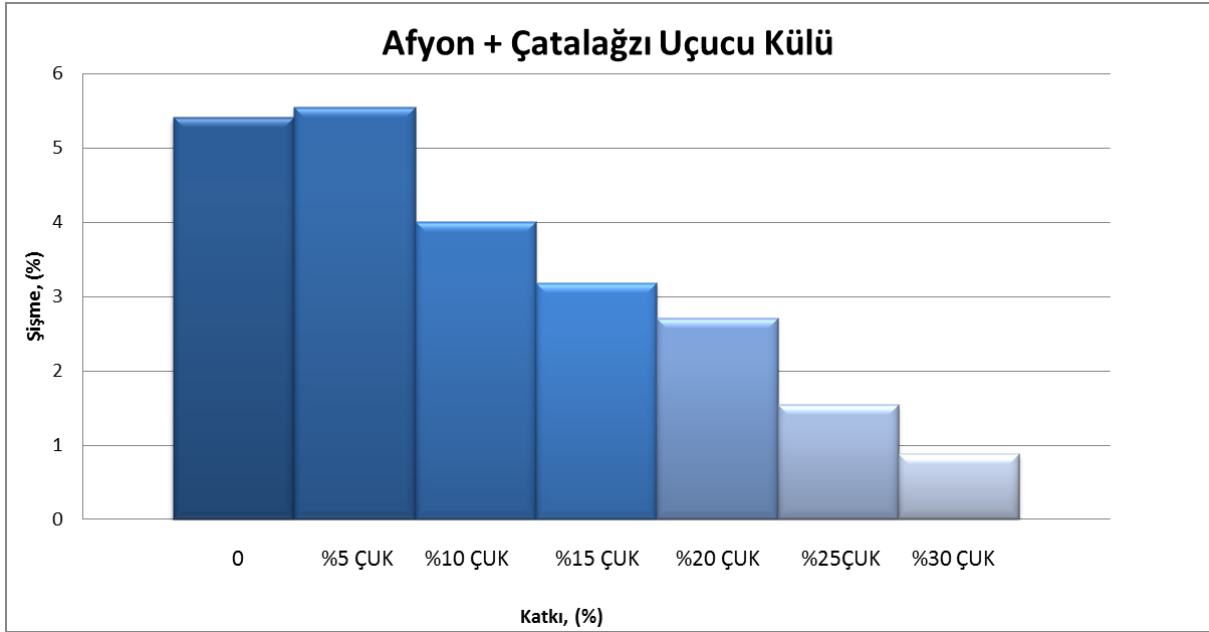
Sonuçlar ilgili numuneler esasında ayrı ayrı incelendiğinde Afyon kili için Çatalağzı uçucu külü katkı oranlarına bağlı şişme yüzdesi zaman ilişkisi Şekil 6.3’de, şişme yüzdesindeki nihai değişimler ve değerleri sırasıyla Şekil 6.4 ve Çizelge 6.1’de sunulmaktadır. Artan katkı oranıyla beraber %5 katkı oranında şişme yüzdesinde ufak bir artış meydana gelmiştir. Bu artışın sıkıştırmadan kaynaklandığı düşünülmektedir. %10 katkı ilavesinden itibaren şişme yüzdesi katkı oranı arttıkça önemli ölçüde azalmıştır.

Afyon kili için Soma uçucu külü katkı oranlarına bağlı şişme yüzdesi zaman ilişkisi Şekil 6.5’de, şişme yüzdesindeki nihai değişimler ve değerleri sırasıyla Şekil 6.6 ve Çizelge 6.2’de sunulmaktadır. Artan katkı oranıyla beraber %5 katkı oranında şişme yüzdesi en düşük değere ulaşmıştır.



Şekil 6.3. Afyon kili + Çatalağzı uçucu külü için şişme yüzdesi zaman ilişkisi

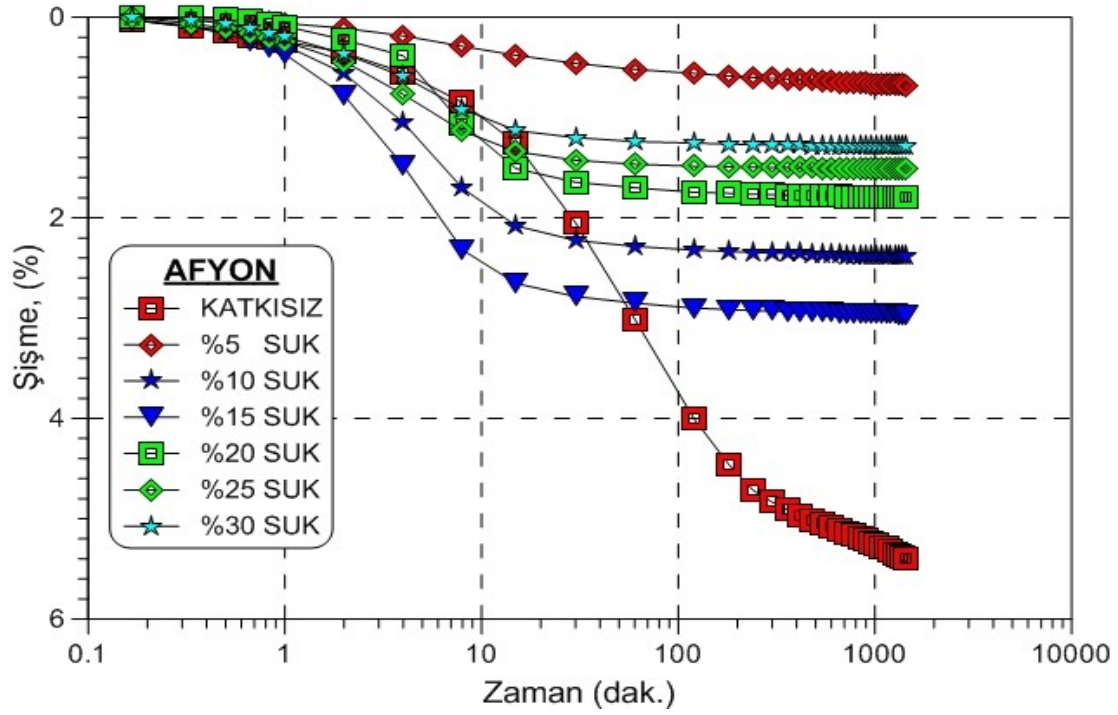




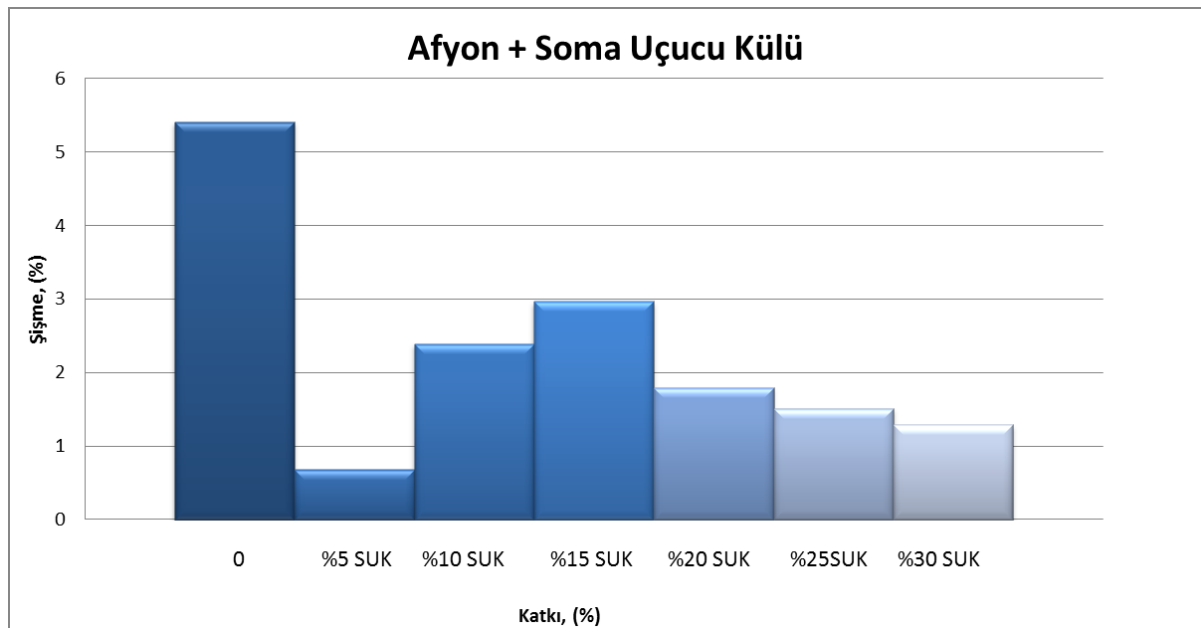
Şekil 6.4. Afyon kiline ait değişen Çatalağzı uçucu külü katkısı oranlarına göre şişme yüzdesi değişimi

Çizelge 6.1. Afyon kiline ait değişen Çatalağzı uçucu külü katkı oranlarına göre şişme yüzdesi deney sonuçları

Katkı Oranı (%)	Şişme Yüzdesi (%)
Katkısız	5,41
Afyon + %5 ÇUK	5,55
Afyon + %10 ÇUK	4,00
Afyon + %15 ÇUK	3,18
Afyon + %20 ÇUK	2,71
Afyon + %25 ÇUK	1,54
Afyon + %30 ÇUK	0,88



Şekil 6.5. Afyon kili + Soma uçucu külü için şişme yüzdesi zaman ilişkisi



Şekil 6.6. Afyon kiline ait değişen Soma uçucu külü katkısı oranlarına göre şişme yüzdesi değişimi

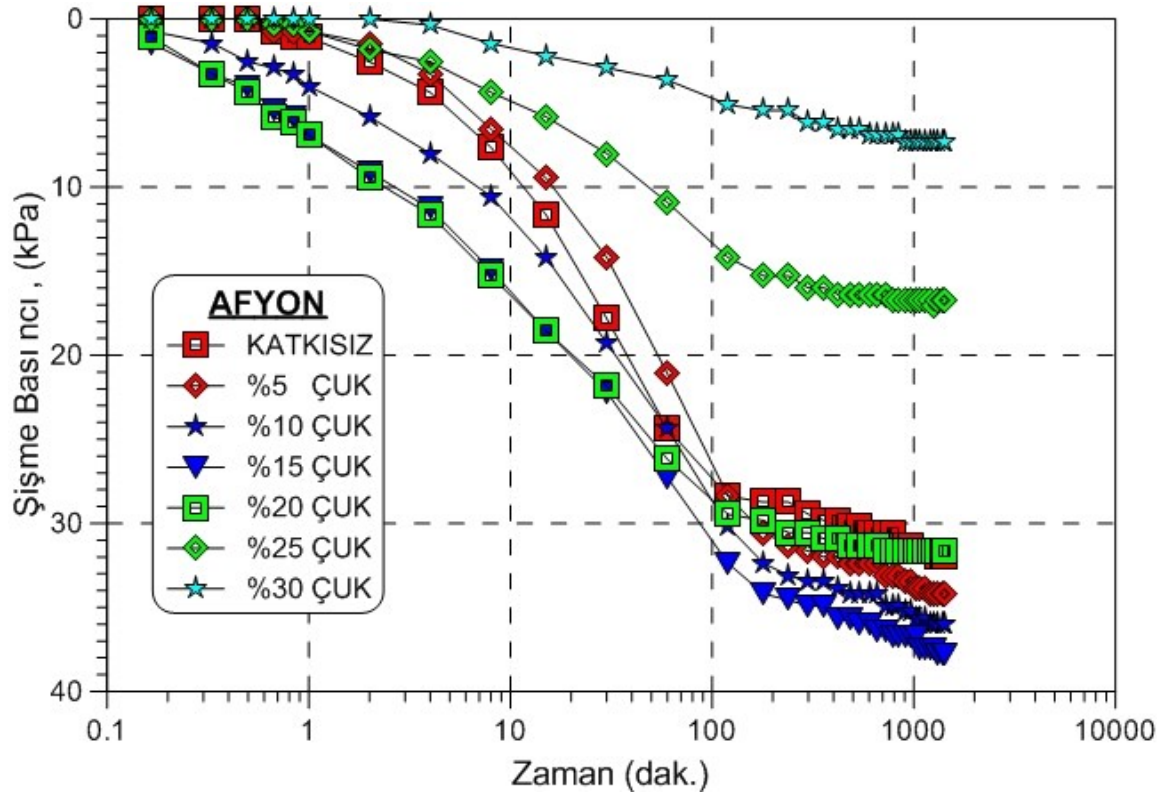
Çizelge 6.2. Afyon kiline ait değişen Soma uçucu külü katkı oranlarına göre şişme yüzdesi deney sonuçları

Katkı Oranı (%)	Şişme Yüzdesi (%)
Katkısız	5,41
Afyon + %5 SUK	0,68
Afyon + %10 SUK	2,39
Afyon + %15 SUK	2,97
Afyon + %20 SUK	1,80
Afyon + %25 SUK	1,51
Afyon + %30 SUK	1,29

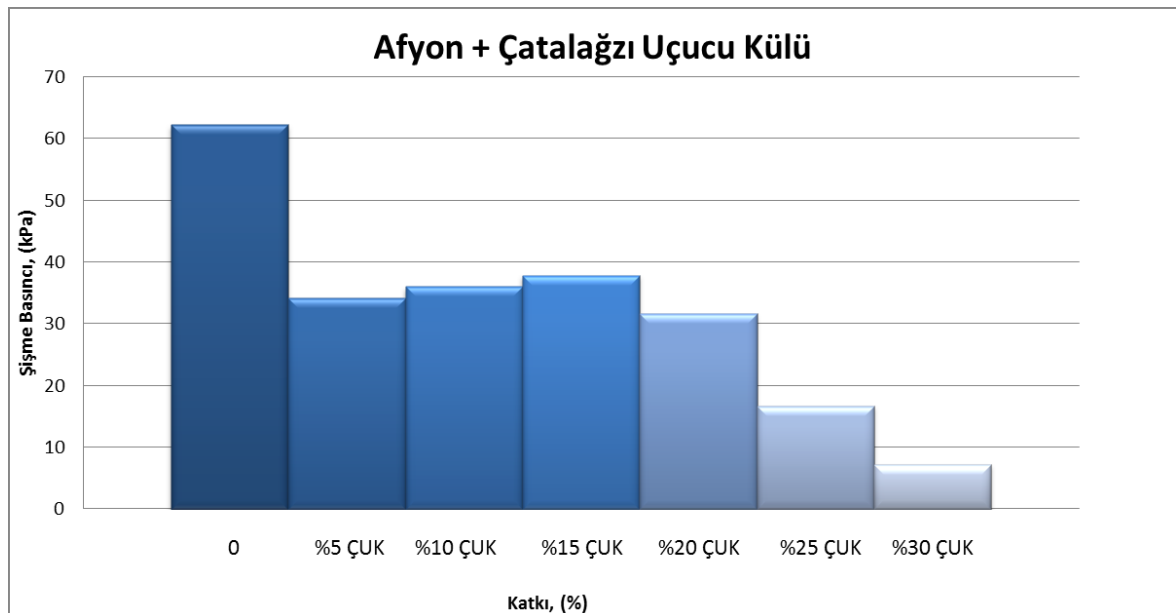
### 6.1.2. Şişme basıncı deney sonuçları

Deneylelerden elde edilen sonuçlar ayrı ayrı değerlendirildiğinde; Afyon kili için Çatalağzı uçucu külü katkı oranlarına bağlı şişme basıncının zamana bağlı değişimi Şekil 6.7’de, artan katkı oranlarında şişme basıncındaki nihai değişimler ve değerleri sırasıyla Şekil 6.8 ve Çizelge 6.3’de sunulmaktadır. Artan katkı miktarı ile şişme basıncı değerlerinde belirgin azalma sağlanmıştır. %30 katkı oranında en düşük şişme basıncı değerine ulaşılmıştır.

Afyon kili için Soma uçucu külü katkı oranlarına bağlı şişme basıncının zamana bağlı değişimi Şekil 6.9’da, artan katkı oranlarında şişme basıncındaki nihai değişimler ve değerleri sırasıyla Şekil 6.10 ve Çizelge 6.4’de verilmektedir. %5 katkı oranında en düşük şişme basıncı değerine ulaşılmıştır.



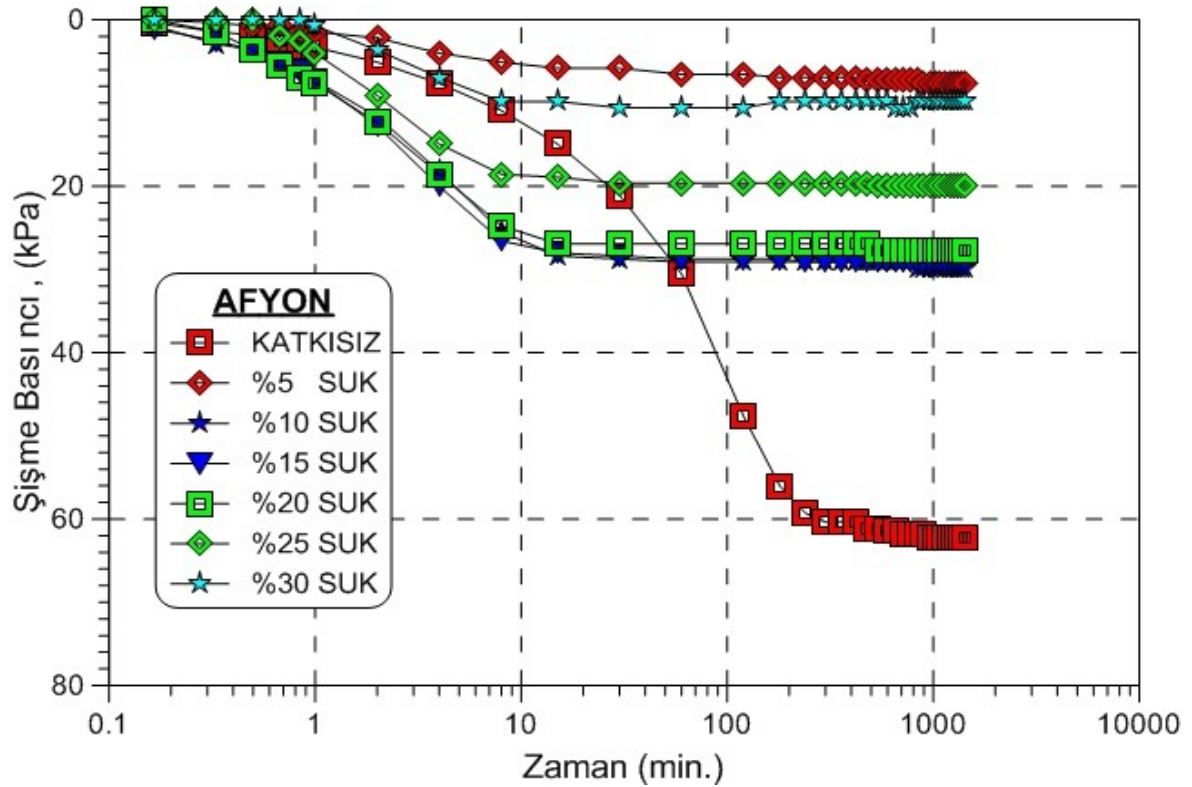
Şekil 6.7. Afyon kili + Çatalağzı uçucu külü için şişme basıncı zaman ilişkisi



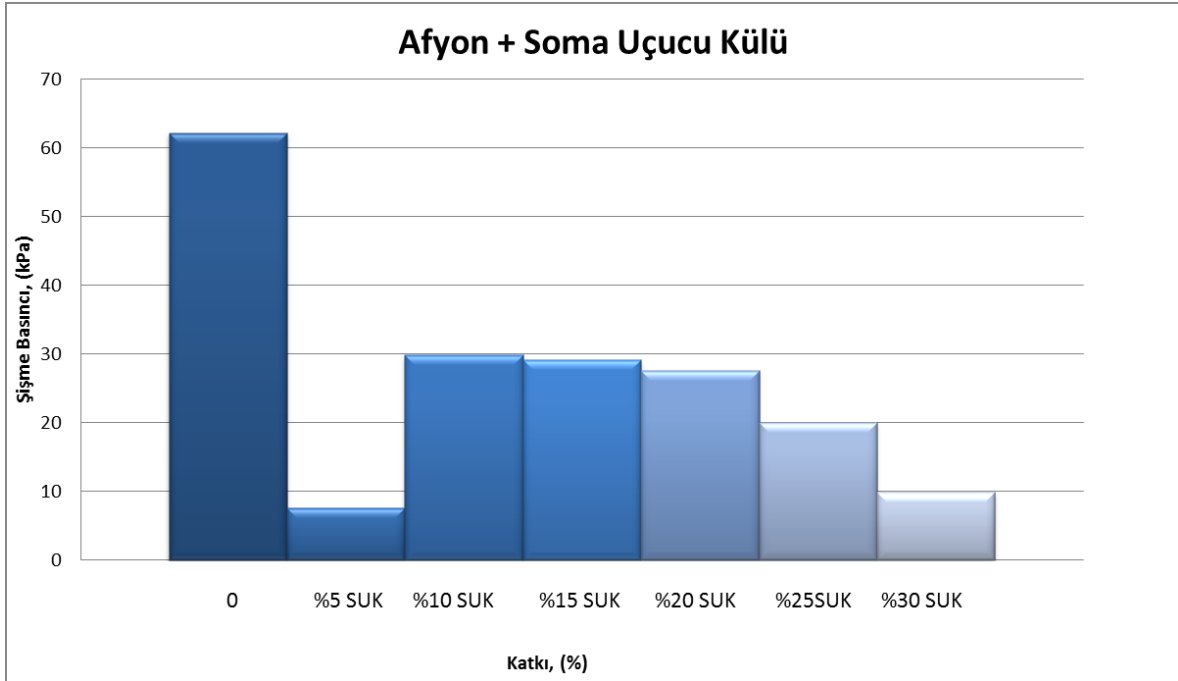
Şekil 6.8. Afyon kiline ait değişen Çatalağzı uçucu külü katkısı oranlarına göre şişme basıncı değişimi

Çizelge 6.3. Afyon kiline ait değişen Çatalağzı uçucu külü katkı oranlarına göre şişme basıncı deney sonuçları

Katkı Oranı (%)	Şişme Basıncı (kPa)
Katkısız	62,21
Afyon + %5 ÇUK	34,20
Afyon + %10 ÇUK	36,01
Afyon + %15 ÇUK	37,83
Afyon + %20 ÇUK	31,65
Afyon + %25 ÇUK	16,73
Afyon + %30 ÇUK	7,28



Şekil 6.9. Afyon kili + Soma uçucu külü için şişme basıncı zaman ilişkisi



Şekil 6.10. Afyon kiline ait değişen Soma uçucu külü katkısı oranlarına göre şişme basıncı değişimi

Çizelge 6.4. Afyon kiline ait değişen Soma uçucu külü katkı oranlarına göre şişme basıncı deney sonuçları

Katkı Oranı (%)	Şişme Basıncı (kPa)
Katkısız	62,21
Afyon + %5 SÜK	7,64
Afyon + %10 SÜK	29,83
Afyon + %15 SÜK	29,10
Afyon + %20 SÜK	27,65
Afyon + %25 SÜK	20,01
Afyon + %30 SÜK	9,82

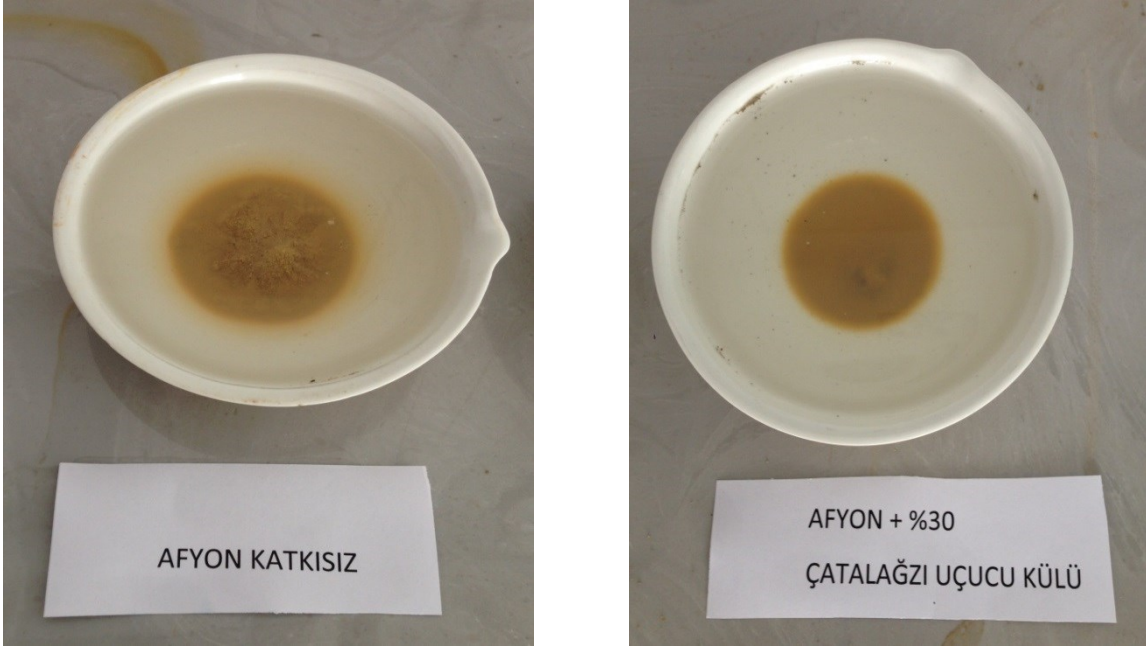
## 6.2. Dispersibilite Deney Sonuçları

Tüm fiziksel ve kimyasal deneylerde, zemin numunelerinin tabii su muhtevasında deneye tabi tutulmaları ve su muhtevasında değişiklik olmasını önlemek amacıyla izole edilmiş kaplar içinde laboratuvara getirilmeleri gereklidir. Deney öncesi numunelerin etüvde kurutulması yoluna kesinlikle gidilmemelidir çünkü etüv kurutmanın malzemenin dispersiflik durumu üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Zaman zaman farklı deneyler arasında, verdikleri sonuçlar açısından bazı uyumsuzluklar görülebilmektedir. Bu durumda önüne gelen laboratuvar sonuçlarına göre karar verme durumunda olan mühendisin sıkıntı yaşaması doğal olmaktadır. Halen bazı araştırmacılar tarafından dispersiflik durumunun tayini açısından hangi deneylerin daha güvenilir olduğu ve bunların bir arada değerlendirilmesi sırasında nasıl bir yol izlenebileceği hususunda çalışmalar sürdürülmektedir. Gerek ülkemizde gerek diğer ülkelerde yaygın uygulama, numune üzerinde tüm dispersiflik deneylerini yaptırmak ve bunları bir arada değerlendirirken ihtiyatlı olmak şeklindedir. (Vural, 2012)

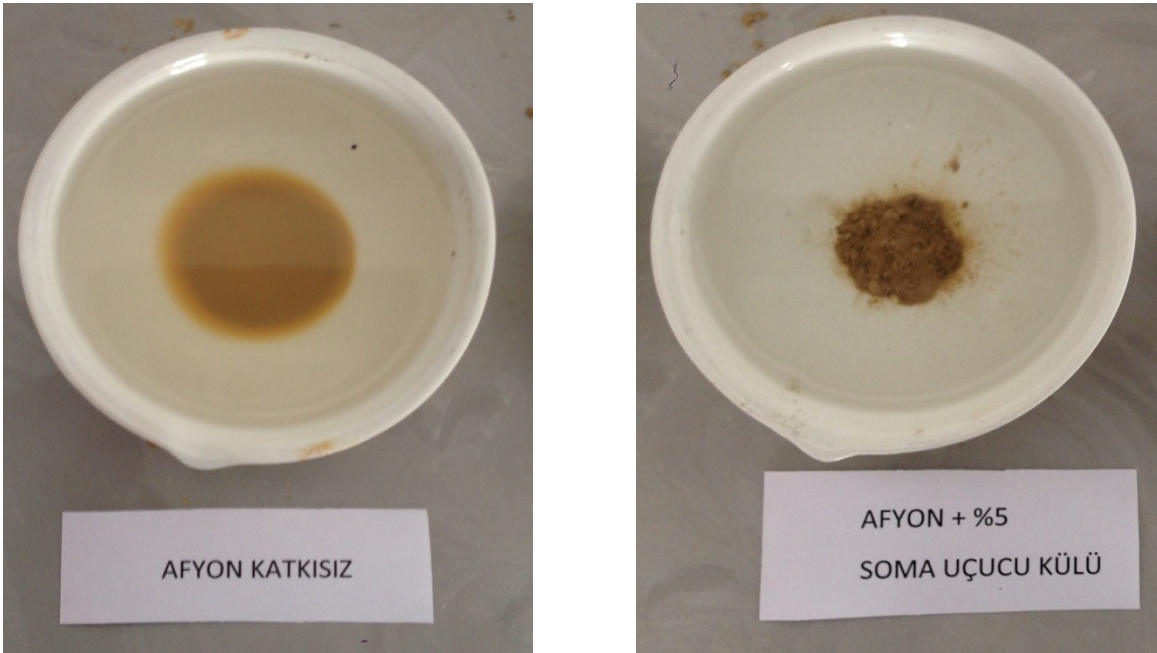
### 6.2.1. Dağılma deney sonuçları

Dağılma deney sonuçları şekil 6.11, 6.12'de, Afyon kili + Çatalağzı uçucu külü, Afyon kili + Soma uçucu külü için sırasıyla verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde Afyon kili + Çatalağzı uçucu külü için; katkı malzemesi olarak kullanılan Çatalağzı uçucu külünün dispersibilite davranışına katkı sağlamadığı açık olarak görülmektedir. %30 katkı oranına kadar zeminin dispersibilitesinde olumlu bir etki olmamıştır. Bunun sebebi Çatalağzı uçucu külünün F sınıfı (düşük kireçli) bir uçucu kül olmasıdır.

Afyon kili + Soma uçucu külü için; katkı malzemesi olarak kullanılan Soma uçucu külünün zeminin dispersibilite davranışını olumlu yönde etkilediği açık olarak görülmektedir. Katkısız zemin numunesinin etrafını kolloidal bir bulutlanma kaplamışken, %5 katkı oranından itibaren bu bulutlanma azalmıştır. Bu da zeminin dispersif davranışının azaldığını göstermektedir. Soma uçucu külü katkısının %5 katkı oranından itibaren etkisini göstermesinin sebebi Soma uçucu külünün C sınıfı (yüksek kireçli) bir uçucu kül olmasıdır.



Şekil 6.11. Afyon + Çatalağzı uçucu külü dağılma deneyi



Şekil 6.12. Afyon + Soma uçucu külü dağılma deneyi

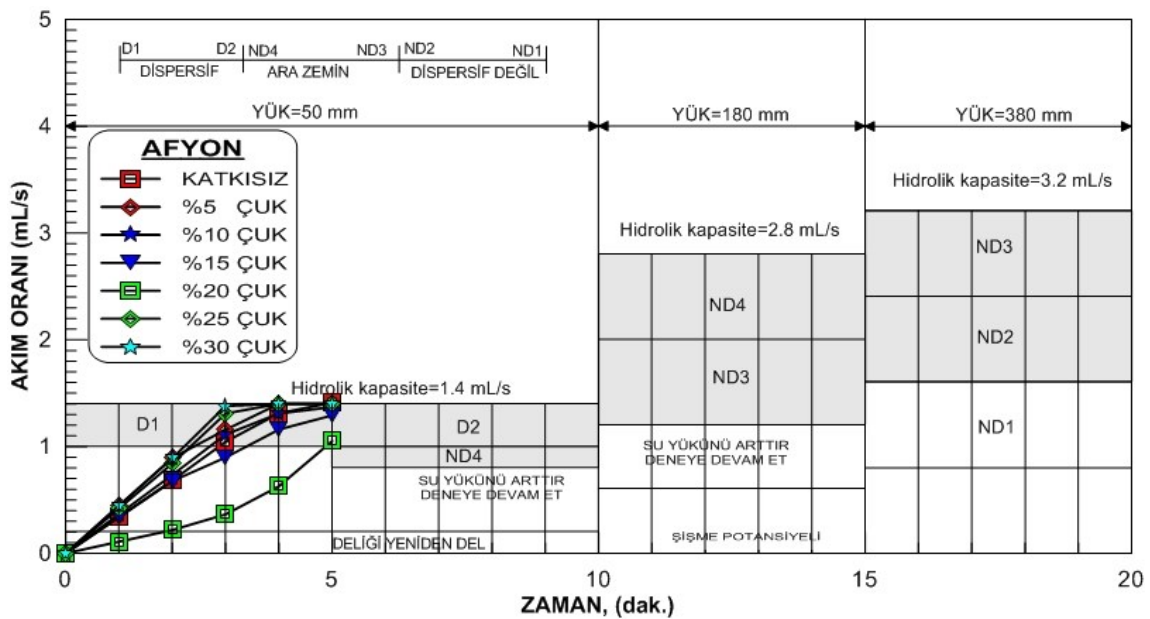


## 6.2.2. İğne deliği deney sonuçları

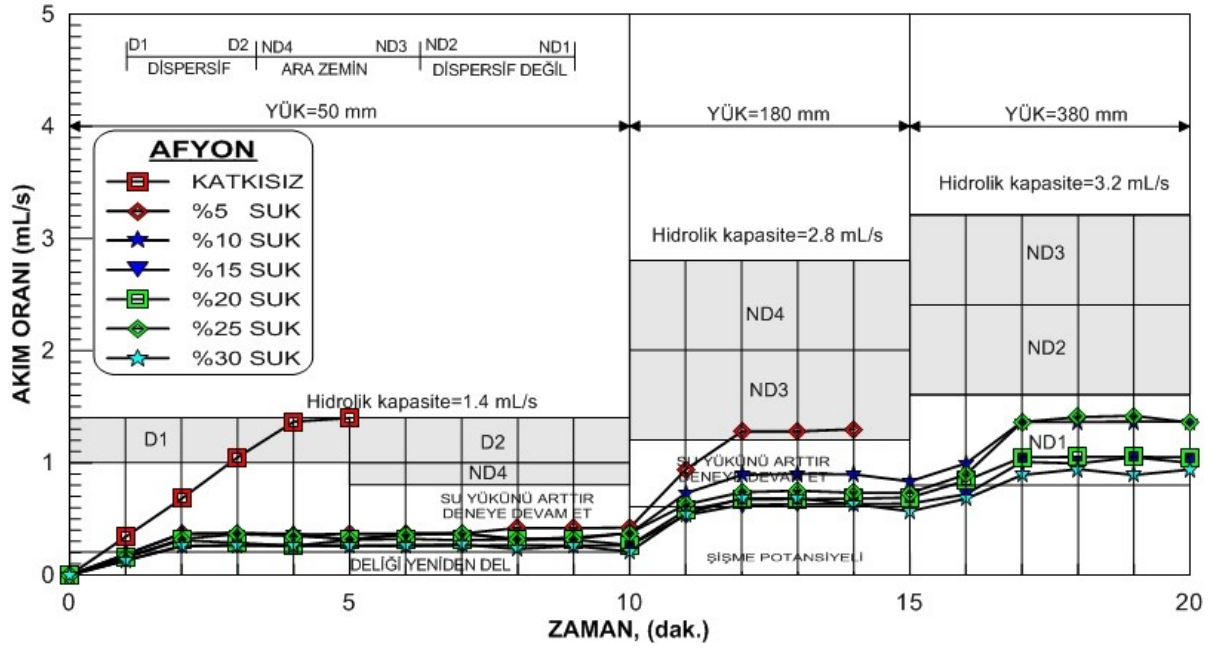
İğne deliği deney sonuçları Şekil 6.13 ve 6.14’de sırasıyla Afyon+Çatalağzı uçucu külü ve Afyon+Soma uçucu külü için verilmiştir. Nihai olarak numunelerin dispersif özelliklerinin katkı yüzdesi ile değişimleri de Çizelge 6.5’de sunulmaktadır.

Deney sonuçları dikkate alındığında, Afyon+ Çatalağzı uçucu külü için; katkısız zemin, %5, %10, %15, %20, %25, %30 katkılı zeminler D1 (dispersif) sınıfına girmişlerdir. Katkısız zemine Çatalağzı uçucu külü ilavesiyle beraber dispersibilite özelliğinde bir gelişme görülmemiştir. Dağılma deneyi ve iğne deliği deneylerinin sonuçları birbiriyle örtüştüğü için Çatalağzı uçucu külünün zeminin dispersif özelliği üzerinde iyileştirme etkisi yoktur.

Afyon + Soma uçucu külü için; katkısız zemin D1 (dispersif), %5 katkılı zemin ND3 (ara zemin), %10, %15, %20, %25, %30 katkılı zeminler ND1 (dispersif değil) sınıfına girmişlerdir. Katkısız zemine Soma uçucu külü ilavesiyle beraber dispersif olan zemin, %5 Soma uçucu külü katkısıyla ara zemin daha sonraki katkı seviyelerin de ise dispersif olmayan zemin özelliği kazanmıştır. Dağılma deneyi ve iğne deliği deneylerinin sonuçları birbiriyle örtüştüğü için Soma uçucu külünün dispersif özellik üzerindeki iyileştirme etkisi kesinleşmiştir.



Şekil 6.13. Afyon + Çatalağzı uçucu külü için iğne deliği deney sonuçları



Şekil 6.14. Afyon + Soma uçucu külü için iğne deliği deney sonuçları

Çizelge 6.5. Katkısız ve katkılı numuneler üzerinde yapılan dispersibilite deney sonuçları

Numune	Yapılan Deney	Katkı Miktarı						
		0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Afyon + ÇUK	Dağılma deneyi	K3	K3	K3	K3	K3	K3	K3
	İğne deliği deneyi	D1	D1	D1	D1	D1	D1	D1
Afyon + SUK	Dağılma deneyi	K3	K2	K1	K1	K1	K1	K1
	İğne deliği deneyi	D1	ND3	ND1	ND1	ND1	ND1	ND1

D1 ve D2 : Dispersif, ND3 ve ND4: Ara zemin, ND1 ve ND2: Dispersif olmayan zemin

K3 ve K4: Dispersif, K2: Ara zemin, K1: Dispersif olmayan zemin.

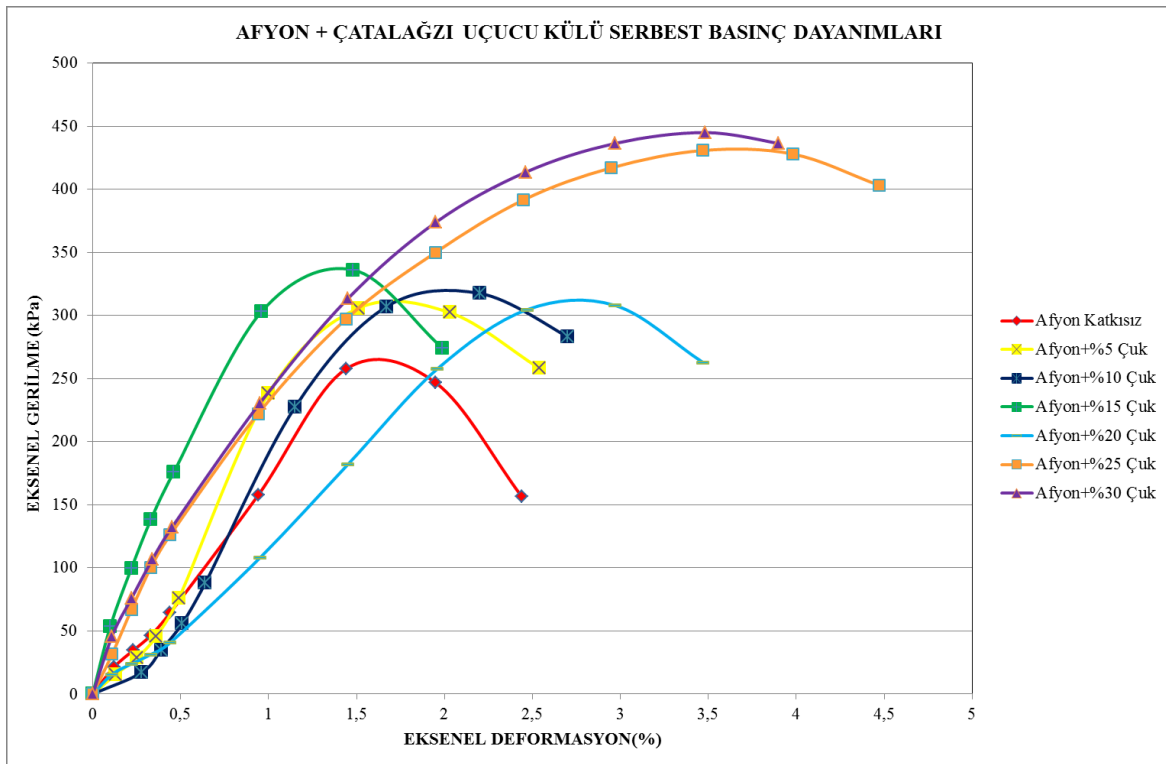
### 6.3. Serbest Basınç Deney Sonuçları

Kullanılan Afyon kili üzerinde değişen farklı katkı oranlarında (%5, %10, %15, %20, %25, %30) standart kompaksiyon deneyleri yapılarak kilin optimum su muhtevası ve bu su muhtevasındaki maksimum kuru birim hacim ağırlığı belirlenmiştir. Afyon kiline farklı oranlarda Çatalağzı uçucu külü ve Soma uçucu külü karıştırarak hazırlanmıştır ve

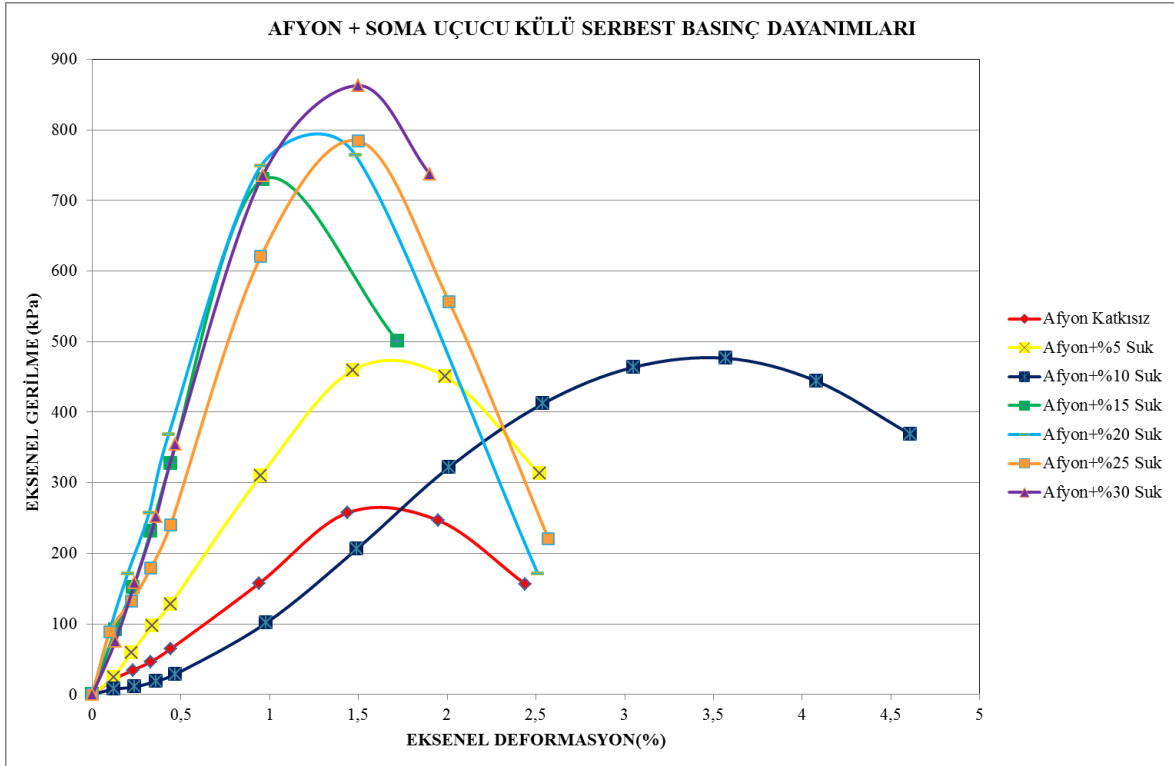
numuneler su muhtevalarını kaybetmemeleri için desikatörlerde muhafaza içine alınmıştır. Numuneler üzerinde hemen kırım serbest basınç deneyi yapılmıştır. Böylece Çatalağzı ve Soma uçucu külü katkısının basınç mukavemetine etkisi, katkı oranına göre incelenmiştir. Şekil 6.15’de deney sonundan bir görünüm verilmiştir. Tüm numunelerin katkı oranlarına bağlı dayanımlarındaki nihai değişimler ve değerler Afyon + Çatalağzı uçucu külü (ÇUK) ve Afyon + Soma uçucu külü (SUK) için sırasıyla Şekil 6.16, Şekil 6.17, Çizelge 6.6, Çizelge 6.7’de verilmiştir.



Şekil 6.15. Serbest basınç deney sonu görünüm



Şekil 6.16. Afyon + Çatalağzı uçucu külü katkılı numunelerin serbest basınç dayanımları



Şekil 6.17. Afyon + Soma uçucu külü katkılı numunelerin serbest basınç dayanımları

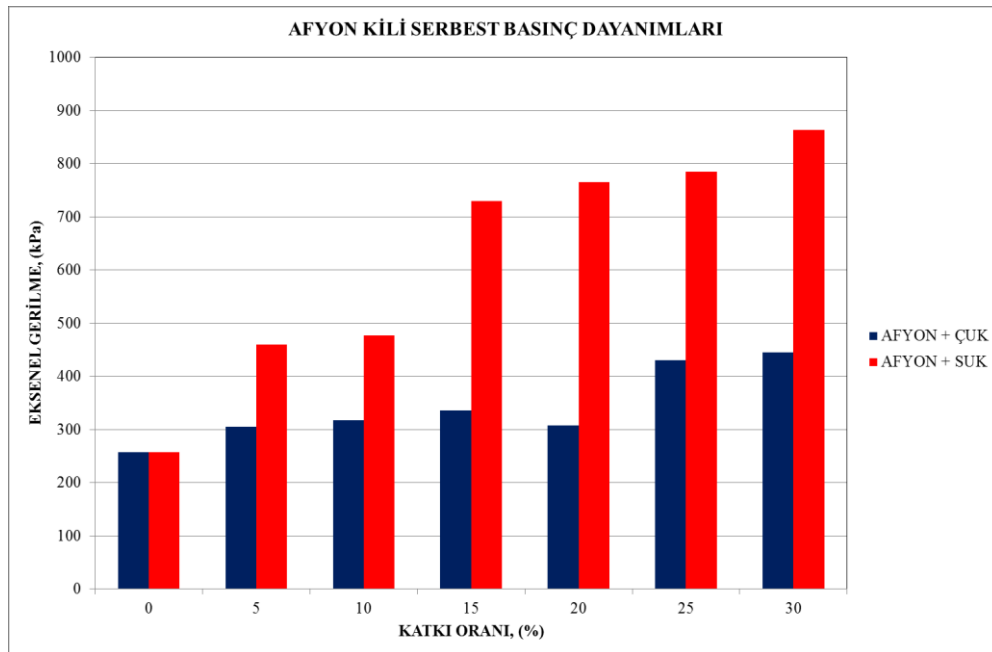
Çizelge 6.6. Afyon + Çatalağzı uçucu külü katkılı numunelerin serbest basınç değerleri ve eksenel deformasyonları

Katkı Oranı (%)	Eksenel Deformasyon (%)	Serbest Basınç Dayanımı (kPa)
Katkısız	1,44	257,6
Afyon + %5 ÇUK	1,51	305,7
Afyon + %10 ÇUK	2,5	317,5
Afyon + %15 ÇUK	1,48	336,1
Afyon + %20 ÇUK	2,97	307,9
Afyon + %25 ÇUK	3,47	430,7
Afyon + %30 ÇUK	3,48	444,9

Çizelge 6.7. Afyon + Soma uçucu külü katkılı numunelerin serbest basınç değerleri ve eksenel deformasyonları

Katkı Oranı (%)	Eksenel Deformasyon (%)	Serbest Basınç Dayanımı (kPa)
Katkısız	1,44	257,6
Afyon + %5 SÜK	1,47	459,9
Afyon + %10 SÜK	3,57	476,5
Afyon + %15 SÜK	0,96	729,5
Afyon + %20 SÜK	1,48	765,2
Afyon + %25 SÜK	1,50	784,3
Afyon + %30 SÜK	1,50	862,9

Deney sonuçları incelendiğinde, Çatalağzı ve Soma uçucu külünün dayanıma olumlu etkisi açıkça gözükmemektedir. Artan katkı oranlarında genel olarak serbest basınç dayanımlarında artış vardır. Soma uçucu külü katkılı numunelerin serbest basınç dayanımları Çatalağzı uçucu külü katkılı numunelere oranla daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi Soma uçucu külünün C sınıfı (yüksek kireçli) bir uçucu kül olmasıdır. Şekil 6.18’de Afyon kiline ait farklı katkılardaki serbest basınç dayanımları verilmiştir.



Şekil 6.18. Afyon kiline ait farklı katkılardaki serbest basınç dayanımları

## 7.SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında dispersif ve şişme özelliklerine sahip düşük plastisiteli kil zemine kuru ağırlığının farklı oranlarında Çatalağzı ve Soma uçucu külü ilave edilerek geoteknik özelliklerindeki değişimi incelenmiştir. Bu araştırma kapsamında aşağıda özetlenen sonuçlara ulaşılmıştır:

- i. Katkı ilave edilen numunelerde katkı oranının artmasıyla beraber şişme yüzdesinde belirgin bir şekilde azalma ortaya çıkmıştır. Sonuçta iki katkı maddesi şişme yüzdesi değerlerini azaltmıştır.
- ii. Şişme basıncında da şişme yüzdesine benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. Artan katkı oranıyla beraber iyileşme devam etmekte ancak oran azalım göstermektedir.
- iii. Deneysel sonuçlarında; Soma uçucu külünün Çatalağzı uçucu külüne oranla zeminin şişme ve dayanım özelliğine daha olumlu yönde etki yaptığı belirlenmiştir. Bunun sebebi Soma uçucu külünün C sınıfı bir uçucu kül olmasıdır. Çatalağzı uçucu külünün ise F sınıfı bir uçucu kül olmasıdır.
- iv. Afyon kilinin katkısız durumda yüksek oranda dispersif özellik gösterdiği gözlemlenmiştir. Yapılan iğne deliği ve dağılma deneyleri birbiriyle uyumluluk gösteren sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Her iki deneyde de dispersif zemin, ara zemin ve dispersif olmayan zemin sınıflandırılmaları aynı katkı seviyelerinde aynı sonuçları vermiştir. Soma uçucu külü katkısı zeminin dispersif davranışını olumlu yönde etkilemektedir. Çatalağzı uçucu külünün ise zeminin dispersif davranışına bir etkisi olmamıştır.
- v. Farklı katkı seviyelerinde hemen kırım yapılan serbest basınç deney sonuçları incelendiğinde; artan katkı oranıyla birlikte dayanımın arttığı; Soma uçucu külü için artan katkı oranlarında %20 katkı oranından sonra,

Çatalağzı uçucu külü için ise genel olarak dayanımda beklenen artış gözlemlenememiştir.

- vi. Sonuç olarak dispersif ve şişme özelliklerine sahip zeminlerde Soma uçucu külünün etkili bir şekilde kullanılabilceği görülmüştür.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abdullah, W.S., Alshibli, K.A., ve Al-Zou'bi, M.S., 1999, "Influence of Pore Water Chemistry on the Swelling Behavior of Compacted Clays", Applied Clay Science, Vol 15, 447-462.
- Acciardi, R.G., 1985, "Pinhole Test Equipment Design and Test Result Evaluation", United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, REC- ERC- 853.
- Aitcin, P.C., 1986, Comparative Study of the Cementitious Properties of Different Fly Ashes, Proc. of 2nd Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, s. 91-114.
- Aitchison, G.D., Wood, C.C., 1965, Some instruction of compaction permeability and post-construction deflocculation affecting the probability of piping failure in small earth dams, Proceedings of the sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, p.442-446.
- Aksoy, İ.H., 1992, Uçucu Külün Geoteknikte Kullanımı, ZMTM 4. Ulusal kongresi, İTÜ, s. 248-259, İstanbul.
- Alataş, T., 1996. Afşin Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Yol Stabilizasyonunda Çeşitli Maddelerle Birlikte Kullanımı Üzerine Bir Araştırma, Doktora tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü , 146 s.
- Ammann L., 2003, Cation exchange and adsorption on clays and clay minerals. Submitted for the degree Dr. rer. nat.of the faculty of mathematics and natural sciences Christian-Albrechts-Universität Kiel, Germany.
- Angın Z., 2005, Angın A., Şişen Killerin Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesi.
- Aruntaş, H.Y., 2006. Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanımı. G.Ü. Müh. Mim. Fak. Dergi-si, 21 (1), 193-203
- ASTM C 618, 1991, Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a mineral admixture in Portland Cement Concrete, ASTM.



**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- ASTM, 1994, “Annual Book of ASTM Standards. Soil and Rock”, Vol. 0 4.08. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM C618, 1998, “Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete”, Annual Book of ASTM Standarts, No.4.
- Aydın, M. C., Aydın S., 2006. Dispersif killerin dolgu baraj yapımı açısından önemi, Kibited 1(1) (2006) 49–54.
- Aydın, S., 2010, Yenikent (Ankara) yerleşim alanı killерinin kireç ve uçucu küllе geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 218s.
- Aytekin, S., 2009, Uçucu küllерin killi zeminlerin ıslahında kullanımı, Yüksek lisans tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 81s.
- Aziz, A., 2012, Improvement of expansive soil using industrial wastes, Yüksek lisans tezi, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 91s.
- Bayazıt, Ö.L., 1980, Tunçbilek uçucu küllерinin betonun fiziko-kimyasal ve mekanik özelliklerine etkileri, Doktora tezi, Ankara.
- Bell, F. G., Walker, D.J., 2000, A further examination of the nature of dispersive soils in Natal, South Africa, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, V.33, p.187-1999.
- Chen, F.H. 1973, The Basic Physical Property of Expansive Soils, Proc. 3rd Int. Conf. Expansive Soils, Haifa, Israel
- Chen, F.H., 1988, “Foundation on Expansive Soils”, American Elsevier Science Publication, New York
- Chu, S.C., Kao, H.S., 1993, A Study of Engineering Properties of A Clay Modified By Fly Ash and Slag, Fly Ash for Soil Improvement, Geotechnical

### **KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

Special Publication, No:36, s. 89-100, Ed.:Sharp K.D., ASCE, New York

Çana. B., Güleç. ., Erler. A., 1997, "Kömür Yakıtlı Termik Santrallerdeki Uçucu Küllerin Çevreye Etkisi". Genel değerlendirme. Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi 20. Yıl Jeoloji Sempozyumu, IS1 -187. Konya.

Çetin, M., 2003, Değişik Çevresel Koşullar Altında, Şişen Zeminlerin Özelliklerinin Belirlenmesi, Yüksek lisans tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.

Çokça, E., 1997, Frost Susceptibility Properties of Soma-B Fly Ash, Journal of Energy Engineering., Vol. 123, No: 1, 1-10.

Çokça, E., 1997, Frost Susceptibility Properties of Soma-B Fly Ash, Journal of Energy Engineering., Vol. 123, No: 1, 1-10.

Daksanamurty, V., Raman, V., 1973, A Simple Method of Identifying an Expansive Soil, Soils and Foundation, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 13(1):97-104.

Das B.M., 1983, Advanced Soil Mechanics, International Edition, Me Graw-Hill Book Co.

Demir S., Kılıç M., 2010, Şişen Zeminlerin Tanımlanması ve Zemin İyileştirme Yöntemleri, GOÜ. Ziraat Fakültesi Dergisi, 27(1), 95-104.

Demiral A., 2013, Killerin elektrokinetik özellikleri ve flokülasyonu, Yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 78s.

Demiröz, A., 2009, Uçucu küllerin geoteknik mühendisliğinde kullanımı, Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Teknik-Online Dergi, Cilt 8, Sayı:3-2009

Düzceer, R., 1984, An investigation on internal erosion phenomenon in earth dams, Yüksek lisans tezi, O.D.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Eftelioğlu, M., Bowders, J. J., 1992, Permeability Testing of Fly Ash/Grout Specimens, Environmental Geotechnology, pp: 495-501, Balkema, Rotterdam
- Erdem N.P., 1982, Mühendislik Jeolojisi, Yıldız Üniversitesi Matbaası, İstanbul.
- Erdoğan, T.Y., 1993, Atık hammaddelerin inşaat endüstrisinde kullanımı uçucu kül ve yüksek fırın cürufu, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu, s. 1-8, Ankara.
- Erdoğan, T.Y., 1997. Admixtures for concrete Middle East Technical University, ISBN 975-479-113-6-188 s, Ankara.
- Ergene A., 1987, Toprak Biliminin Esasları, Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Yayın No:289
- Erguvanlı K., 1994, Mühendislik Jeolojisi, Seç Yayın Dağıtım, İstanbul.
- E.R. Tuncer, 1995, "Toprak Dolgu Barajlarda İçsel Erozyon" Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Semineri, DSİ Genel Müdürlüğü, Adana, ss.27-15.
- Fell, R., Macgregor, P., Stapledon, D., 1992, Geotechnical engineering of embankment dams, Balkema, Rotterdam, 675p.
- Ferguson, G., 1993, Use of Self-Cementing Fly Ashes As A Soil Stabilization Agent, Fly Ash for Soil Improvement, Geotechnical Special Publication, No:36, s. 1-15, Ed.:Sharp K.D., ASCE, New York.
- Garaisayev, S., 2008, Şişen zeminlerin kimyasal yöntemlerle stabilizasyonu, Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 170s.
- Genç, S., 2009, Şişen zeminler ve bentonit-kaolin karışımlarının şişme özellikleri, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 115s.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Grim, R. E., 1959. Physiochemical Properties of Soils, Clay Minerals, J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, vol. 85, no. SM2 Suppressants: Avoiding Another Times Beach: An Expert Panel Summary, Las Vegas, NV, May 30–31, 2002. 79 pp.
- Grim, R.E., 1962. Applied Clay Mineralogy. McGraw Hill Book Co. New York, 422p.
- Gündüz, O., 2008, Şişen zeminlerin tıkal atığı ile stabilizasyonu ve meşelik killere uygulanması, Yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 73s.
- Harichane K., Ghrici M., Kenai S., Grine K., 2011, Use of Natural Pozzolana and Lime for Stabilization of Cohesive Soils, Geotech Geol. Eng.
- Holtz, W. G., Gibbs, H.J., 1956, Engineering Properties of Expansive Clays, ASCE Transactions, 121, 641-663
- Holtz, R.D., Kovacs, W.D., 1981, An introduction to geotechnical engineering, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 733 p.
- İpek, T., 1998, Stabilization of expansive soils using lime, cement and fly ash, Yüksek lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 119s.
- Jumicis A.R., 1984, Soil Mechanics Robert E. Krieger Co. Malabar, Florida.
- Kılıç G., 2008, Çimento ile zemin stabilizasyonu, Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 102s.
- Knodel, P.C., 1991, Characteristics and problems of dispersive clay soils, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, Materials engineering Branch, Denver, USA, R91-09, p.17.
- Komine, H., Ogata, N., 1996. Prediction for swelling characteristics of compacted bentonite, Canadian Geotechnical Journal, 33, 11-22.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Lambe, T.W. 1960, "The Character and Identification of Expansive Soils. Soil PVC Meter", Federal Housing Administration, Technical Studies Program, FHA 701.
- Lambe, T.W., 1962, "Soil Stabilization" Chapter Four of Foundation Engineering, G.A. Leonards (ed), McGraw-Hill, New York.
- Lambe T.W., Whitman R.V., Soil Mechanics, 1989, SI Version John Wiley and Sons, Singapore.
- Lewis, D.A., Schmit, N.O., 1977, Erosion of unsaturated clay in pinhole test, ASTM STP 623, p.260-273.
- McKeen, R.G., 1992, A model for predicting expansive soil behavior. Proc. 7th Int. Conf. on Expansive Soils, Dallas, Texas, p. 1–6.
- Mc Kenzie, D. C., 1998, Soilpak-cotton growers, NSW Department of Primary Industries, State of New South Wales, V. E3-E4, Australia.
- Mehta, P.K., 1986, Concrete- Structure, Properties, and Materials, Prentice-Hall, New Jersey.
- Mitchell, J.K., 1976, Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley and Sons, New York, USA.
- Mollamahmutoğlu M., Taşkırın T., 2000, Diyarbakır ili, Kayapınar-Yeniköy Bağcılar yöresi kilinin şişme potansiyelinin irdelenmesi, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, 52s.
- Morrison. R.E., 1970, "A Review of Ash Specifications." Symposium on Fly Ash Utilization, pp. 24-31. Pittsburgh.
- Nelson J.D, Debra, 1992, Expansive soils-problems and practice in foundation and pavement engineering, J. Willey and Sons, New york, p259.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Nelson, J.D., Miller, 1992, *Expansive Soils: Problem and Practice in Foundation and Pavement Engineering*, Wiley, New York
- Nicholson, P.O., KASHYAP, V., 1993, *Fly ash Stabilization of Tropic Hawaiian Soils, Fly Ash for Soil Improvement, Geotechnical Special Publication, No: 36, s. 15-30, Ed.: Sharp K.D., ASCE, Newyork.*
- Ouhadi, V.R., Goodarzi, A.R., 2006, *Assessment of the stability of a dispersive soil treated by alum, Engineering Geology, V.85, p.91-101.*
- Onar A.F., 2010, *Turgutlu (Manisa) yöresinde tuğla ve kiremit yapımında kullanılan killerin mühendislik ve bazı teknolojik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 75s.*
- O'Neil M. W, Poormoayed, N., 1980, *Methodology for foundations on expansive, clays., Journal of Geotechnical Engineering, Division,, American Society of Civil Engineers» Vol. 106,, No. GT12, p. 1345-1367.*
- Ouhadi, V.R., Goodarzi, A.R., 2006, *Assessment of the stability of a dispersive soil treated by alum, Engineering Geology, V.85, p.91-101.*
- Önalp, A., 1983, *İnşaat Mühendisleri Geoteknik Bilgisi; cilt 1,2 KTÜ yayını, Trabzon.*
- Önalp, A., 2007, *“Geoteknik Bilgisi I Zeminler ve Mekaniği”, İstanbul.*
- Önem, S., 2000, *Sanayi Hammaddeler Ders Kitabı, Ankara*
- Öntürk, K., 2011, *Zemin iyileştirmesinde polisaj, kireç ve uçucu külün kullanımı, Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 160s.*
- Özaydın, K., 1989, *Zemin Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul.*

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- P.C. Knodel, 1991, Characteristics and Problems of Dispersive Clay Soils, Bureau of Reclamation, Materials Engineering Branch, R-91-09,17p.
- Rahn H.P., Engineering Geology An Environmental Approach, Elsevier Science Publishing Company Inc, New York, 1986.
- Resendiz, D., 1977, Relevance of Atterberg Limits in evaluating piping and breaching potential, ASTM STP 623, p.341-353.
- Ryker, N.L., 1977, Encountering dispersive clays on soil conservation service projects in Oklahoma, ASTM STP 625, p.370-389.
- Savaş, H., 2008. Dolgu barajlar için dispersif killerin tanımlanmasında kullanılan iğne deliği deneyindeki gelişmeler ve karşılaştırmalı analizi, Doktora tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 212 s.
- Sherard, J.L., Richard, J.W., Giienski, S.F. ve William, A.C., 1963, “Earth-rock Dams, Engineering Problems of Design and Construction”, John Wiley and Sons, A.B.D.
- Sherard, J.L., Decker, R.S., Ryker, N.L., 1972, Piping in earth dams of dispersive clay, Proceeding Specialty Conference on Performance of Earth and Earth Supported Structures, ASCE, V.1, p.589-626.
- Sherard, J.L., Dunnigan, L.P., Decker, R.S., 1976, Identification and nature of dispersive soils, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol:102, n.GT2, p.287-301.
- Shi B., Jianh H., Liu Z., Fang H.Y., 2002, Engineering Geological Charecteristics of Expansive Soils In China, Engineering Geology 67, pp.63-71.
- Stapledon, D.H., Casinader, R.J., 1972, Dispersive soils at Sugarloaf Dam Site, near Melbourne, Australia, ASTM STP 623, p.432-466.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Şengül T., 2003, Ağır metal ve tuzlarla kirlenmiş killi zeminlerin geoteknik özelliklerinin belirlenmesi, Yüksek lisans tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 85s.
- Taşçı G., 2011, Problemlili kil zeminin geoteknik özelliklerine silis dumanı ve kireç katkısının etkisi, Yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 141s
- Tokyay, M., Erdoğan, K., 1998. Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu, TÇMB AR-GE Yayın No 98/3, Ankara.
- Toros, H., 1987, Afşin Elbistan Termik Santrali uçucu küllerinin yapı malzemesi olarak kullanılması, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 117 s.
- Tosun H., Kırmızıtaş H., 1993, "Harran Killerinin Şişme Potansiyeli ve Bölgede İnşa Edilecek Su Yapıları İçin Önemi", Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Problemleri Sempozyumu, Gümüşdüz, Bildiri kitabı, s:313-327.
- Tosun H., 1994, "Dispersif Killer ve Toprak Dolgu Barajlar Açısından Önemi", DSİ Teknik Bülteni, sayı:80, ss.51-60.
- Tosun, H., 1995, Importance of dispersive soils for earthfill dams an a research on control tests adopted in Turkey, Symposium on Research and Development in the Field of Dams, Crass-Montana- Switzerland, p.133-144.
- Tosun, H., 1997, Comparative study on physical tests of dispersibility of soils used for earthfill dams in Turkey, ASTM Geotechnical Testing Journal, GTSODS, Vol.20, 2, p.242-251.
- Tosun H., Savaş H., 2001, Düşük plastisiteli zeminlerde dispersibilite özeliğinin farklı yöntemlerle değerlendirilmesi, Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi C.XIV, S.2



### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

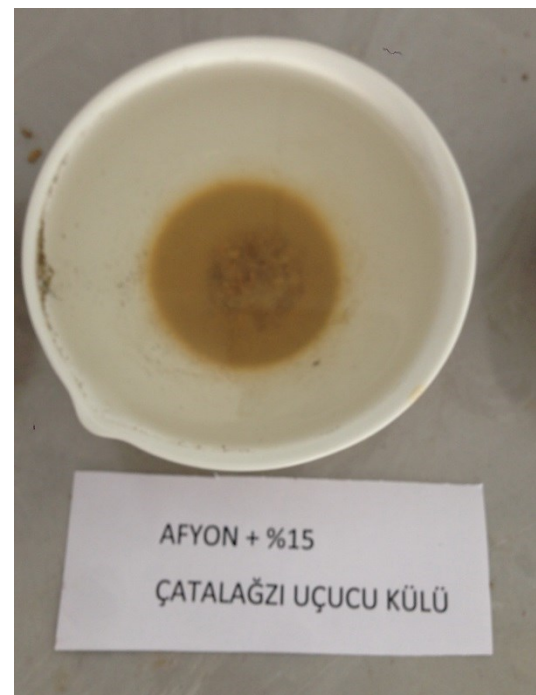
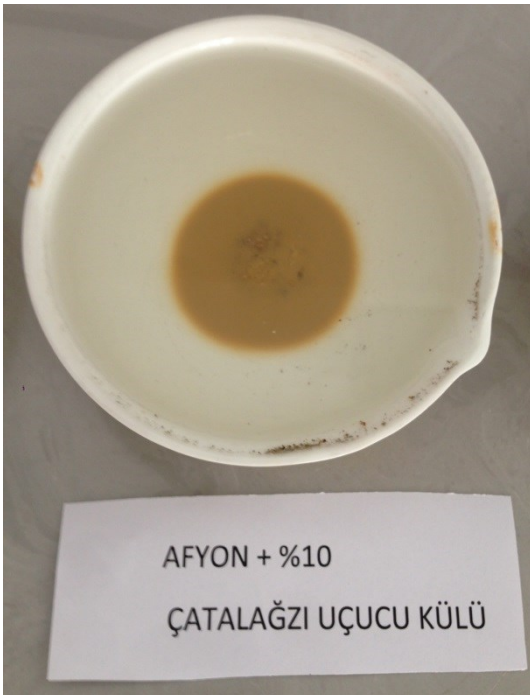
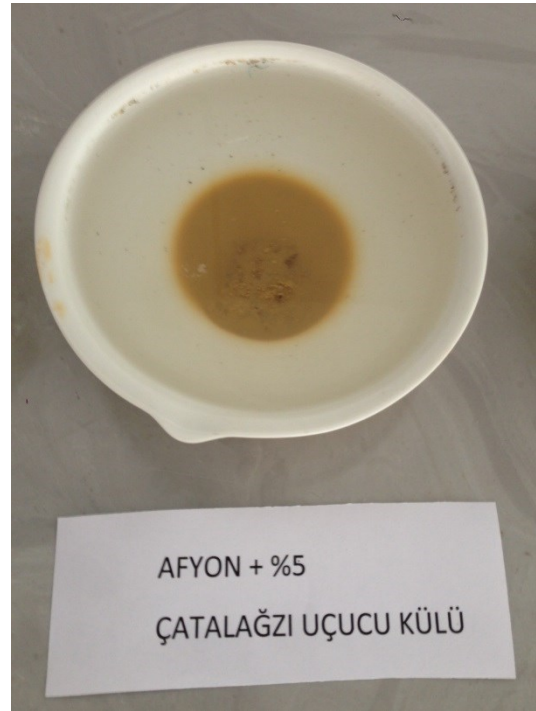
- Tosun H., Zorluer İ., Tozluk H., Savaş H., 2001 “Toprak Dolgu Barajlarda Dispersif Killerin Kullanımı ve Tasarım ve Kontrol Kriterlerinin Araştırılması” TÜBİTAK Projesi, P. No: İNTAG-719.
- Tosun H., Savaş H. ve Bitkova, N., 2002, Dispersif ve ara zemin örneklerinde sıkıştırma enerjisinin zeminin borulanma davranışı üzerine etkisi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, Eskişehir, s.34-44.
- TS 1900, “İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri” , TSE, Mart 2006. Tumluer, G 2006. Çimento katkılı kumlu zeminlerin mukavemeti, 89.
- Tuncer, E.R., 1985, Toprak dolgu barajlarda iç erozyon, Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Semineri, DSİ Genel Müdürlüğü TAKK Dairesi Başkanlığı, Adana, s.15-27
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A., 2009, Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, TÇMB AR-GE Y03.03, Fersa Matbaacılık, s.32-37,s. 58-65.
- Türköz, M., 2001, Şişen zeminlerin sönmüş kireç katkısı ile stabilizasyonu ve Eskişehir Meşelik killere uygulanması, Yüksek lisans tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 62s.
- Türköz M., 2006, Şişen killerin kireç katkısı ile stabilizasyonu ve Eskişehir Meşelik killere uygulanması, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi C.XIX, S.2.
- Türköz, M., 2007, Yüksek plastisiteli killerin şişme potansiyelinin direkt deneylerle belirlenmesi ve karşılaştırmalı analiz, Doktora tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 180s.
- Türköz M., Savaş H., Tosun H., 2011, Problemlili kil zeminlerin magnezyum klorür solüsyonu ile iyileştirilmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 26, No 1, 233-242.
- USBR 5400, 1989, Determining Dispersibility of Clayey.

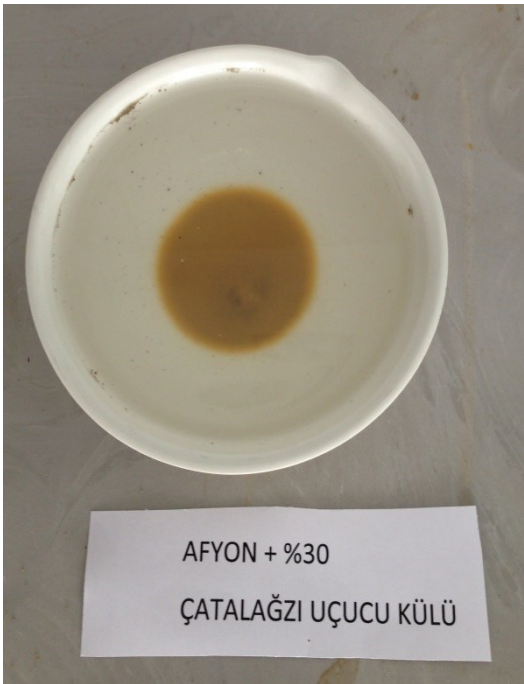
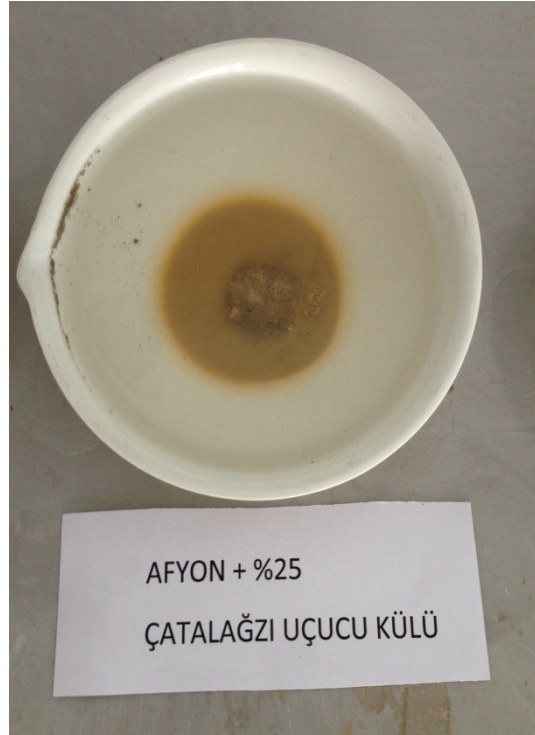
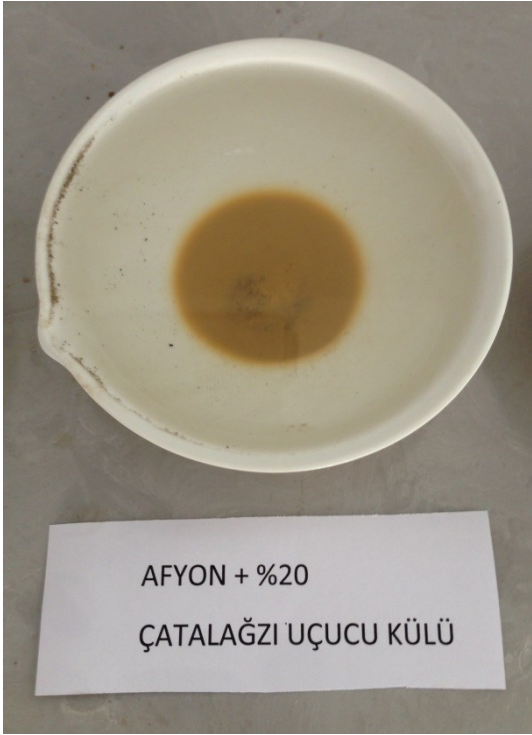
**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- USBR 5400-89, “ Determining Dispesibility of Clayey Soils by the Crumb Test Method”, Earth Manual II, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, pp. 414-418.
- USBR 5405-89, “Determining Dispesibility of Clayey Soils by the Double Hydrometer Test Method”, Earth Manual II, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, 419-424.
- USBR 5410-89, “Determining Dispersibility of Clayey Soils by the Pinhole Test Method”, Earth Manual II, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, pp. 425-437.
- Van der Merwe, D.H., 1964, “The Prediction of Heave from the Plasticity Index and the Percentage Clay Fraction of Soils”, Civil. Eng. South Africa, 103-107.
- Vural, P., 2012, Şişme ve dispersif karakteristikteki kil zeminlerin mühendislik özelliklerine çimento ve zeolit(in doğa l puzolan) etkisi, Yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 139s.
- Wan, C.F., Fell, R., 2004, Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE, April, p.373-379.
- Wasti, Y., 1990, Uçucu Küllerin Geoteknik Özellikleri ve Kullanım Olanakları, İMO Teknik Dergi, Cilt: 1, Sayı: 4, s. 177-188 , Ankara
- Yalçın, M., 1997, Çevresel kirlilik şartlarının bentonit kilinin şişme/büzülme özelliklerine etkisi, Yüksek lisans tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 97 s.
- Yıldırım, Ü.E., 2009, Şişen killer ve tünel tasarımına etkisi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 156 s.
- Yılmaz, M.K., 2014, Improvement of Expansive Soils By Using Cement Kiln Dust, Yüksek lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 99s.

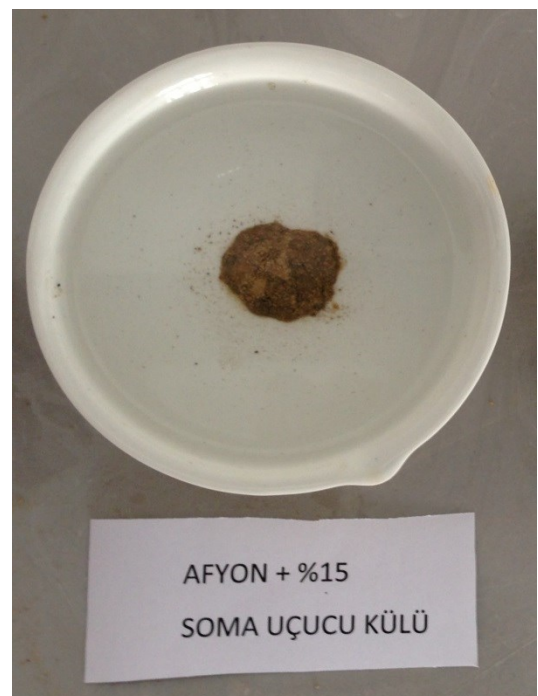
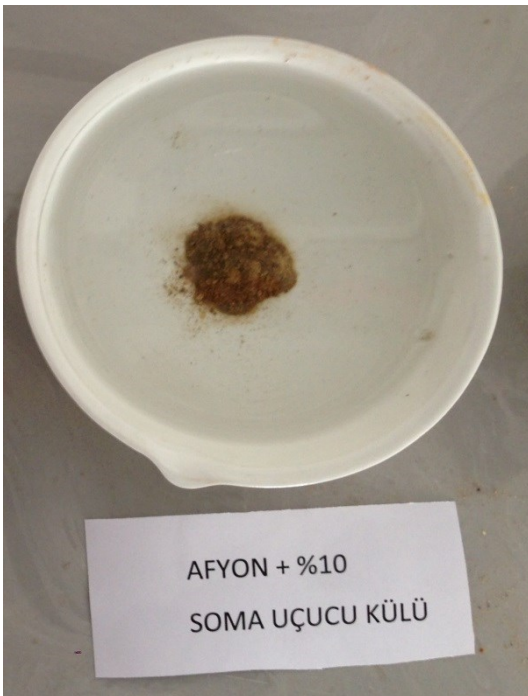
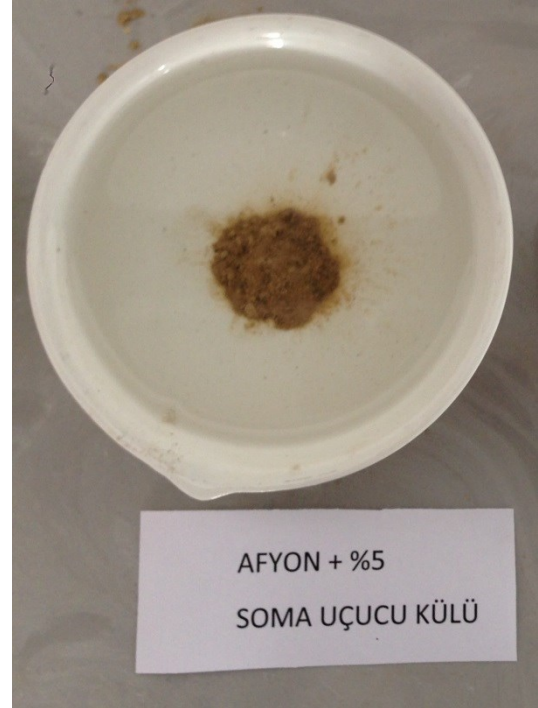
**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

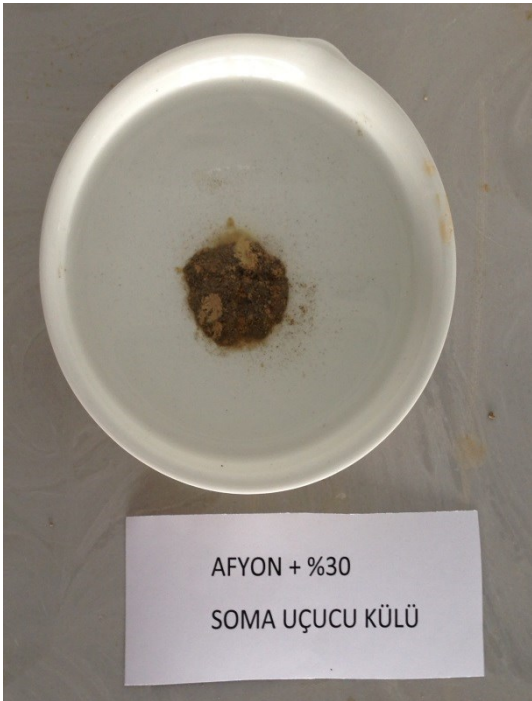
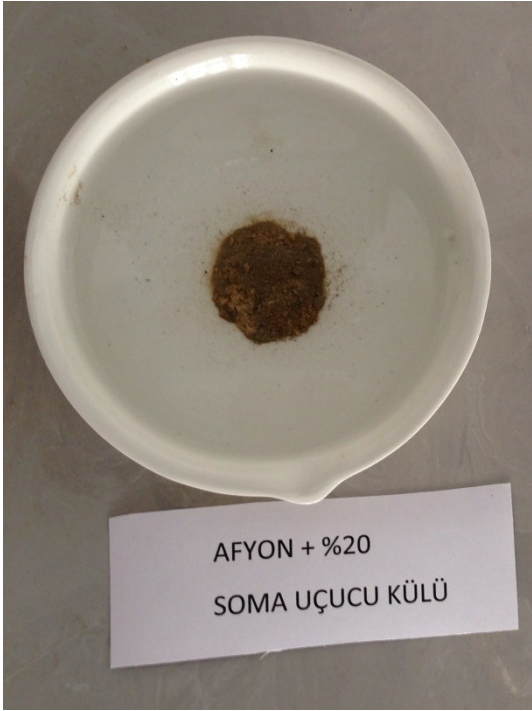
Zorluer İ., 2003, Toprak dolgu barajlar yönünden dispersif killer ve tanımlama yöntemlerinin karşılaştırılması, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 183s.

**EK AÇIKLAMALAR****Ek Açıklamalar-A****NUMUNELERİN DAĞILMA DENEY SONUÇLARI****Ek Açıklamalar-A.1. Afyon + Çatalağzı Uçucu Külü Dağılma Deneyi Sonuçları**





**Ek Açıklamalar-A.2. Afyon + Soma Uçucu Külü Dağılıma Deneyi Sonuçları**





**EK AÇIKLAMALAR-B****NUMUNELERİN İĞNE DELİĞİ DENEY SONUÇLARI****Ek Açıklamalar-B.1. Afyon + Çatalağzı Uçucu Külü İğne Deligi Deneyi Sonuçları**





**Ek Açıklamalar-B.2. Afyon + Soma Uçucu Külü İğne Deliği Deneyi Sonuçları**



