



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

UÇUCU KÜL KATKISININ KİLİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

HAZIRLAYAN

MERVE YAŞAR

DANIŞMAN

DR. ÖĞR. ÜYESİ ERMEDİN TOTİÇ

BARTIN-2019



T.C.

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

UÇUCU KÜL KATKISININ KİLİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN

Merve YAŞAR

JÜRİ ÜYELERİ

Danışman	:	Dr. Öğr. Üyesi Ermedin TOTİÇ	-	Bartın Üniversitesi
Üye	:	Doç. Dr. Ali ATEŞ	-	Düzce Üniversitesi
Üye	:	Dr. Öğr. Üyesi Fatih GÖKTEPE	-	Bartın Üniversitesi

BARTIN-2019

KABUL VE ONAY

Merve YAŞAR tarafından hazırlanan “UÇUCU KÜL KATKISININ KİLİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ” başlıklı bu çalışma, 13.12.2019 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Ali ATEŞ

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ermedin TOTİÇ

(Danışman)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Fatih GÖKTEPE

Bu tezin kabulü Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. H. Selma ÇELİKİYAY
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Dr. Öğr. Üyesi Ermedin TOTİÇ danışmanlığında hazırlamış olduğum “UÇUCU KÜL KATKISININ KİLİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

13.12.2019

Merve YAŞAR



ÖNSÖZ

Sunulan “Uçucu Kül Katkısının Kilin Geoteknik Özelliklerine Etkisi” isimli yüksek lisans tez çalışmasının bir bölümü Bartın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenen 2018-FEN-CY-013 araştırma projesi kapsamında ve Bartın Üniversitesi Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarı donanımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmanın Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmasını ve gerekli olanakları sağlayan, tüm aşamalarında çalışmalarımı yönlendiren, laboratuvar çalışmalarında bilimsel yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ermedin TOTİÇ’e teşekkür ederim.

Tezin çeşitli aşamalarında görüş ve katkılarıyla destek veren Sayın Dr. Öğr. Üyesi Fatih GÖKTEPE’ye ve laboratuvar çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı öğrencilerden Sayın İnş. Yük. Müh. Fatih ACAR’a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarımı gerçekleştirmem için imkân ve olanakları sağlayan Bartın Üniversitesi Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Başkanlığına, SEM ve XRD analiz çalışmalarımı ile Makine Teçhizat alınımlarında maddi destek veren Bartın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi Başkanlığı’na teşekkür ederim.

Çalışma süresince, hayatımın her anında olduğu gibi maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme ve dostlarıma sonsuz teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Merve YAŞAR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

UÇUCU KÜL KATKISININ KİLİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Merve YAŞAR

Bartın Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi. Ermedin TOTİÇ

Bartın-2019, sayfa: 56

Taşıma gücü zayıf, şişme ve büzülme potansiyeli yüksek olan killi zeminlerin iyileştirilmesi geoteknik mühendisliğinin güncel araştırma konularından birisidir. Bu tür zeminlerin iyileştirilmesi için günümüze kadar farklı yöntemler kullanılmıştır. Son yıllarda mermer tozu, lastik kırıntısı, uçucu kül gibi atık malzemeler kullanılarak killi zeminlerin iyileştirilmesi konusundaki çalışmalar hız kazanmıştır. Yapılan bu tez çalışmasında termik santrallerinden atık malzeme olarak açığa çıkan uçucu kül katkısının yüksek plastisiteli killi zeminin geoteknik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla Bartın Kutlubey bölgesinden temin edilen kil numunelerine ağırlıkça sırasıyla %5, %10, %15 ve %20 oranlarında Çatalağzı Termik Santrali'ne ait uçucu kül katılmıştır. Elde edilen katkısız kil ile kil-uçucu kül karışım numuneleri optimum su muhtevalarında sıkıştırılarak konsolidasyon deneyi yapılmış ve uçucu kül oranına bağlı şişme yüzdeleri ile düşey yükler altında oturma potansiyelleri incelenmiştir. Optimum su muhtevasında sıkıştırılmış numuneler 1, 8, 16 ve 32 gün kürde bekletildikten sonra CBR ile 1, 8, 16, 32, 120 ve 360 gün kürde bekletilmiş ve serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda kür süresi ve karışım içerisindeki uçucu kül oranına bağlı olarak CBR ve serbest basınç dayanımında önemli oranda artışlar görülmüştür. Killi zeminlere %10'a kadar katılan uçucu kül serbest basınç dayanımının artmasına neden olmuş, % 10'dan sonra uçucu kül oranının artmasıyla serbest basınç dayanımında azalmalar görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Zemin geoteknik özellikleri; zemin iyileştirilmesi, killi zemin; uçucu kül; CBR; serbest basınç dayanımı.

Bilim Alanı Kodu: 91105



ABSTRACT

M. Sc. Thesis

THE EFFECTS OF FLY ASH ADDITION ON THE GEOTECHNICAL PROPERTIES OF CLAY

Merve YAŞAR

Bartın University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Thesis Advisor: Assist. Prof. Ermedin TOTİÇ

Bartın-2019, pp:56

Improvement of clayey soils with poor bearing capacity, high swelling and shrinkage potential is one of the current research topics of geotechnical engineering. Different methods have been used to improve this kind of soils. In recent years, studies on the improvement of clayey soils by using waste materials such as marble dust, rubber clippings and fly ash have accelerated. In this thesis, the effect of fly ash obtained from the thermal power plants waste on the geotechnical properties of high plasticity clayey soil has been investigated. Pursuant to this goal, fly ash from Çatalağzı Thermal Power Plant was added to the clay samples taken from Bartın Kutlubey region in 5%, 10%, 15% and 20% by weight, respectively. Compressed at optimum water contents, the mixture of clay-fly ash and pure clay samples were subjected to consolidation test, then the swelling percentages related to fly ash ratio and the consolidation statement of these samples under vertical loads have been examined. Compressed at optimum water contents, the samples were cured for 1, 8, 16 and 32 days, then cured with CBR for 1, 8, 16, 32, 120 and 360 days and unconfined compression test was performed. As a result of the experiments, significant increases in CBR and unconfined compression strength were observed depending on the curing time and fly ash content in the mixture. Fly ash added to clay soils up to 10% induced an enhancement in unconfined compressive strength, and after 10%, increase in fly ash ratio decreased the unconfined compressive strength.

Keywords: Soil geotechnical properties; ground improvement; clayey soil; fly ash; CBR; unconfined compressive strength.

Scientific Field Code: 91105



İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	ii
BEYANNAME.....	iii
ÖNSÖZ	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
TABLolar DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
1.1 Amaç ve Kapsam	1
1.2 Çalışma Konusuyla İlişkili Literatür Özeti	3
BÖLÜM 2 MATERYAL VE YÖNTEM	10
2.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	10
2.1.1 Çalışmada Kullanılan Kilin ve Uçucu Külün Özellikleri	10
2.1.1.1 Bartın İli Bartın Üniversitesi Kutlubey Kampüsü Bölgesi Killeri	10
2.1.1.2 Çatalağzı Termik Santral Uçucu Külleri	15
2.2 Yöntem.....	20
2.2.1 Deneysel Çalışmalar.....	20
2.2.1.1 Dane Boyu Analizi (Elek Analizi ve Hidrometre Deneyi).....	22
2.2.1.2 Piknometre Deneyi	23
2.2.1.3 Kıvam Limitleri.....	24
2.2.1.4 Standart Proktor Deneyi	26
2.2.1.5 Konsolidasyon Deneyi	27
2.2.1.6 Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi	28
2.2.1.7 Serbest Basınç Deneyi.....	29
2.2.1.8 X–Işını Kırınımı Yöntemi (XRD)	31

BÖLÜM 3 BULGULAR VE TARTIŞMA	32
3.1 Dane Boyu Analiz Sonuçları	32
3.2 Piknometre Deney Sonuçları	33
3.3 Kıvam Limitleri Deney Sonuçları.....	33
3.5. Standart Proktor Deney Sonuçları	34
3.6. Konsolidasyon Deneyi Sonuçları.....	36
3.7. CBR Deney Sonuçları.....	38
3.8. Serbest Basınç Deney Sonuçları	39
3.9. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) sonuçları	43
3.10 X Işınımı Deneyi (XRD).....	46
BÖLÜM 4 SONUÇ VE ÖNERİLER	48
KAYNAKLAR.....	52
ÖZGEÇMİŞ.....	56

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
No	No
1.1: Tayvan kili – uçucu kül karışımlarına ait kohezyon ve içsel sürtünme açıları	5
1.2: Uçucu kül katkısı ve kür süresinin serbest basınç dayanımına etkisi.	6
2.1: (a), İnceleme alanı yer bulduru haritası (b), Çaycuma formasyonundan genel görünüm	11
2.2: Kil zemin numunenin X-Ray Difraktogramı.	12
2.3: Kil zeminin (a), genel görünümü (b), Taramalı elektron mikroskopunda (SEM) görüntüsü.....	12
2.4: Kutlubey Kampüsü kil zeminin dane boyutu dağılım eğrisi.....	13
2.5: Şişme potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan abak	14
2.6: Çatalağzı Termik Santralinin haritadaki konumu ile görünümü.....	17
2.7: ÇATES uçucu kül a.görünümü b.dane boyut dağılımı	18
2.8: Çatalağzı Termik Santrali F sınıfı uçucu küllerin SEM görüntüsü.....	18
2.9: ÇATES uçucu külünün X-Ray Difraktogramı.	20
2.10: Numunelerin elek analizi aşamaları.	22
2.11: Hidrometre deneyi karışım numunelerinin görünümü.	23
2.12: Piknometre deney yapım aşamaları.....	24
2.13: Likit limit deney numunelerinin hazırlanması ve deneyin yapılışı.	25
2.14: Karışım numunelerinin plastik limit deney yapılışı.	26
2.15: Standart Proktor Deney numunelerinin hazırlanması.	26
2.16: Konsolidasyon deney numunelerinin hazırlanması.	27
2.17: CBR deney numunelerinin hazırlanması ve deneyin yapılışı.	29
2.18: Serbest Basınç deneyi yapım aşamaları.	30
2.19: Serbest basınç deneyi sonucunda elde edilen karakteristik şekil değiştirme eksenel gerilme ilişkisi.....	31
3.1: Elek analizinde hazırlanan numunelere ait tane dağılımı eğrileri.	32
3.2: Uçucu kül oranı-dane birim hacim ağırlığı grafiği.....	33
3.3: Uçucu kül oranının (a), likit limit ve (b), plastisite indisi değerlerine etkisi.	34
3.4: Standart Proktor deney sonuç grafiği.	35
3.5: Kullanılan numunelerin uçucu kül oranına bağlı olarak (a), Maksimum kuru birim hacim ağırlık (b), Optimum su muhtevası değişimi.	35

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

3.6: Numunelerin uçucu kül oranı – şişme ilişkisi.	37
3.7: e-logP deney sonuç grafiği.	37
3.8: Konsolidasyon deney sonuçlarına göre uçucu kül oranına bağlı boşluk oranı değişimi.	38
3.9: CBR deneyi sonuçları.	39
3.10: Numunelerde gözlenen yenilme düzlemleri.	39
3.11: Kür sürelerine bağlı serbest basınç deneyinde elde edilen şekil değiştirme eksenel gerilme eğrileri.	40
3.12: Kür süresine bağlı serbest basınç dayanımındaki değişim.	41
3.13: Uçucu kül oranı – basınç dayanımı grafiği.	42
3.14: Kil numunesinin SEM görüntüsü.	43
3.15: Uçucu kül numunesinin SEM görüntüsü.	44
3.16: %5 uçucu kül katkılı kil numunesinin SEM görüntüsü.	44
3.17: %10 uçucu kül katkılı kil numunesinin SEM görüntüsü.	45
3.18: %15 uçucu kül katkılı kil numunesinin SEM görüntüsü.	45
3.19: Kil numunesinin (%20 uçucu kül katkılı) SEM görüntüsü.	46
3.20: X-ışını kırınım yöntemi (XRD) analiz sonuçları.	47

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
2.1: Kıl numune kimyasal analiz/test raporu.....	11
2.2: Deneylerde kullanılan killi zemin özellikleri.	13
2.3: Şişen zeminlerin sınıflaması.....	14
2.4: Çatalağzı Termik Santralı uçucu kül kimyasal analiz sonuçları.	19
2.5:Çatalağzı Termik Santralinden elde edilen uçucu külün mineralojik kompozisyonları.....	19
2.6: Çalışma kapsamında yapılan deneyler ve kür süreleri.	21
3.1: Karışım numunelerinin Plastisite indisi sonuç tablosu.	33

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°C	: santigrat derece
ϕ	: içsel sürtünme açısı
Δe	: boşluk oranı farkı
ΔH	: boy farkı
μ	: mikron
ε	: birim şekil değiştirme
w	: su muhtevası
w_{opt}	: optimum su muhtevası
γ_{kmak}	: maksimum kuru birim hacim ağırlık
γ_n	: doğal birim hacim ağırlık
γ_s	: dane birim hacim ağırlık
q_u	: basınç dayanımı
CBR	: Kaliforniya Taşıma Oranı
CH	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sisteminde yüksek plastisiteli kil
CL	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sisteminde düşük plastisiteli kil
e	: boşluk oranı
kPa	: kilopascal
LL	: likit limit
ML	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sisteminde düşük plastisiteli silt
mm	: milimetre
PL	: plastik limit
PI	: plastisite indisi

KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ASTM C618	: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete
ASTM C686	: Standard Test Methods of Qualitative Examination of Mineral Filler and Mineral Coating of Paper
ASTM D698	: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort

ASTM D1883	: Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils
BS 1377	: Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes. Chemical and Electro-Chemical Testing
ÇİTOSAN	: Çimento ve Toprak Sanayi A.Ş.
ÇATES	: Çatalağzı Termik Santrali
DSİ	: Devlet Su İşleri
EİE	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi
MTA	: Maden Tetkik Arama
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
TS 639	: Uçucu küller-Çimentoda kullanılan
TS 1900-1	: İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri – Fiziksel Özelliklerin Tayini
TS EN 450	: Uçucu Kül – Betonda kullanılan
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
TE	: Taneler Arası Etkileşim
UK	: Uçucu Kül
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
XRD	: X-Işını Kırınım Yöntemi

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Amaç ve Kapsam

Dünyada ve ülkemizde teknolojinin gelişmesi ile birlikte yapılaşma, ulaşım ağ hatları, raylı sistemler, otoyol ve köprüler, barajlar vb. birçok geoteknik mühendislik gerektiren alanlar artmıştır. Hızlı kentleşme nedeniyle uygun yerleşim alanlarının azalması, yüksek arsa maliyetleri, yapıların artan boyutları gibi sebeplerden dolayı problemli zemin olarak nitelendirilen zayıf ve şişen killi zeminlerde ıslah çalışmaları önem kazanmıştır. Birçok makaleye ve teze konu olan dayanım gücü düşük olan zeminlerin stabilizasyonunda zemine farklı atık malzemeler eklenerek dayanımının artırılması araştırılmıştır.

Dayanım gücü düşük killi zemin stabilizasyonunda zemin iyileştirme malzemesi olarak atık malzeme kullanılmasının en önemli faktörü çevre kirliliğinin azaltılmasıdır. Sanayileşmenin de gelişmesiyle beraber kurulan termik santrallerden açığa çıkan atık malzemelerin depolanması veya denize boşalımlarının yapılması yeni çevre problemlerini de beraberinde getirmektedir. Bu atık malzemelerin zemin stabilizasyonunda kullanılması ile sahalarda depolanma masraflarının azaltılması ve çevre problemlerinin azalması konusu önem kazanacaktır.

Dünya’da nüfusun ve enerjiye olan ihtiyacın artması ile kömür tüketimi artmıştır. Termik santrallerde kömürün yanma atığı olan uçucu kül miktarı yılda yaklaşık olarak 750 milyon tona ulaşmıştır. Termik santrallerde oluşan bu atık uçucu küllerin geri kazanımı için yaklaşık %25’inin inşaat, tarım ve kimya gibi sektörlerde kullanıldığı ve yaklaşık %75’inin atık olarak bertaraf edildiği tahmin edilmektedir (Blissett ve Rowson, 2012). Ülkemizde ise Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK)’nun açıkladığı verilere göre 2008 yılında 25.5 milyon ton mineral atık (kül, uçucu kül, cüruf, alçı) açığa çıkan bu atıkların geri kazanımları için %3’ünün satıldığı, %16’sının madenlerde değerlendirildiği ve kalan %81 oranında atık malzemenin ise sahalarda depolanması ya da denize boşaltıldığı saptanmıştır (TÜİK, 2008).

Uçucu kül, termik santrallerinde öğütölmüş taş kömürü veya linyit kömürünün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu ortaya çıkan ve gazlar ile birlikte sürüklenen yanma kalıntılarının elektro filtrelerde tutulmasıyla oluşan bir atık malzemedir.

Zonguldak Çatalağzı Termik Santralinden açığa çıkan uçucu küller, santral dışına depolama sahalarına taşınarak kül havuzlarında biriktirilmektedir. Bu kül havuzunda bulunan uçucu küller yakın bölgelerdeki tarım arazilerine ve yerleşim yerlerine dağılarak besin zincirine istenmeyen kimyasalların girmesine ve rüzgarın etkisi ile solunan havaya karışarak insan sağlığına zarar vermektedir. Ayrıca aşırı yığınların oluşması ile uçucu külün sulandırılarak denizlere boşalımının yapılması yeni çevre problemlerini de beraberinde getirmektedir. Söz konusu bu atık malzemenin, zemin stabilizasyonunda katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesi hem çevre problemleri için hem de geoteknik mühendisliği için önemlidir.

Bartın ili ve dolaylarında, zemin yapısı nedeniyle karayollarında, altyapı ve dolgularda heyelan veya toprak kaymaları sıkça görölmektedir. Kutlubey Kampüs Bölgesi zemini de su içeriğinin artması ile şişen ve mukavemetini kaybeden kil tabakalı bir yapıdadır. Yapılan tez çalışmasında da bu problemli kil zeminin uçucu kül katkısı ile geoteknik özelliklerine etkisi araştırılması amaçlanmıştır. Araştırmada tercih edilen uçucu kül ise bölgeye yakınlığından dolayı Zonguldak Çatalağzı Termik Santrali'nden alınmıştır. Böylelikle uçucu külün zeminin geoteknik özelliklerine olumlu yönde veriler alınabilmesi ile hem kül havuzlarında yığınların azalması hem de taşıma maliyetlerinin düşmesi beklenmektedir.

Yapılan bu çalışmada, deney karışım numuneleri kil zemine ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında uçucu kül eklenerek hazırlanmıştır. Kil zemine, uçucu kül ve uçucu kül katkılı deney numunelerine, elek analizi, hidrometre ve kıvam limitleri deneyleri yapılarak dane boyu dağılımı ve zemin sınıfı belirlenmiştir. Daha sonra deney numunelerinin Standart Proktor Deneyi uygulanarak maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası değeri saptanmıştır. Deneysel çalışmanın ilerideki aşamalarında maksimum kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırılmış numuneler kullanılmıştır. Maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevasında sıkıştırılan kil numunesi ile %5, %10, %15 ve %20 oranlarında uçucu kül katkılı karışımların serbest şişme ile düşey yükler altında oturma potansiyellerini belirlemek için

konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Hazırlanan deney numunelerine 1, 8, 16 ve 32 gün kürde bekletildikten sonra CBR deneyi uygulanmıştır. Katkısız kil zemin aynı şartlarda hazırlanarak referans olarak kabul edilmiş ve tüm deney numuneleri 1, 8, 16, 32, 120 ve 360 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyine tabi tutularak uçucu kül katkısının kilin geoteknik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çalışmanın son aşamasında ise Taramalı Elektron Mikroskobu deneyi (SEM) ile uçucu kül ve kil numunelerinin taneler arası etkileşimi ve X Işını Kırınımı Yöntemi (XRD) ile kil numunesinin kimyasal içeriği belirlenmeye çalışılmıştır.

1.2 Çalışma Konusuyla İlişkili Literatür Özeti

Killi zemin stabilizasyonu ve uçucu külün killi zeminin geoteknik özelliklerine etkisi hakkında 1960'lı yıllardan günümüze kadar birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmaların bazıları aşağıda özetlenmiştir.

1964 yılında Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) tarafından yapılan çalışma uçucu kül ile ilgili ülkemizde ilk önemli çalışma özelliğini kazanmıştır. Uçucu külün, çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılabilirliği yapılan bu çalışmada incelenmiştir. Çalışmada elde edilen veriler neticesinde Gökçekaya barajı inşaatında katkı maddesi olarak uçucu kül başarıyla kullanılmıştır (Alataş, 1996).

1968'de inşaat ile ilgili olarak Türk Standartları Enstitüsü (TSE) çimento ve betonda katkı maddesi olarak uçucu külün kullanılmasına ilişkin standart yayınlamıştır (Anon., 1975).

Atanur (1971) tarafından yapılan çalışmada dere ocağı malzemesine uçucu kül eklenerek uçucu küllerin kimyasal ve fiziksel özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Atık malzeme uçucu kül İzmir-Turgutlu Nif dere ocağı malzemesi, Kütahya-Çamlık dere malzemesi, Soma-Bergama dere ocağı malzemesi ve Bursa-Dede ocağı malzemesine eklenerek yapı malzeme olarak kullanılarak değerlendirilmiştir.

Parker vd. (1977) tarafından yapılan çalışmalarında killi zemine (kalsiyum oksit içeriği %20'den az) ağırlığınca %20 uçucu kül katılarak deneysel çalışmalar yapılarak zeminin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesinde 7 günlük kür sonunda karışım numunesinin serbest basınç dayanımının 1330 kN/m^2 'den 2880 kN/m^2 'ye yükseldiğini saptamışlardır.

1982 yılında Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE)'nin koordinatörlüğünde, DSİ, Türkiye Çimento ve Toprak Sanayi A.Ş. (Çitosan) ve üniversitelerin temsilcilerinden bir çalışma grubu oluşturulmuştur. “Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri ve Kullanım Özellikleri”, adıyla hazırlanan raporda, Türkiye’de açığa çıkan atık malzeme uçucu küllerin kullanım olanakları, üretimi, karşılaşılan sorunlar ve çözüm önerileri yer almaktadır (Anon., 1979).

Tsonis vd. (1983) tarafından yapılan çalışmalarında iki farklı zemine uçucu kül eklenerek kompaksiyon değerlerine etkisini incelemişlerdir. Standart Proktor Deneyi uygulanan karışımlarda %25 uçucu kül katkılı kil numunelerinin maksimum kuru birim hacim ağırlığı 16 kN/m^3 ’den 14 kN/m^3 ’e düşmüş olup, %55 uçucu kül katkılı kil örneklerinde ise bu değer 13 kN/m^3 değerine düşmüştür. Kum zeminde %25 uçucu kül katkısı ile maksimum kuru birim hacim ağırlık 20.0 kN/m^3 ’den 17.8 kN/m^3 ’e düşmüş ve benzer şekilde %55 uçucu kül katkılı kil örneklerinde ise bu değer 15 kN/m^3 ’e düşmüştür. Yapılan çalışmada genel anlamda uçucu külün %25 ve %55 farklı katkı oranlarında, kum zeminlerdeki optimum su içeriği %12’den %28’e yükselmiş olup bu değer killi zeminlerde ise %20’den %28’e yükselmiştir.

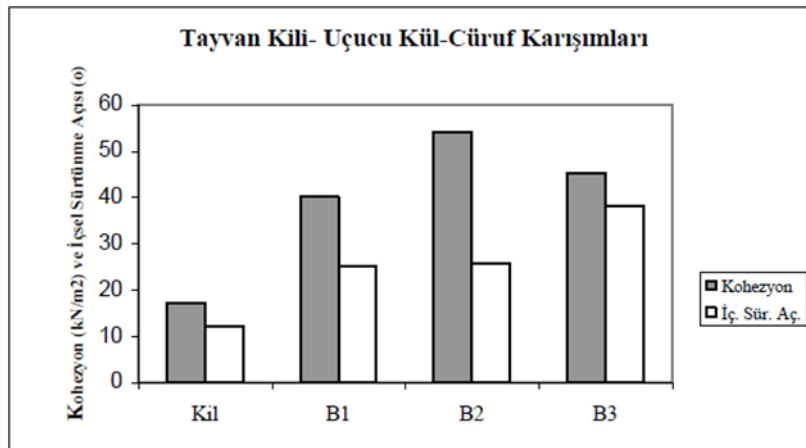
Usmen vd. (1987) tarafından yapılan çalışmalarında ABD'nin West Virginia bölgesindeki iki farklı termik santralden alınan F sınıfı uçucu kül ile farklı oranlarda çimento ve kireç karışımlarına ASTM D698 standardına göre kompaksiyon deneyleri yapmışlardır. İki uçucu külde de kireç oranı arttıkça kuru birim hacim ağırlığının azalmış ve optimum su muhtevası arttığını belirlemişlerdir. Karışımlarda çimento oranının ise kompaksiyon değerlerine etki etmediğini ortaya koymuşlardır.

Wasti (1990) Soma ve Çatalazğı Termik santrallerinden açığa çıkan uçucu küllerin geoteknik uygulamalarda kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Uçucu küllerin toprak dolgu malzemesi yerine kullanılarak taşıma gücü zayıf killerin stabilizasyonunda kullanılarak değerlendirilebileceği sonucuna ulaşmıştır.

Aksoy (1992) tarafından yapılan araştırmada uçucu küllerin aynı dane boyutundaki (kötü derecelenmiş) zeminlerden daha düşük kuru birim hacim ağırlığı değerler verdiğini ve bunun sebebini uçucu küllerde zeminlere göre daha fazla hava boşluğuna sahip olmasından kaynaklandığını açıklamıştır. Doğal zeminlerde bu oran %1-5 arasında iken uçucu küllerde

%5-15 arasında değişmektedir. Bunun farklı uçucu küllerde daha geniş bir su içeriği aralığında sıkıştırma yapmayı sağladığını saptamışlardır.

Chu ve Kao (1993) tarafından yapılan çalışmalarında düşük plastisiteli Tayvan kilinin iyileştirilmesinde %20 kireç içeren cüruf ve F sınıfı uçucu kül kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada uçucu külü %10-%20 arasında ve cürufu ise %5-%10 arasında farklı oranlarda kil zeminine eklemişlerdir (Şekil 1.1). Karışım numunelerine uygulanan üç eksenli basınç ve serbest basınç deney sonucunda kil zemine uçucu kül ve cüruf katkısının kohezyon ve kayma direnci değerlerinde artış saptanmıştır.



Şekil 1.1: Tayvan kili – uçucu kül (UK) - cüruf karışımlarına ait kohezyon ve içsel sürtünme açıları (B1: %85 Kıl+%10 UK+%5 Cüruf, B2: %82,5 Kıl+%10 UK+%7,5 Cüruf, B3:%80 Kıl+%10 UK+%10 Cüruf) (Chu ve Kao, 1993).

Nicholson ve Kashyap (1993) tarafından yapılan çalışmada yüksek şişme potansiyeline sahip Hawaii kiline uçucu kül ve kireç ekleyerek yapay numuneler hazırlamışlardır. Yapılan deneyler sonucunda kil zemin numunelerinin CBR değerlerinde artma, sıkışma özelliklerinde iyileşme ve şişme potansiyelinde azalma olduğunu belirlemişlerdir.

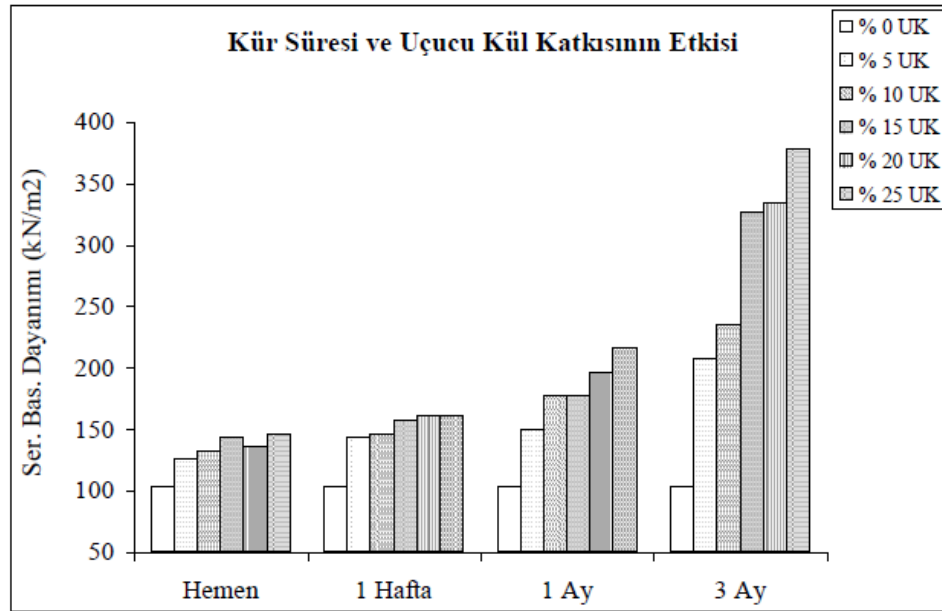
Tan ve İyisan (1996) tarafından yapılan çalışmalarında Kemerburgaz bölgesindeki CL sınıfı kil zeminine %20 uçucu kül katkısının mukavemet değerleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yaptıkları deneylerde karışımların bir günlük kür süresi sonunda dahi kayma direncinde kayda değer bir artış meydana geldiğini belirlemişlerdir.

Günel (1996) tarafından yapılan yüksek lisans çalışmasında killi zemine %20 oranında Seyitömer Termik Santralinden açığa çıkan uçucu külü ilave ederek karışım numunelerinin

kompaksiyon özelliklerini araştırmıştır. Karışım numunelerinin optimum su içeriğinin arttığını ve kuru birim hacim ağırlığının azaldığını saptamıştır.

Çokça (2001) tarafından yapılan çalışmada Soma termik santralinden açığa çıkan uçucu külün yüksek plastisiteli bir kil zemine eklenerek kilin geoteknik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Araştırmacıya göre karışım numunelerinde uçucu kül miktarı %7'ye arttıkça numunenin serbest basınç dayanımı arttığı saptanmıştır. Karışım numune içeriğindeki uçucu kül oranının artması ise serbest basınç dayanımını azalmıştır. Numunelerdeki uçucu kül oranı %13 değerine kadar artması ile numunelerin optimum su muhtevaları artmış, maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ise azalma göstermiştir. Bir atık malzeme olarak görülen uçucu külün toprak dolgu barajlarda ve seddelerde kullanılarak termik santrallerde depo sahalarına taşınmayarak değerlendirilebileceği sonucuna varılmıştır.

Alkaya (2002) çalışmasında zemin sınıfı ML olarak belirlediği doğal zemini proktor sıkılığında hazırlamış ve numunelerine uçucu kül ekleyerek serbest basınç deneyi uygulamıştır. Kür süresi ve uçucu kül oranının artmasıyla karışım numunelerinin mukavemet değerlerinin arttığı belirlenmiştir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2: Uçucu kül (UK) katkısı ve kür süresinin serbest basınç dayanımına etkisi (Alkaya, 2002).

İmançlı (2002) tarafından yapılan çalışmada zeminin sıkıştırma, sıkışma, permeabilite ve mukavemet özelliklerinin uçucu külün zemine ağırlığınca %10 ve %20 oranlarda

karıştırılması sonucunda üç aya varan bir kür süresinde pozitif değişimler meydana geldiği belirlenmiştir.

Acosta vd. (2003) tarafından yapılan çalışmalarında yedi farklı zemin dört farklı yüksek kireçli uçucu kül kullanarak stabilize etmeye çalışmışlardır. %0, %10, %18 ve %30 oranlarında uçucu kül kattıkları zeminler üzerinde CBR ve serbest basınç deneyleri uygulamışlardır. Bütün numuneler optimum su muhtevasında hazırlanmıştır. %18 oranında uçucu kül katılan numuneler, katkısız numunelere göre 4 kat yüksek dayanım değerlerine ulaştığı saptanmıştır. %18 oranından fazla katılan uçucu külün zeminin dayanımını düşürdüğü gözlenmiştir. Organik içerikli zeminleri iyileştirmede en başarılı olan uçucu küllerin yüksek oranda karbon bileşikleri içeren uçucu küller olduğu belirlenmiştir.

Türker ve Çokça (2006) tarafından yapılan araştırmalarında kömürün yanmasından elde edilen bir atık olan uçucu külün şişen zeminlerde stabilizasyon amaçlı kullanılmasını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada F ve C tipi uçucu kül, ASTM C618'e göre şişen zeminler üzerinde kullanılmış ve zeminlerin serbest şişme özellikleri, doygunluk ve emme ilişkisi irdelenmiştir. Şişen killer üzerinde yapılan serbest şişme deneylerinde, şişme potansiyelinde ciddi iyileşmeler gözlemlenmiştir. Ayrıca, araştırmacılar, C tipi uçucu külün, F tipi uçucu küle göre çok daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır.

Aksoy vd. (2008) tarafından yapılan çalışmalarında killi bir zemini, Tunçbilek Termik Santralinden alınan atık uçucu külü ile stabilize etmişlerdir. Killi zemine ağırlığınca %0, %3, %5 ve %10 oranlarında uçucu kül katılarak dört farklı karışım numune elde edilmiştir. Optimum su muhtevasında sıkıştırılmış her bir numune 1, 7 ve 30 gün kür sonunda serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Uçucu kül oranının artması ile zeminin plastisitesi pek değişmezken karışım numunelerinin optimum su muhtevası ve serbest basınç dayanımı artmıştır.

Das vd. (2009) tarafından yapılan araştırmalarında karayollarında ve demiryollarında altyapıda dolgu malzemesi olarak kullanılan uçucu kül malzemesinin taşımada gösterdiği zayıflamanın geofiberlerle desteklenmesi üzerine çalışmışlardır. Zeminlerin büzülme etkisinden kaynaklanan taşıma kayıplarının geofiberlerle desteklenmesi sonucu elde edilen nihai taşıma güçlerini arttırdığı sonucuna varmışlardır.

Alkaya (2009) tarafından yapılan araştırmada uçucu külün, çimento üretiminin yanında inşaat mühendisliğinde yapı malzemesi olarak kullanılması ve zemin iyileştirme malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Ayrıca, uçucu külün farklı uygulama sahalarında kullanılmasıyla çevresel problemlerin azalacağını ve uçucu külün doğal malzemenin yerini almasıyla doğaya verilen zararların azaltılacağını vurgulamıştır.

Bozkurt ve Yılmaz (2010) tarafından yapılan çalışmalarda katı atık miktarındaki artış nedeniyle çevresel problemlerin meydana geldiğı saptanmıştır. Kentsel alanlarda katı atık yönetiminin yapılamaması önemli çevresel sorunlara yol açmaktadır. Yapılan bu çalışmada katı atık yönetiminde mevcut düzenin etkili olmayışı, atıkların planlama ve organizasyonunda bilgi eksikliği, katı atıkların sahalarda depolanması, taşınması gibi durumların getirdiğı ciddi maliyetlerin karşılanamamasından dolayı kentlerde çevresel sorunların yaşandığı belirlenmiştir. Katı atıkların geri dönüşümü yapılarak doğaya ve insan sağlığına etki eden zararın azalacağı, ülkemizde daha rahat bir yaşama ortamının olacağını ve maliyetinde azalmasıyla katı atıkların çevreye verdiği zarar azaltılabileceğı sonucunu belirtmişlerdir.

Aytekin (2009) tarafından yapılan çalışmada Afşin-Elbistan Termik Santralinden temin edilen uçucu küllerin killi zeminlerin iyileştirilmesi üzerine etkisini araştırmıştır. Bu amaçla illit ağırlıklı Almanpınarı kiline %10 ile %20 oranlarında uçucu kül ekleyerek hazırladığı yapay zeminleri, 1, 8, 16 ve 32 gün kürde beklettikten sonra, zemin sınıflama, konsolidasyon ve üç eksenli basınç deneylerine tabi tutarak killi zeminlerin fiziko-mekanik özelliklerini araştırmıştır. Uçucu kül eklenerek hazırlanan yapay zemin numunelerinde kesme dayanımının ve konsolidasyon hızının arttığı; permeabilitenin ise azaldığı saptanmıştır. Bununla birlikte, artan bekleme süresiyle killi zeminlerin kayma mukavemetinin daha da arttığı gözlemlenmiştir.

Brooks (2009) tarafından yapılan çalışmada, şişen zeminin uçucu kül ile pirinç kabuğı külünün katkısının zeminin dayanım özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Şişen zeminin ağırlıkça %12 pirinç kabuğı külü ve %25 uçucu kül oranlarında eklenerek oluşturulan numunelerde en iyi dayanım sonucu elde edilmiştir.

Çetin (2011) tarafından yapılan çalışmada yol altyapısında dolgu olarak kullanılacak olan üç farklı zemine yüksek karbon değerine sahip uçucu kül ve kireç klinker tozu eklenmiştir.

Numuneler 1, 7 ve 28 gün kür edilmiştir. Kür sonunda deneylere tabi tutulan zeminlerin elastik modülü ve CBR değerlerinin arttığı belirlenmiştir.

Sharma vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada, yüksek şişme ve büzülme potansiyeline sahip killerde uçucu kül stabilizasyonu yapıldığında, X-Ray analizlerinde, ısı gravimetre ölçümlerinde, zeta potansiyellerinin ölçümünde ve pH değeri ölçümlerinde, montmorillonit türünde killerde şişme ve büzülme etkisi gösterdiğini belirlemişlerdir.

Ünver (2015) tarafından yapılan çalışmada Çatalağzı ve Soma uçucu külünün killi zeminler katılarak elde edilen numuneler üzerinde yapılan deneylerde serbest basınç dayanımının arttığı gözlemlenmiştir.

Öz (2015) tarafından yapılan araştırmada zemin büyütmesi, sıvılaşma, zemin yenilmesi gibi dinamik yük kaynaklı sorunların oluşabileceği zeminler üzerine yaptığı çalışmasında taşıma gücü yetersizliği, permeabilite fazlalığı, şişme ve büzölmeye eğilim, kayma direnci yetersizliği gibi problemlerin giderilmesinde zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi veya stabilizasyonu önemini dile getirmiştir.

Literatürde yapılan ve yukarıda özetlenen birçok çalışmada, farklı zemin türlerine katılan uçucu kül malzemesi ile zeminlerin mekanik özelliklerinin iyileştiğı anlaşılmıştır.

BÖLÜM 2

MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

2.1.1 Çalışmada Kullanılan Kilin ve Uçucu Külün Özellikleri

Bu çalışmada, Zonguldak Çatalağzı Termik Santralinden elde edilen uçucu kül kullanılarak Bartın ili Bartın Üniversitesi Kutlubey Kampüsü bölgesine ait killi zemin numunelerine ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında uçucu kül eklenip deney numuneleri hazırlanarak zemin sınıflandırma, konsolidasyon, Standart Proktor, CBR ve serbest basınç deneylerine tabi tutulmuştur.

2.1.1.1 Bartın İli Bartın Üniversitesi Kutlubey Kampüsü Bölgesi Killeri

Yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan killi zemin Bartın'ın güneybatısında yer alan Ankara-Bartın karayolu üzerindeki Bartın Üniversitesi Kutlubey Kampüsü bölgesinden alınmıştır (Şekil 2.1a). Çalışma alanının jeolojisi incelendiğinde; alttan üste doğru Alt-Orta Eosen yaşlı Çaycuma Formasyonu ile Kuvaterner yaşlı Alüvyon olmak üzere iki farklı jeolojik birim ayırt edilmiştir. Çaycuma formasyonu, volkanit ara katkılı kumtaşı, konglomera, kireçtaşı, marn, kiltası gibi kayaç türlerinden oluşurken (Tokay, 1955), çalışma alanında yeşilimsi gri renkli ince kumtaşı katmanları içeren kiltası egemen olarak görülmektedir (Ateş vd., 2015). Bu birimin üst seviyeleri ileri derecede altere olmuş, belli belirsiz kumtaşı ara katmanlı, metrelerce kalınlıktaki yeşilimsi gri, açık kahverengi killerden oluşmaktadır (Şekil 2.1b). Alüvyon ise, Çaycuma formasyonunun ayrışma ve taşınması sonucu oluşan killi malzemeden meydana gelmektedir.

Çaycuma formasyonunun yayılım gösterdiği alanlarda, özellikle karayollarında çökmeler ve şev duraylılığı problemleri sıkça görülmektedir. Yapılan bu deneysel çalışmada kullanılan kil numuneleri, mühendislik özellikleri bakımından problemlili zemin olarak değerlendirilen bu formasyonun en üst kısımlarında ayrışma sonucu oluşan killerden alınmıştır.



(a)



(b)

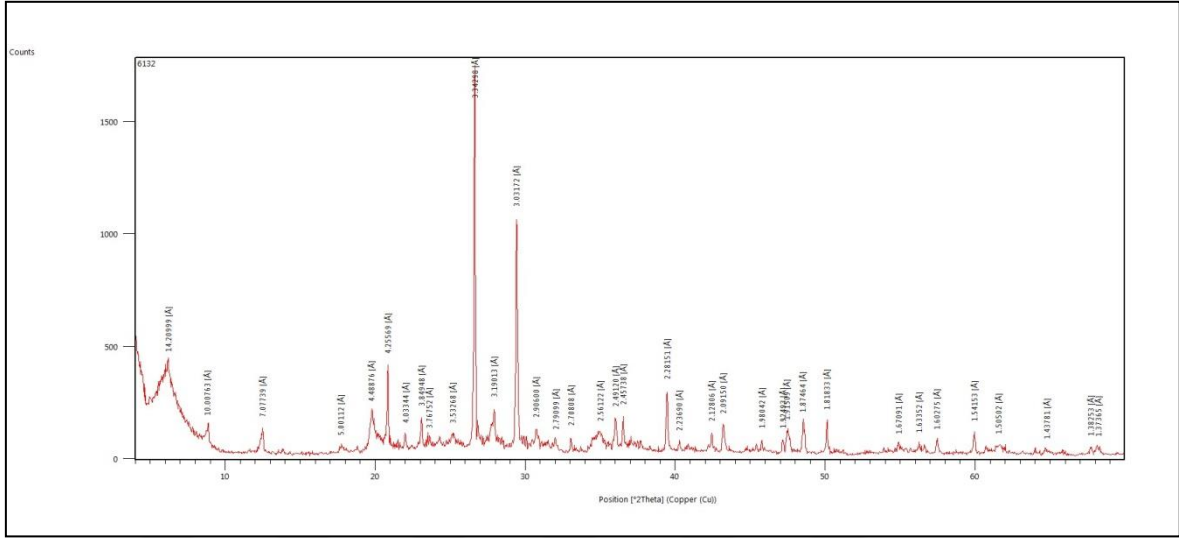
Şekil 2.1: (a), İnceleme alanı yer bulduru haritası (b), Çaycuma formasyonundan genel görünüm.

Bu çalışmada kullanılan Kutlubey Kampüs Bölgesi kil numunenin Maden Analizleri ve Teknolojisi Dairesi Başkanlığı'nda (MTA), Cu-X ışın tüplü Panalytical X'Pert Powder XRD analiz cihazı ile gerçekleştirilen XRD analizi Panalytical X'Pert Highscore Plus programı ve ICSD veri tabanı kullanılarak Rietveld (1969) metodu ile kantitatif analizi yapılmıştır. Bu sonuçlara göre zemin örneklerinin bileşiminde kil minerali olarak montmorillonit ve illit minerali saptanmıştır. Bu yapı mineral blokları arasında yer alan potasyum iyonları ile kuvvet kazanarak su moleküllerinin yapı arasına girmesini önlemektedir. Bu mineral yapısı su ile karşılaştığında genişlemeye başlamaktadır. Ayrıca numunede kuvars, montmorillonit, dolomit gibi minerallerde yer almaktadır. Kimyasal analiz sonuçları Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1: Kil numune kimyasal analiz/test raporu.

Numune	Ateşleme Zayırlığı(A.Za)%	Al ₂ O ₃ %	CaO %	Fe ₂ O ₃ %	K ₂ O %	MgO %	MnO %	Na ₂ O %	P ₂ O ₅ %	SiO ₂ %	TiO ₂ %
Kutlubey Kil Numunesi	14,80	13,4	11,4	5,9	2,1	3,4	0,1	0,7	0,1	45,6	0,7

MTA’da yapılan Kutlubey Kampüsü kil zemin numunenin X-Ray Difraktogramı Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



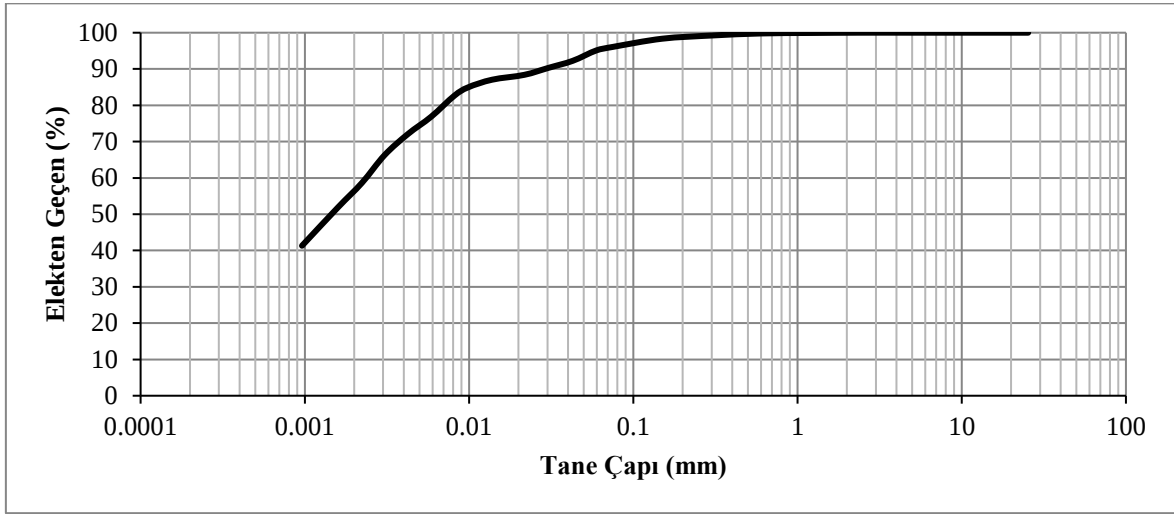
Şekil 2.2: Kil zemin numunenin X-Ray Difraktogramı.

Deneylerde kullanılan yeşilimsi gri renkli kil zeminin genel görünümü Şekil 2.3a’da, taramalı elektron mikroskop görüntüsü ise Şekil 2.3b’de verilmiştir.



Şekil 2.3: Kil zeminin (a), genel görünümü (b), Taramalı elektron mikroskopunda (SEM) görüntüsü.

Bartın Üniversitesi Kutlubey Kampüsü katkısız kil zeminin, elek analizi ve kıvam limitleri deneyleri yapılarak zemin sınıfı ve dane boyu belirlenmiştir. Yapılan elek analizi deney sonuçlarına göre katkısız kil numunelerinin 200 nolu (0,075 mm) elekten geçen miktarı %96 olup en büyük dane boyutu 0,3 mm olarak belirlenmiştir. Kil zeminin dane boyutu dağılım eğrisi Şekil 2.4’te verilmiştir.



Şekil 2.4: Kutlubey Kampüsü kil zeminin dane boyutu dağılım eğrisi.

Katkısız kil numunenin içeriğindeki çakıl oranı %0, kum %4, silt %40, kil %56 olarak belirlenmiştir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemine göre yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfına girdiği saptanmıştır.

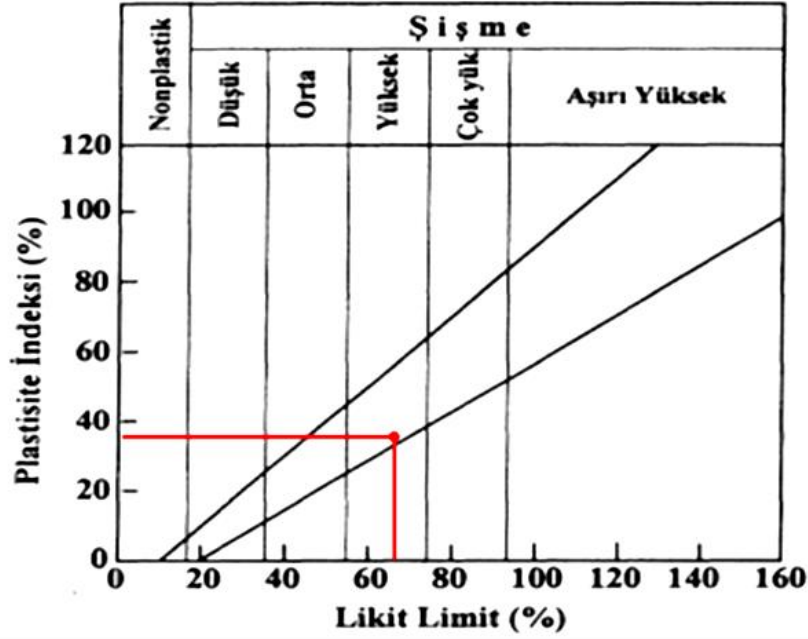
Kil zeminin üzerinde yapılan Standart Proktor Deneyi sonucunda maksimum kuru birim hacim ağırlığı $15,6 \text{ kN/m}^3$ ve optimum su muhtevası %24,3 olarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan Kutlubey Kampüsü kil zeminin özellikleri Tablo 2.2' de verilmiştir.

Tablo 2.2: Deneylerde kullanılan killi zemin özellikleri.

Çakıl (>4.75mm) (%)	0	Plastisite İndisi	37
Kum(0.075 - 4.75mm) (%)	4	Zemin Sınıfı Sembolü (USCS)	CH
Silt (0.002 – 0.075mm) (%)	40	Dane birim hacim ağırlığı; γ_s (kN/m^3)	26,6
Kil (<0.002mm) (%)	56	Optimum su muhtevası (%)	24,3
Likit limit	66	Maksimum kuru birim hacim ağırlık; γ_{maks} (kN/m^3)	15,6
Plastik limit	29	Renk	Yeşilimsi Gri

Kil zeminlerin şişme özelliklerinin belirlenmesinde kıvam limit değerlerine bakılmaktadır. Kutlubey Kampüsü katkısız kil zeminin, yapılan deneylerde elde edilen verilere göre likit limit (LL) değeri 66, plastisite indisi (PI) 37'dir. Plastisite indisine göre şişme

potansiyelinin belirlendiği gruplandırma abakları Şekil 2.5 ve Tablo 2.3’te verilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre LL ve PI değerleri abak üzerinde kesiştirildiğinde kil zeminin yüksek şişme potansiyeli sınıfına girdiği belirlenmiştir.



Şekil 2.5: Şişme potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan abak (Yılmaz vd., 1998).

Tablo 2.3: Şişen zeminlerin sınıflaması (O’Neill ve Poormoayed, 1980).

Likit Limit	Plastisite İndeksi	Şişme Potansiyeli	Şişme Potansiyeli Sınıflaması
<50	<25	<0,5	Düşük
50-60	25-35	0,5-1,5	Orta
>60	>30	>1,5	Yüksek

Şişen zeminler, su içeriği artışı ile hacminin artması veya su içeriğinin azalması durumunda ise büzülen zeminlerdir. Killi zeminlerdeki hacimsel değişiklikler sebebiyle yapılarda birçok deformasyonlar meydana gelmektedir. Şişme potansiyeli yüksek zeminler üzerinde bulunan özellikle yollar, barajlar, tüneller vb. ulaşım ağ hattını oluşturan yapılarda zemin kabarmaları sonucunda yapılarda çatlaklıklar veya çökmeler oluşmaktadır.

2.1.1.2 Çatalağzı Termik Santral Uçucu Külleri

Uçucu kül, öğütülmüş taş kömürü veya linyit kömürünün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu oluşan ve baca gazları ile sürüklenen silis ve alimünosilisli toz halindeki bir yanma kalıntısıdır (TS 639, 1975). Uçucu külün tanınması 1930'lu yıllarda elektrik enerjisi kullanan sanayinin gelişmesi ile başlamıştır. 1937 yılında Kuzey Amerika'da uçucu külün kullanıldığı ve 1970 yıllarında ise çimentonun pahalalanmasıyla uçucu kül tüm dünya genelinde kabul görmeye başlamıştır (Gökçe, 1995).

TS 639 "Uçucu Kül" standardında uçucu kül bileşen içeriğinde $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı en az %70 verilmiştir. Uçucu kül tanımlamalarında ise içerisinde %10'dan fazla miktarda CaO bulunan küller yüksek kireçli küller, %10'dan az miktarda CaO bulunan uçucu küller ise düşük kireçli küller olarak sınıflandırılmıştır. Düşük kireçli uçucu küllerin sadece puzolanik özelliğe sahip oldukları, yüksek kireçli uçucu küllerin ise hem puzolanik özelliğe hem de içerdikleri kireç nedeniyle bir miktar hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip oldukları bilinmektedir.

Uçucu küller termik santralde kullanılan yakıta göre iki ana gruba ayrılırlar;

1. Linyit kömürü uçucu külleri
2. Taş kömürü uçucu külleri

Kimyasal yapıları bakımından uçucu küller 4 gruba ayrılmaktadır (Toros, 1987).

1. Silikat Alüminat Esaslı Uçucu Küller: Bileşimlerinin büyük bir kısmını kuvars (SiO_2) ve bir miktar alüminat (Al_2O_3) meydana getirmektedir. Taş kömürü uçucu külleri genellikle bu yapıdadır. İçerdikleri alkali ve toprak alkali element oksitleri nedeni ile çok ince taneli ve camsı yapıya sahiptirler.
2. Silikat-Kalsiyum Oksit Esaslı Uçucu Küller: Yapılarındaki ana oksitler silikat (SiO_2) ve kalsiyum oksittir (CaO). Bazı durumlarda ek kireç kullanımına gerek kalmaksızın kendi kendilerine bir bağlayıcılık oluştururlar. Zayıf bir bağlayıcı özellikleri vardır.

3. Sülfo- Kalsiyum Oksit Esaslı Uçucu Küller: Yapılarının büyük bir bölümü kükürt trioksit (SO_3) ve kalsiyum oksit (CaO) meydana gelmiştir. Sulu ortamda kendiliğinden sertleşebilirler. Bu sınıfa genellikle linyit uçucu külleri girmektedir.
4. Sınıflandırılmayan Uçucu Küller: Termik santrallerdeki yakma sisteminin homojen olmamasından kaynaklanan ve belirli bir kimyasal yapıya sahip olmayan küllerdir.

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 ($Ca(OH)_2$) 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 alümina vb. sebebiyle kendi başlarına bir miktar bağlayıcı özelliğe sahip olabilirler.

Uçucu kül ile zemin stabilize edilirken, üç farklı yönden zemin iyileştirilmektedir (Kurama vd., 1999). Bunların birincisi, uçucu külde bulunan tri-kalsiyum silikatlar ile hidrasyon sonucunda çimentolaşma olayıdır. İkincisi serbest halde bulunan kirecin (CaO) kil mineralleri ile etkileşimi sonucunda plastisitede meydana gelen azalmadır. Üçüncüsü ise silika ve alümina bileşiklerinin puzolanik tepkimeleri sonucunda meydana gelen iyileşmedir.

Uçucu küller, inşaat mühendisliği uygulamalarında yaygın kullanım alanına sahiptir. Dünyada inşaat yapımlarında, barajlarda ve yol dolgularında altyapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Örneğin Frankfurt'ta Castor ve Pollux gökdelenleri ile Madrid'te 171 m yükseklikteki Picasso gökdeleninin değişik bölümlerinde %20 ile %40 arasında, Lizbon'da Caixa Gérai Deposite bankasının binasında, Danimarka'da Great Bell East köprüsünün yapımında, Finlandiya'da Permantokoski hidroelektrik santrali yapımında, Avusturya'da yeraltı tren yolu tünellerinde, İtalya'da yerüstü elektrik direkleri yapımında, İskoçya'da Tornes Nükleer Enerji Santrali yapımında, 100 yıllık kullanım için dizayn edilen hızlı tren hattının tünel inşaatında uçucu kül kullanılmıştır (Ecoba, 2001).

Çatalağzı Termik Santrali (ÇATES), Zonguldak'ın Kilimli ilçesi, Çatalağzı Kasabası, Doğancılar Köyü ve Kazköy Köyü bölgesinde yer almakta ve Bartın iline yaklaşık 63 km mesafede bulunmaktadır (Şekil 2.6).



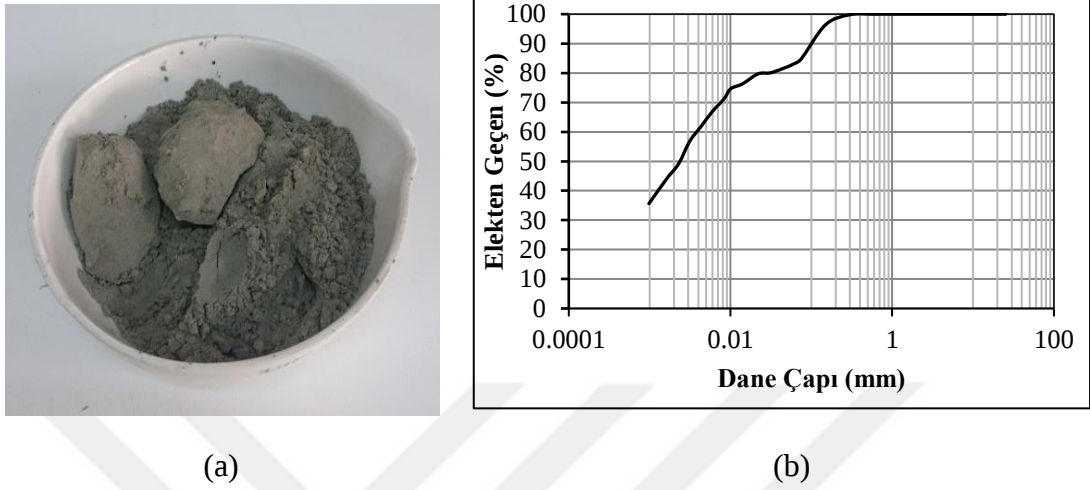
Şekil 2.6: Çatalağzı Termik Santralinin haritadaki konumu ile görünümü.

ÇATES, 1974'te Zonguldak taşkömürü havzasında ortaya çıkan düşük kalorili miks, şlam ve hafif şist ürünlerini ekonomiye kazandırmak amacıyla yatırım programına alınmıştır. ÇATES 2x157,34 MW, toplam kurulu gücü 314,68 MW, yıllık enerji üretim kapasitesi 2.386 GWh'tır.

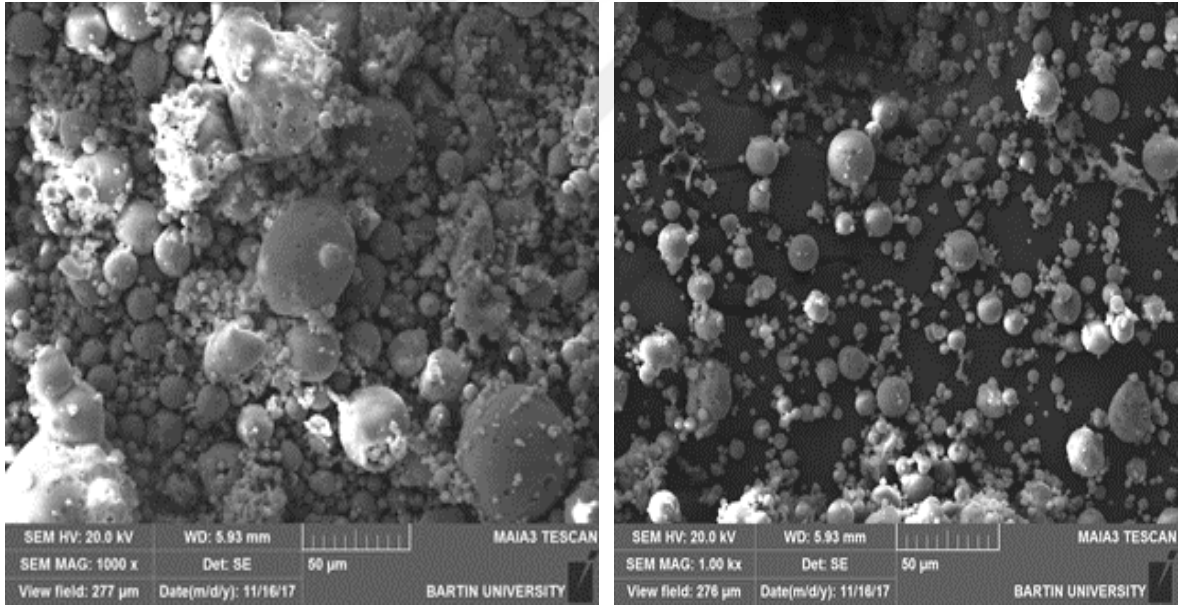
ÇATES'nde yaklaşık 2000 ton/gün miktarında uçucu kül açığa çıkmaktadır. Uçucu küller depolanma sahasına taşınmakta olup sulandırılarak denize basılmaktadır (Kızgut vd., 2001).

Deneylerde kullanılan uçucu kül örnekleri, Zonguldak Çatalağzı Termik Santralinden kuru olarak elektro filtrelerden toplanmıştır. Alınan uçucu kül açık gri renkte olup görünüm itibarıyla çimentoyu anımsatmaktadır (Şekil 2.7a). Uçucu kül örneğe yapılan elek analizi deneyler sonucuna göre, Şekil 2.7b'de görüldüğü gibi en büyük dane çapı 0,3 mm'den

küçük olduğu tespit edilmiştir. Bu uçucu küllerin SEM görüntüsü Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi uçucu kül tanecikleri incelendiklerinde süngerimsi, boşluklu ve boşluksuz küresel bir yapıya sahiptir.



Şekil 2.7: ÇATES uçucu kül (a), görünümü (b), dane boyut dağılımı.



Şekil 2.8: Çatalağzı Termik Santrali F sınıfı uçucu küllerin SEM görüntüsü.

ÇATES uçucu kül kimyasal bileşim bakımından SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , SO_3 , Na_2O , K_2O , Cl^- ve CaO bileşenlerinden oluşmaktadır (Tablo 2.4). SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 toplamı % 86,7 ve CaO %2,18 olduğundan TS 639 standardına göre F sınıfı uçucu kül sınıfına girmektedir.

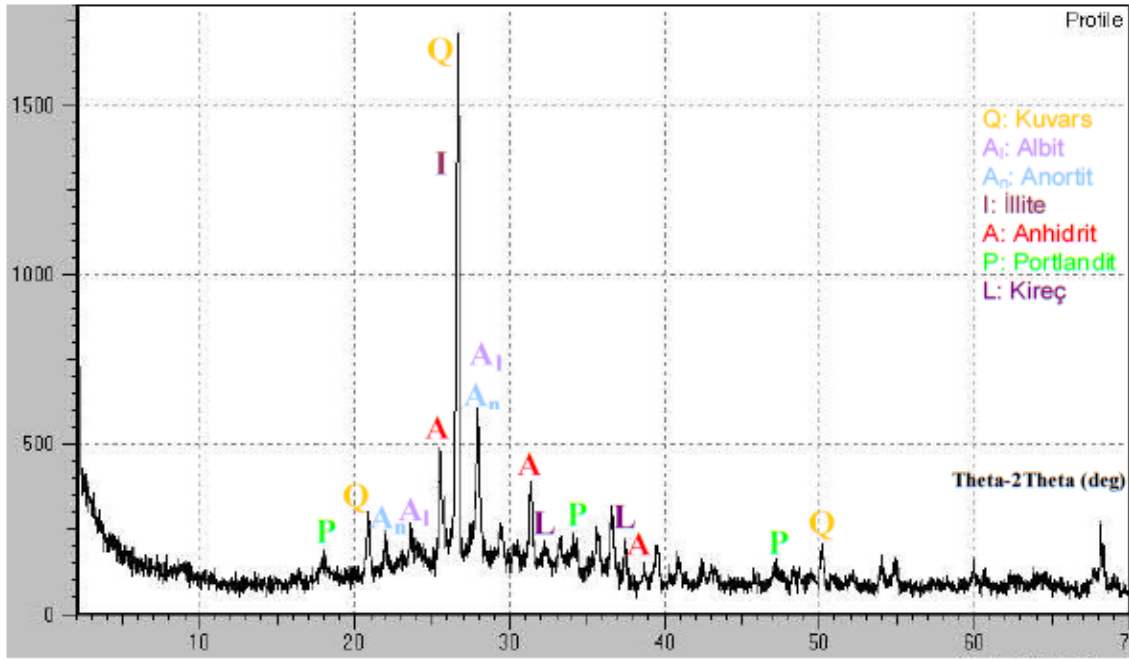
Tablo 2.4: Çatalağzı Termik Santralı uçucu kül kimyasal analiz sonuçları (ÇATES, 2017).

Kimyasal Bileşen	Ölçüm Sonuçları (%)	TS EN 450-1 İstenen Değer
SiO ₂	55,44	-
Al ₂ O ₃	24,93	-
Fe ₂ O ₃	6,33	-
CaO	2,18	-
MgO	2,38	-
SO ₃	0,14	Maks.3.0
Na ₂ O	0,49	
K ₂ O	3,87	
Cl-	0,0056	Maks. 0.1
Serbest CaO	0,32	
28 Günlük puzolonik aktivite endeksi	82,7	Min. 75
90 Günlük puzolonik aktivite endeksi	97,3	Min. 85

Düşük kireçli uçucu küllerde mineral yapısında; camı faz, mullit (Al₆Si₂O₁₃), manyetit (Fe₂O₄), hematit (Fe₂O₃), kuvars (SiO₂) vb. içerirken yüksek kireçli uçucu küllerde sayılanlara ilaveten serbest kireç (CaO), trikalsiyum aluminat (Ca₃Al₂O₆), anhidrit (CaSO₄), plajiyoklaz, gehlenit, feldspat gibi kalsiyum silikatlar bulunmaktadır. Çatalağzı Termik Santralinden elde edilen uçucu külün mineralojik kompozisyonları Tablo 2.5’te verilmiştir. ÇATES uçucu külünün X-Ray Difraktogramı Şekil 2.9’da gösterilmiştir (Türkmenoğlu, 2010).

Tablo 2.5: Çatalağzı Termik Santralinden elde edilen uçucu külün mineralojik kompozisyonları (Türkmenoğlu, 2010).

Mineral, %	Çatalağzı Uçucu kül
Mullit	18.1
Kuvars	10.9
Manyetit	0.2
Hematit	0.1
Anhidrit	-
Serbest CaO	0.7
Plajiyoklaz	-
Camsı ve amorf faz	~70



Şekil 2.9: ÇATES uçucu külünün X-Ray Difraktogramı (Türkmenoğlu, 2010).

2.2 Yöntem

2.2.1 Deneysel Çalışmalar

Bartın Üniversitesi Kutlubey Kampüsü Bölgesi kil zeminine Zonguldak Çatalağzı Termik Santralinden alınan atık uçucu kül eklenerek kilin geoteknik özelliklerindeki değişimlerin belirlenmesi araştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında, zemin tanımlama, fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemeye yönelik bütün deneysel çalışmalar Bartın Üniversitesi Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. X ışını kırınımı yöntemi (X-Ray) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) çalışmaları ise Bartın Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında, kil minerolojik ve kimyasal analizi ise Maden Tetkik Arama (MTA)'da yapılmıştır.

Bartın ili Bartın Üniversitesi kil zemine Zonguldak Çatalağzı Termik Santralinden açığa çıkan F sınıfı uçucu külü zeminin ağırlığınca %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında eklenerek deney karışım numuneleri hazırlanmıştır. Sırasıyla aşağıdaki deneyler yapılmış olup deney programı ise Tablo 2.6'da gösterilmiştir.

- a) Dane Boyu Analizi (Elek Analizi ve Hidrometre Deneyi)
- b) Kıvam Limitleri
- c) Piknometre (Özgül Ağırlık) Deneyi
- d) Standart Proktor Deneyi
- e) Konsolidasyon Deneyi
- f) CBR Deneyi
- g) Serbest Basınç Deneyi
- h) X-Işını Kırınım Yöntemi (XRD)
- i) Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Tablo 2.6: Çalışma kapsamında yapılan deneyler ve kür süreleri (UK: Uçucu Kül).

Çalışma Kapsamında Yapılan Deneyler	KÜR SÜRESİ	Karışım Oranı						
		Kil Zemin	Uçucu Kül	%5 UK	%10 UK	%15 UK	%20 UK	%25 UK
Elek Analizi	Kür Uygulamadan	X	X	X	X	X	X	X
Hidrometre	Kür Uygulamadan	X	X	X	X	X	X	X
Kıvam Limitleri	Kür Uygulamadan	X	X	X	X	X	X	X
Piknometre	Kür Uygulamadan	X	X	X	X	X	X	X
Standart Proktor	Kür Uygulamadan	X	X	X	X	X	X	X
Konsolidasyon	Kür Uygulamadan	X	X	X	X	X	X	-
CBR	1.Gün	X	X	X	X	X	X	-
	8.Gün	X	X	X	X	X	X	-
	16.Gün	X	X	X	X	X	X	-
	32.Gün	X	X	X	X	X	X	-
Serbest Basınç Deneyi	1.Gün	X	X	X	X	X	X	-
	8.Gün	X	X	X	X	X	X	-
	16.Gün	X	X	X	X	X	X	-
	32.gün	X	X	X	X	X	X	-
	120.Gün	X	X	X	X	X	X	-
	360.Gün	X	X	X	X	X	X	-
X-Işını Kırınım Yöntemi (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	120.Gün	X	X	X	X	X	X	-

2.2.1.1 Dane Boyu Analizi (Elek Analizi ve Hidrometre Deneyi)

Zemin içerisinde bulunan tanelerin çap genişliklerini ve miktarının ne oranda olduğunu belirlenmesi işleminde tane boyu analizi veya granölometrik analiz denilmektedir.

Kum ve çakıl gibi kaba taneli zeminlerin tane dağılımları eleme metoduyla (elek analizi), kil ve silt gibi ince taneli zeminlerin tane dağılımları ise sedimantasyon (hidrometre deneyi) metoduyla belirlenir.

Elek analizi kuru ve ıslak eleme olmak üzere iki şekilde uygulanmaktadır. Bu çalışmada ıslak elek analizi için TS 1900-1 ve BS 1377 standartlarına uygun olarak alınan kil, kül ve ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında uçucu kül eklenerek karışım numuneleri ilk olarak etüvde 105°C’de 24 saat kurutulmuştur. Kuru numuneden yaklaşık 500 gr alınarak elek analizinde kullanılmak üzere tartılmıştır. Hazırlanan karışım numuneleri 200 nolu (0.075 mm açıklıklı) elek üzerinde elek altından çıkan su berraklaşana kadar yıkanmıştır (Şekil 2.10). Elek altından een malzeme hidrometre analizi yapmak üzere bir kaba toplanmıştır. 200 nolu elek üzerinde kalan numune etüvde 105°C’de 24 saat kurumaya bırakılmış, kuruduktan sonra tartılarak yıkama esnasında oluşan kayıp (silt ve kil) miktarı belirlenmiştir. 200 nolu elekte kalan ve kurutulan numuneler standartlarda belirtilen elek seti üzerine dökülmüş ve sallanma sehpasında elenmiştir. Her elekte kalan numuneler tartılarak yüzdeler belirlenmiş ve granölometri eğrileri oluşturulmuştur.



Şekil 2.10: Numunelerin elek analizi aşamaları.

Yapılan deneysel çalışmalarda, kurutulmuş 200 nolu elekten geçen numunelerden hidrometre deneyi için 50 gr alınmıştır. Karışım numuneleri etüvde 24 saat kurutulmuş ve daha önce su içinde çözülmüş olan ayrıştırıcı madde $\text{Na}_8\text{P}_3\text{O}_{10}$ (sodyumheksametazotat-fosfat çözeltisi) eklenerek numuneler iyice karıştırılmış ve tanelerin ayrıştırılması için 24 saat bekletilmiştir. Bu şekilde hazırlanan numuneler 10 dakika boyunca karıştırma mikserinde karıştırıldıktan sonra mezuraya aktarılmış ve üzerine 1000 cm^3 işaretine gelinceye dek arı su eklenmiştir (Şekil 2.11). Okuma yapılmadan önce, mezürün açık olan ağız kısmı avuç içi ile kapatılarak 30 sn süreyle birkaç kez baş aşağı getirilerek her noktasındaki konsantrasyonunun aynı olması sağlanmıştır. Cam kap düz bir yüzeye konulmuş ve ısısı ölçülmüştür. Hidrometre süspansiyonun içine yavaşça bırakılmış ve süspansiyon içerisine batırılışından sonra 0,25, 0,5, 1, 2, 5, 10, 15, 30, 60, 120, 240, 480 ile 1440 dakikada okumaları alınmıştır. Elde edilen sonuçlar kullanılarak Stokes Yasasına göre dane boyu dağılımı hesaplanmıştır.



Şekil 2.11: Hidrometre deneyi karışım numunelerinin görünümü.

2.2.1.2 Piknometre Deneyi

Piknometre deneyi, zeminin dane birim hacim ağırlığını belirleyen deneydir. Yoğunluk şişesine belirli bir miktarda su doldurulup hava kabarcığı kalmayacak şekilde vakum pompası ile havası alınmıştır ve yoğunluk şişesi tamamen su ile tamamlanarak tartılmıştır. Hidrometre deneyi için kurutulan kil ve uçucu kül katkılı karışım numunelerinden yaklaşık 10 gr tartılarak yoğunluk şişesine dane kaybı olmadan eklenmiştir (Şekil 2.12). Kuru numune üzerine bir miktar su eklenmiş ve karışım vakum pompası ile hava kabarcıkları

kalmayıncaya dek havası alınmıştır. Kabarcık yapmayacak şekilde şişe su ile tamamlanarak tartılmış ve dane birim hacim ağırlığı hesaplanmıştır.



Şekil 2.12: Piknometre deney yapım aşamaları.

2.2.1.3 Kıvam Limitleri

İnce taneli zeminler içerisinde bulundurduğu su miktarının değişiklik göstermesiyle oluşan yumuşaklık veya sertlik durumuna kıvam denir. Zeminlerde su miktarı azaldıkça çok katı bir kıvam olurken su miktarı arttıkça çok sıvı kıvama kadar geniş bir yelpazesi vardır. Bu yüzden ince taneli zeminin yapısal bu değişikliği mühendislik açısından mukavemet, şekil değiştirme ve sıkışma gibi özellikleri etkilemektedir. Kıvam limitlerinin değerlerini belirleyebilmek için Atterberg tarafından geliştirilen likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmaktadır.

a. Likit Limit Deneyi

Yapılan bu deneysel çalışmada, kil zemin, uçucu kül ve uçucu kül katkılı killi zemin karışımlarından 40 nolu elek altında kalan numunelerden yaklaşık 200 gr alınarak malzemelere su karıştırılmış ve porselen kapta macun kıvamına gelinceye kadar spatula ile

karıştırılmıştır. Casagrande aletinin vuruş kabına konularak oluk açma bıçağı ile iki eşit parçaya bölünmüş ve 3 saniyede iki dönme yapacak hızda yatay kol döndürülerek zeminin iki parçasının oluk tabanında 13 mm birleşimini sağlayacak şekilde düşüş sayısı saptanmıştır (Şekil 2.13). Kapanan bölgeden kurutma kabına yaklaşık 10 gr numune alınarak kap+yaş numune ağırlığı belirlenmiştir. 24 saat 105°C’de etüvde kurutulan numunenin kap+kuru numune ağırlığının belirlenmesiyle su muhtevası hesaplanmıştır. Deney her numune için üç kez tekrarlanmıştır. Elde edilen darbe sayısı ve buna karşılık gelen su muhtevası değerlerinden akış eğrisi çizilmiştir. Akış eğrisinde 25 darbeye karşı gelen su muhtevası değeri likit limit değerini göstermektedir.



Şekil 2.13: Likit limit deney numunelerinin hazırlanması ve deneyin yapılışı.

b. Plastik Limit Deneyi

40 nolu elekten geçirilmiş ve likit limit deneyinde kullanılan numune plastik limit için el ile elipsoidal bir biçim verilmiş olup malzeme el ayası ile yuvarlanmıştır. Malzeme 3 mm çapına geldiğinde çatlayıp birkaç parçaya bölününceye kadar devam edilmiştir (Şekil 2.14). Deney numunelerinin su muhtevasını belirlemek için kaba alınarak tartılarak etüve kurutma için bırakılmıştır. Deney iki defa tekrar edilmiş ve ortalama su muhtevası plastik limit olarak alınmıştır.



Şekil 2.14: Karışım numunelerinin plastik limit deney yapılışı.

2.2.1.4 Standart Proktor Deneyi

Bartın Üniversitesi Kutlubey Kampüs bölgesine ait kil ve kil zeminine ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarda Çatalağzı Termik Santrali'ne ait atık uçucu kül katılarak elde edilen karışımların Standart Proktor Deneyi ile optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiştir.

Karışım numuneleri Standart Proktor kabına 3 tabaka halinde doldurularak her bir tabaka 30,5 cm den serbest düşen 2,5 kg ağırlığındaki tokmakla 25 vuruş ile sıkıştırılmıştır (Şekil 2.15). Kullanılan kalıp içindeki sıkıştırılmış zeminin yaş ağırlığı belirlenmiş olup su muhtevasının belirlenmesi için, alttan ve üstten olmak üzere iki yerden numune alınmıştır. Deney ASTM D698 standardı göz önüne alınarak 7 farklı su muhtevasında tekrar edilmiştir. Bulunan ortalama su muhtevası değeri kullanılarak, su muhtevası-kuru birim hacim ağırlık grafiğinden maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değeri belirlenmiştir.



Şekil 2.15: Standart Proktor Deney numunelerinin hazırlanması.

2.2.1.5 Konsolidasyon Deneyi

Zemin yüzeyine gelen devamlı yükler altında zeminde meydana gelen zemin sıkışmasına konsolidasyon denir. Yük altında zemindeki su ve hava dışarıya atılması ve onun yerine taneleri yer alarak daha sıkışık bir duruma gelmesi ile oluşur.

Kil zemin numunesi ve kile %5, %10, %15 ve %20 oranlarında uçucu kül katılarak hazırlanan karışımlar ring içine optimum su muhtevasında sıkıştırılmıştır. Konsolidasyon hücresine poroztaş, filtre kağıdı ve üzerine numune ringi ile konulmuş numune üstüne filtre kağıdı, poroztaş ve yükleme tablası dikkatlice monte edilmiş ve konsolidasyon hücresi cihaz tablasına yerleştirilerek hazırlanmıştır (Şekil 2.16). Numuneye yük aktaran vidalı çubuk dikkatlice aşağı çekilerek numune kapağında bulunan bilyeye temas ettirilmiştir. Numunelere yük uygulamadan önce konsolidasyon hücresi suyla doldurulmuş ve 24 saat boyunca serbest şişmeleri kontrol edilmiştir. Deneyin sonraki aşamasında ise mikrometre sıfırlanarak kaldırıcı koluna en düşük yük konulmuş ve mikrometrede okunmuştur. Okumalar başlangıçtan itibaren uygun zaman aralıklarında (5-15-30 saniye sonra 1-2-5-10-15-30-60-120-240-480-1440 dakika) yapılarak kaydedilmiştir. Deneyin bir sonraki aşamasında sırayla 0, 25, 50, 100, 200, 400 ve 800 kPa yük uygulanmış ve her yük kademesi için 24 saat numune yüksekliği değişimi takip edilmiştir. Son yük aşaması sonunda yükler boşaltılarak numunelerde şişme değerleri okunmuştur.



Şekil 2.16: Konsolidasyon deney numunelerinin hazırlanması.

2.2.1.6 Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi

Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR), bir zeminin dikkatle kontrol edilen yoğunluk ve rutubet şartları altında taneler arası direncinin bir ölçüsüdür.

Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR), bir metal kalıpta sıkıştırılmış zemin örneğine daire uçlu bir metal çubuğun ($D=50$ mm), sabit bir hızla (1.27 mm/dak) batırılması için gerekli olan kuvvetin, standart olarak sıkıştırılmış (standart kırma taş, çakıl) zemine batırılması için uygulanan kuvvete oranı olarak da tanımlanmaktadır.

Bartın Üniversitesi Kutlubey Kampüs bölgesi kil zemini ve kil zemine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarda uçucu kül katılarak elde edilen karışımlar, Standart Proktor Deneyinde belirlenen optimum su muhtevasında sıkıştırılmıştır. Rutubetli ortamda 1, 8, 16 ve 32 gün kürde bekletilmiştir. CBR deneyi için kür edilen numuneler üzerine $4,5$ kg'lık ağırlıklar konularak basınç aletine yerleştirilmiş ve dakikada 1.27 mm'lik hızla metal çubuk zemine itilmiştir (Şekil 2.17). 0.625 , 1.25 , 1.875 , 2.50 , 5.00 , 7.50 , 10.00 , 12.50 mm'lik penetrasyon yük değerleri cihazdan okunmuştur. CBR değeri, zeminin taşıma gücünden daha çok yük karşısında deformasyona karşı gösterdiği direnç miktarını belirlemektedir. Belirli bir penetrasyonu sağlayan yükün aynı penetrasyonu standart eğri üzerinde sağlayan yüke oranı, o penetrasyondaki CBR değeri olarak tanımlanmaktadır. CBR değeri $2,5$ mm'lik ve $5,0$ mm'lik penetrasyonlarda hesaplanır ve elde edilen bu iki değerden büyük olanı zeminin CBR değeri olarak kabul edilir.

CBR deneyi tamamlandıktan sonra numunenin su içeriğinin belirlenmesi için alt ve üst bölgesinden numune alınarak tartılmıştır. 24 saat 105°C 'lik etüvde kurutulmuş ve kuru numune ağırlığı belirlenerek su içeriği tespit edilmiştir.



Şekil 2.17: CBR deney numunelerinin hazırlanması ve deneyin yapılışı.

2.2.1.7 Serbest Basınç Deneyi

Silindirik numune üzerine eksenle yükleme ile genellikle yanal bir destek olmadan ayakta durabilecek killi zeminler gibi zemin numuneleri üzerinde kayma direncini belirlemek amacıyla kullanılan deneydir.

Eksenel yük artışları altında meydana gelen numunenin boy kısalması ölçülmekte ve gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmektedir. Yanal destek olmadan yapılan tek eksenli yükleme sonucunda eksenel gerilmenin ulaştığı en büyük değer serbest basınç dayanımını (q_u) vermektedir.

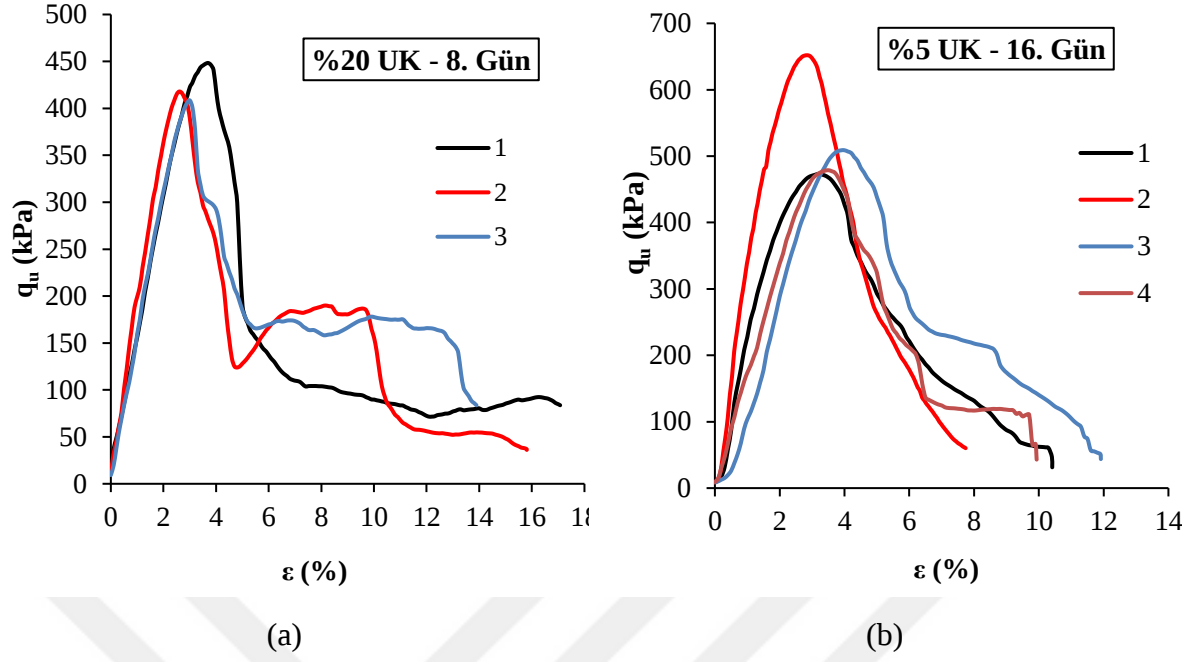
Çalışma kapsamında Kutlubey Kampüs bölgesine ait katkısız killi zemin ile zemine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 gibi farklı uçucu kül oranlarında hazırlanan karışımlar optimum su muhtevasında CBR kalıbında sıkıştırıldıktan sonra iç çapı 38 mm, yüksekliği 76 mm olan keskin uçlu ince cidarlı numune çıkarıcı silindir kalıplar yardımıyla serbest basınç deney numuneleri çıkarılmıştır (Şekil 2.18). Her karışım ve kür süresi için 4'er olmak üzere toplam 120 adet serbest basınç deney numunesi hazırlanmıştır. Çıkarılan bu numuneler tartılmış, boyutları ölçülmüş ve streç film ile sarılarak hermetik saklama kaplarında muhafaza edilmiştir. Kaplarda rutubetli ortam oluşturmak için numuneler üzerine nemli bez yerleştirilmiştir. Bu şekilde muhafaza edilen numuneler oda sıcaklığında ($21^\circ\text{C} \pm 3$) kür edilmiştir. Kür esnasında numuneler üzerine yerleştirilen nemli bez zaman zaman kontrol edilmiş ve gerektirdiğinde tekrar nemlendirilmiştir. Kürde bekletilen katkısız ile karışım numuneleri sırasıyla 1, 8, 16, 32, 120 ve 360 gün sonunda tam otomatik

bilgisayar kontrolü Geokomp marka serbest basınç cihazında serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 2.18). Deneye başlamadan numuneler tartılmış ve boyutları ölçülmüştür. Deney dakikada numune başlangıç boyunun %1 kısılacak şekilde bir hızla yapılmıştır. Serbest basınç deneyi sonunda her numunenin su muhtevası belirlenmiştir.



Şekil 2.18: Serbest Basınç deneyi yapım aşamaları.

Serbest basınç deneylerinde her karışım ve kür süresi için 3'er numune kullanılmış ve serbest basınç dayanımı ortalamaları hesaplanmış (Şekil 2.17a). Gruptan numunelerden elde edilen serbest basınç değerlerinde ortalamadan büyük sapmalar meydana geldiğinde (Şekil 2.17b) 4. numune kullanılmış ve sapma gösteren numunenin deney sonucu değerlendirilmede dikkate alınmamıştır.



Şekil 2.19: Serbest basınç deneyi sonucunda elde edilen karakteristik şekil değiştirme eksenel gerilme ilişkisi (q_u : basınç dayanımı, ϵ : birim şekil değiştirme).

2.2.1.8 X-Işını Kırınımı Yöntemi (XRD)

Bartın Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında Bartın Üniversitesi Kutlubey Kampüsü kil zemin, Zonguldak Çatalağzı Termik Santrali uçucu kül ve uçucu kül katkıli karışım oranları X-Işını Kırınım Yöntemi (XRD) tabi tutulmuştur. Numunelerden gelen X-ışınlarının spektrumunu monokristal yardımıyla inceleyerek kaydedilen spektrumlar numunelerin karakteristik özellikleri ve kimyasal bir reaksiyon sonucunda yeni kristal yapıların oluşup oluşmadığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, elde edilen karışımlarda, zamanla kil-uçucu kül dağılımında ve mikro yapıda oluşan değişimler SEM analizi yapılmıştır.

BÖLÜM 3

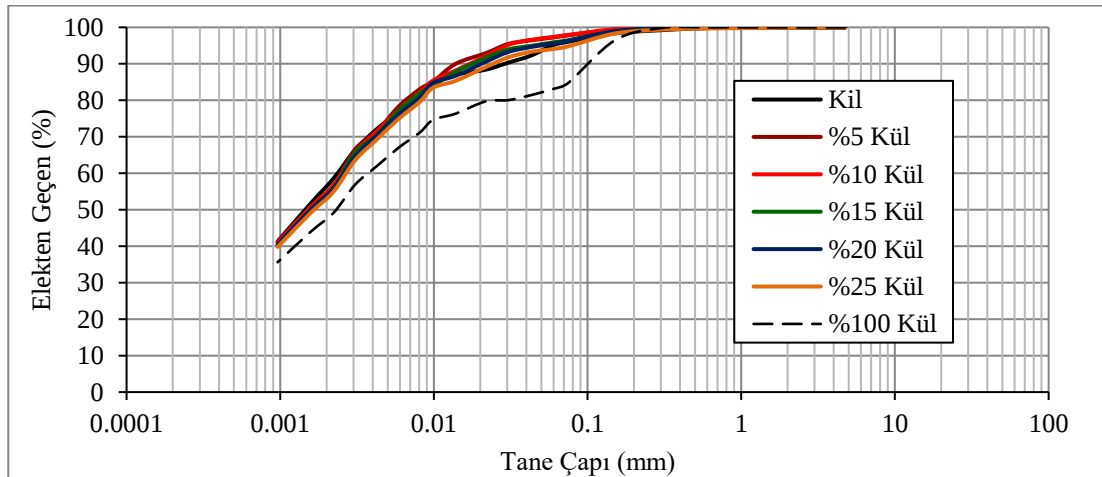
BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmalarda belirtilen ve ilgili standartlara uygun şekilde yapılan deneylerin bulguları aşağıda verilmiştir.

3.1 Dane Boyu Analiz Sonuçları

Elek analizi ve hidrometre deneyinden elde edilen sonuçlardan faydalanarak kil ile kil-uçucu kül karışımlarının gronülometrik eğrileri oluşturulmuştur (Şekil 3.1). Deney sonuçlarına bakıldığında zemin numuneleri yaklaşık %57 kil ve %40 silt oranlarından oluşmaktadır. Zemin numunelerinin içeriğindeki kil oranının fazla olması sebebiyle numunenin kil tarafından kontrol edildiği tespit edilmiştir.

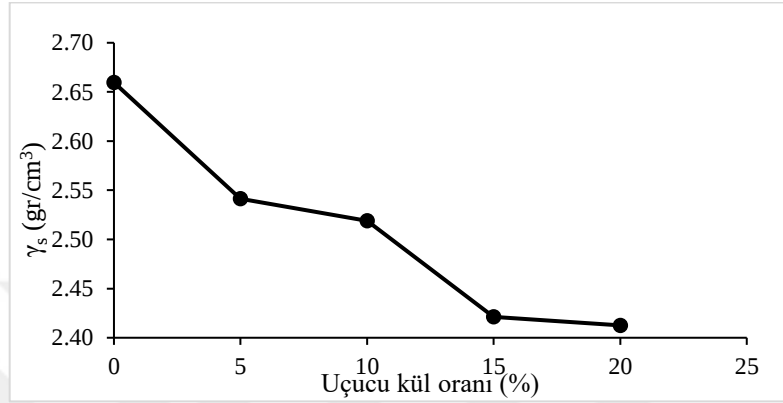
Yapılan elek analizi deneyi sonucunda gronülometre eğrisinden danelerin çapları belirlenmiştir (Şekil 3.1). Kürde bekletilmeden kuru numuneler üzerinde yapılan elek analizi sonuçlarına göre uçucu kül, kil ve karışımların da en büyük tane çapı 0,3 mm'den küçük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kil ve uçucu kül katkılı karışım numunelerin 200 numaralı elekten geçen miktarı %95 civarında iken uçucu külde bu değer %85 olarak tespit edilmiştir. Hidrometre deney sonuçlarında katkısız kil numunelerinden 0,002 mm'den küçük tane %57 olarak bulunmuştur. Uçucu kül katkısının artmasıyla bu oran giderek azalmış ve %25 uçucu kül katkılı numunede %47 değerine ulaşmıştır.



Şekil 3.1: Elek analizinde hazırlanan numunelere ait tane dağılımı eğrileri.

3.2 Piknometre Deney Sonuçları

Piknometre deneyi elde edilen sonuçlardan faydalanan Bartın Kutlubey Kampüsü kil zemin ve kil numuneye ağırlığınca eklenen ÇATES uçucu kül katkıli karışım numunelerinin uçucu kül oranları - dane birim hacim ağırlığı grafiği oluşturulmuştur (Şekil 3.2).



Şekil 3.2: Uçucu kül oranı-dane birim hacim ağırlığı grafiği.

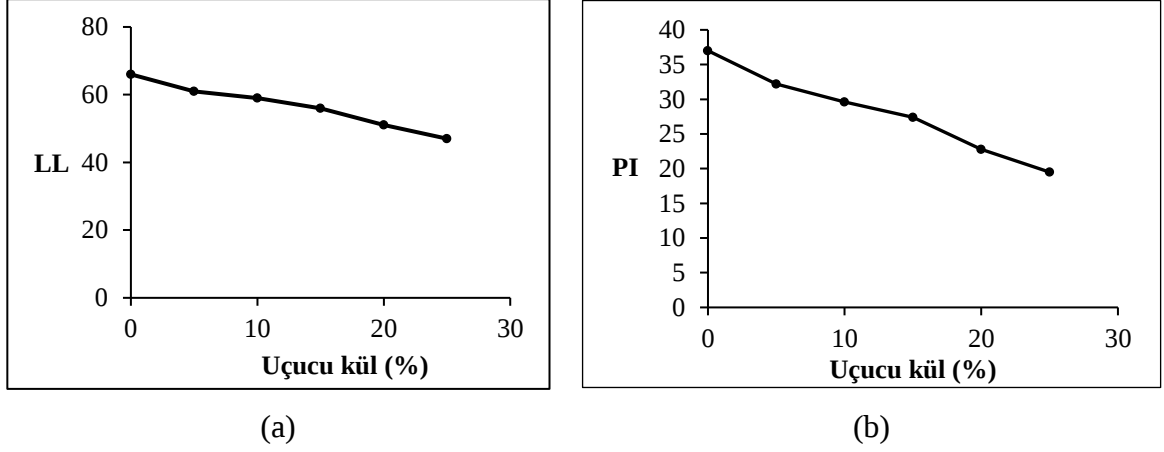
Yapılan deneyler sonucunda Bartın Üniversitesi Kutlubey Kampüsü kil numunesine Çatalağzı Termik Santrali uçucu kül eklenerek hazırlanan karışım numunelerin de uçucu kül oranının artması ile dane birim hacim ağırlığı azalmıştır.

3.3 Kıvam Limitleri Deney Sonuçları

Bartın Kutlubey Kampüs bölgesine ait killere ağırlıkça %5, % 10, %15, %20, %25 oranlarda Çatalağzı Termik Santrali'ne ait uçucu kül katılarak deney örnekleri hazırlanarak Atterberg limitleri deney sonuçları Tablo 3.1'de verilmiştir. Ayrıca uçucu kül oranının likit limit ve Plastisite indisi değerlerine etkisi Şekil 3.3'te gösterilmiştir.

Tablo 3.1: Karışım numunelerinin Plastisite indisi sonuç tablosu.

Uçucu kül oranı (%)	LL	PL	PI
0	66	29	37
5	61	29	32
10	59	29	30
15	56	29	27
20	51	29	22
25	47	28	19



Şekil 3.3: Uçucu kül oranının (a), likit limit ve (b), plastisite indisi değerlerine etkisi.

Yapılan çalışma sonucunda, kil numunenin ağırlığınca eklenen uçucu kül oranının artması likit limit değerlerinin düşmesine neden olmuştur. Likit limit değeri katkısız kil numune de 66 iken, %25 uçucu kül katkılı kil numune de 47'e gerilemiştir. Killi zeminlerde uçucu kül eklenmesi plastik limit değerlerinde önemli bir değişime neden olmadığı gözlemlenmiştir. Likit limit ile plastik limit farkı olan plastisite indisi (PI) uçucu kül oranının artmasıyla düşüş göstermiştir.

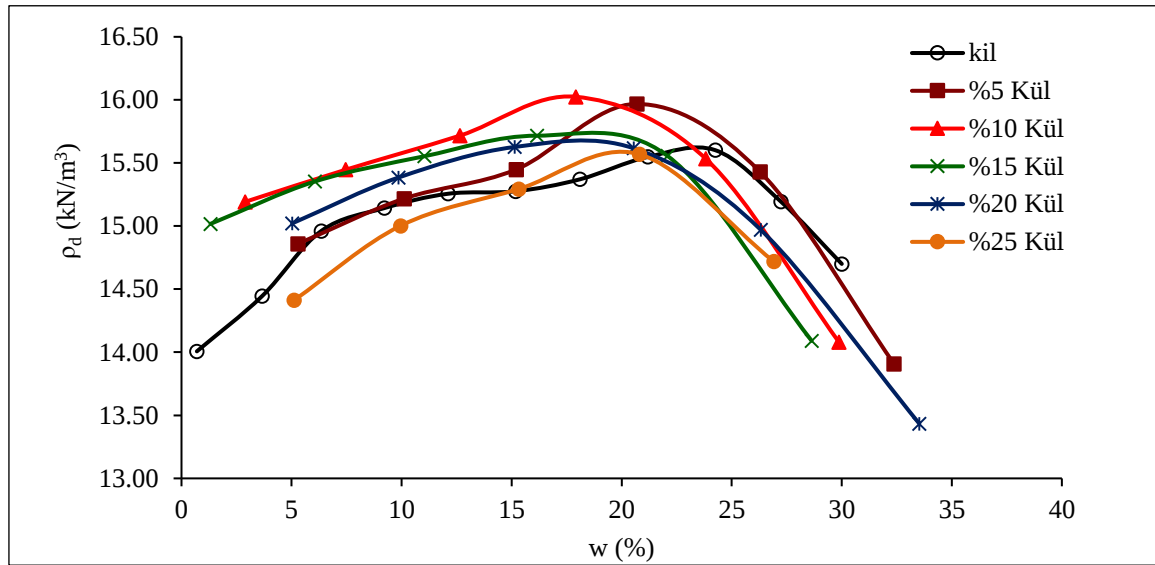
Plastisite indisi değeri kil zemin numunesinde 37 iken, %25 uçucu kül katkılı kil numune de 19'e gerilemiştir. %5, %10, %15 ve %20 uçucu kül oranlarında ise sırasıyla 32, 30, 27 ve 22 değerlerindedir.

Yapılan elek analizi ve kıvam limitleri deneylerinden elde edilen sonuçlarından katkısız kil ile kil zemine ağırlığınca %5, %10, %15 ve %20 uçucu kül katkılı karışım numuleri Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre yüksek plastisiteli kil (CH), %25 uçucu kül katkılı karışım numunenin düşük plastisiteli kil-silt (CL-ML) zemin grubuna girdiği belirlenmiştir.

3.5. Standart Proktor Deney Sonuçları

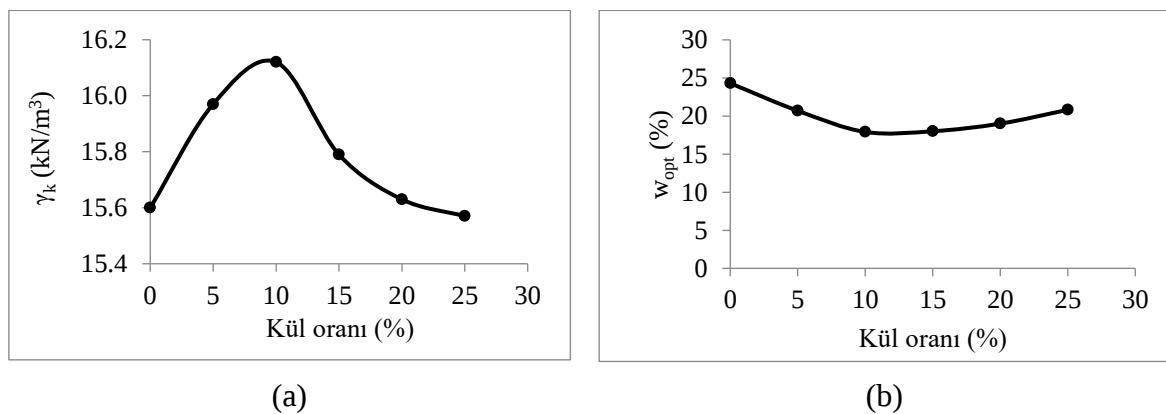
Deneyisel çalışmanın ilerleyen aşamalarında, Bartın Üniversitesi Kutlubey Kampüsü killeri ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında Çatalağzı Termik Santrali'ne ait atık uçucu kül katılarak elde edilen karışım numunelerinin Standart Proktor Deneyi ile

optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri verilmiştir ve deney sonuçları toplu olarak Şekil 3.4’te gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Standart Proktor deney sonuç grafiği.

Yapılan Standart Proktor Deneyi sonucunda, kil zemin örneğine ait maksimum kuru birim hacim ağırlık (Şekil 3.5a) ve optimum su muhtevası (Şekil 3.5b) parametreleri sırasıyla 15.6 kN/m³ ve %24.3 olarak bulunmuştur. Killi zemine ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında uçucu kül katılarak elde edilen karışımlara ait maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla 16.0 kN/m³, 16.1 kN/m³, 15.8 kN/m³, 15.6 kN/m³ ve 15.6 kN/m³ şeklinde bulunmuştur. Bu karışımlara ait optimum su muhtevaları sırasıyla %20.69, %17.91, %18.0, %19.00 ve %20.81 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.5: Kullanılan numunelerin uçucu kül oranına bağlı olarak (a), Maksimum kuru birim hacim ağırlık (b), Optimum su muhtevası değişimi.

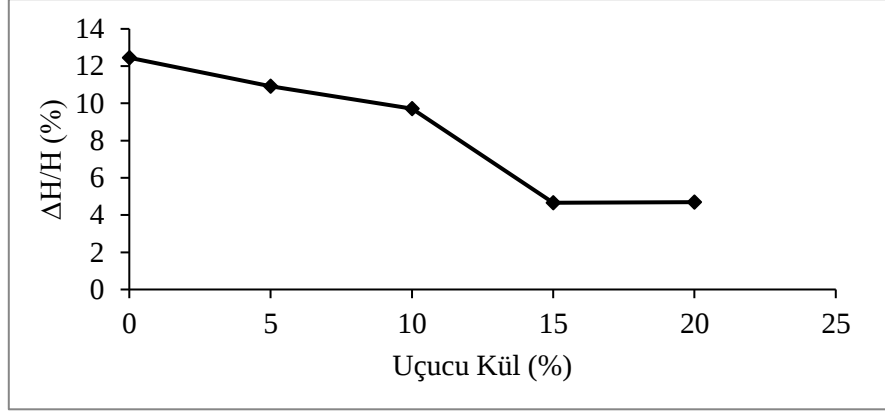
Kutlubey Kampüsü kil numunesine ağırlığının %10 oranında eklenen ÇATES uçucu kül katkılı karışım numunesine yapılan Standart Proktor Deneyi sonucunda en yüksek maksimum kuru birim hacim ağırlığı olan 16.1 kN/m^3 değeri saptanmıştır.

Uçucu kül oranı - maksimum kuru birim hacim ağırlık ilişkisi incelendiğinde (Şekil 3.5a), killi zemine %10'a kadar katılan uçucu kül oranı artmasıyla maksimum kuru birim hacim ağırlığı giderek arttığı optimum su muhtevasının ise azaldığı görülmektedir. %10'dan daha büyük uçucu kül oranlarında ise artan uçucu kül oranı maksimum kuru birim hacim ağırlığının azalmasına, optimum su muhtevasının artışına neden olmuştur. Artan uçucu kül miktarına bağlı maksimum kuru birim hacim ağırlığı değerlerindeki görülen bu azalma daha yüksek uçucu kül oranlarında karışımın geoteknik özelliklerinde olumlu bir etkisi olmayacağı değerlendirilmiştir. Bu nedenden dolayı konsolidasyon, CBR ve tek eksenli basınç deneyleri ağırlıkça %25 uçucu kül karışımı üzerinde yapılmamıştır.

3.6. Konsolidasyon Deneyi Sonuçları

Standart Proktor deneyinden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevasında hazırlanan kil ve kil-uçucu kül karışım numuneleri üzerinde konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Numunelere yük uygulamadan önce konsolidasyon hücresi suyla doldurulmuş ve 24 saat boyunca serbest şişmeleri kontrol edilmiştir. Zemin karışımlarda artan uçucu kül oranlarıyla serbest şişme potansiyelinde Şekil 3.6'da görüldüğü gibi azalma eğilimini göstermiştir. Şekil 3.6 incelendiğinde katkısız kil numunesinde serbest şişme %12.45 iken bu değer artan uçucu kül oranı ile giderek düştüğü ve %15 ile %20 uçucu kül oranındaki numunelerde %4.7 mertebesine kadar gerilediği görülmektedir.

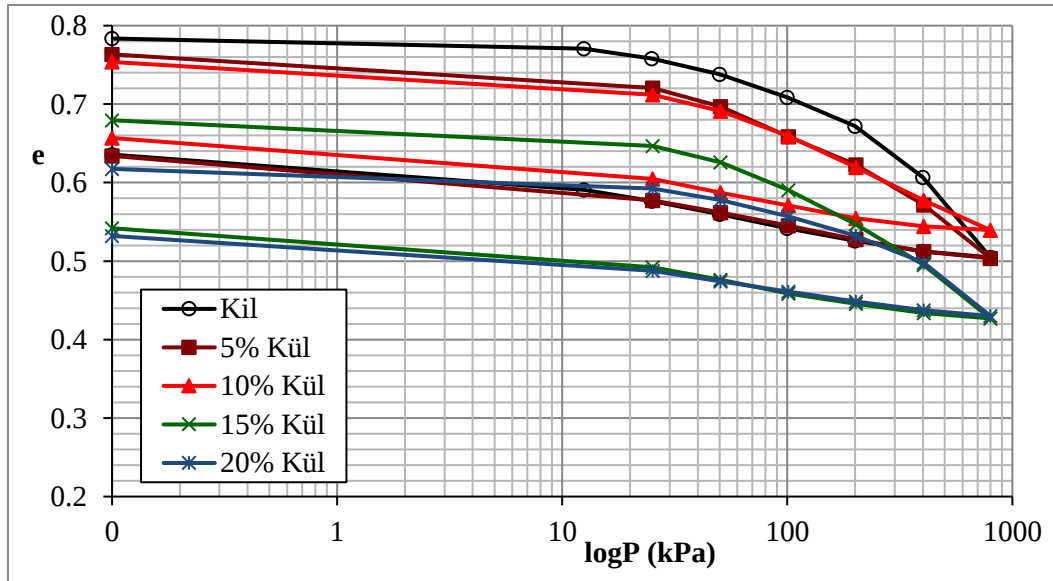
Deneyin bir sonraki aşamasında sırayla 0, 25, 50, 100, 200, 400 ve 800 kPa yük uygulanmış ve her yük kademesi için 24 saat boyunca numune yükseklik değişimi takip edilmiştir. Son yük aşaması sonunda yükler boşaltılarak numunelerde şişme değerleri okunmuştur.



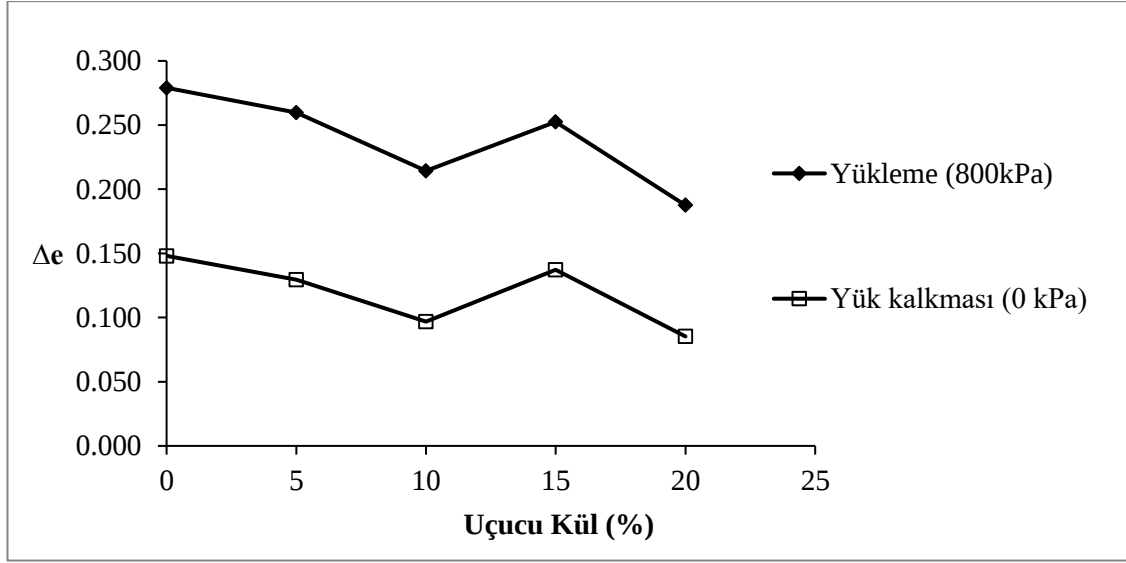
Şekil 3.6: Numunelerin uçucu kül oranı – şişme ilişkisi.

Konsolidasyon deneyinde numune üzerine 800 kPa'a kadar kademeli olarak yük uygulanmış ve yüklemenin kaldırılmasıyla boşluk oranı değişiminin (Δe) uçucu kül oranı ile değiştiği belirlenmiştir (Şekil 3.7). %10 ile %20'lik uçucu kül karışım numunelerinde hem yükleme sırasında hem de yükün kalkmasıyla diğer karışımlara göre daha küçük boşluk oranı değişimi görülmektedir. Bu değişim daha iyi anlaşabilmesi için uçucu kül oranına bağlı boşluk oranı değişimi Şekil 3.8'de verilmiştir.

Deney sonucunda oluşturulan grafikten anlaşılacağı üzere Bartın Kutlubey Kampüsü killi zeminine ağırlığınca %10 ÇATES uçucu kül katılmasıyla, uygulanan statik yükler altında hacim değişimi %30 kadar azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.7: Konsolidasyon deney sonuçları.

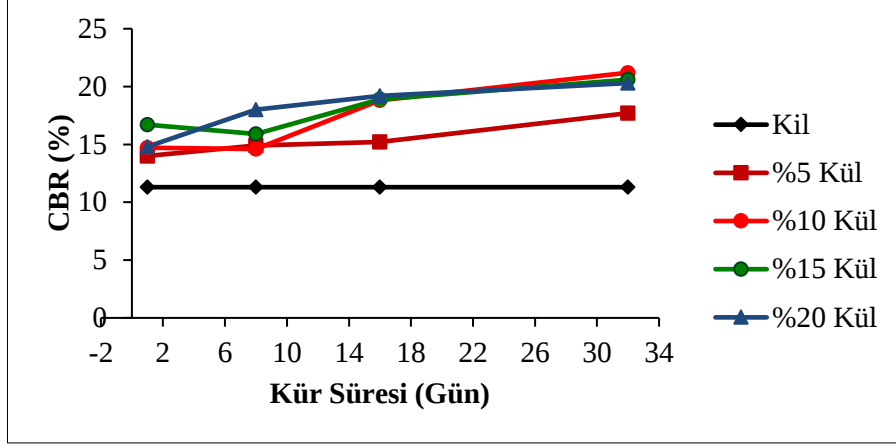


Şekil 3.8: Konsolidasyon deney sonuçlarına göre uçucu kül oranına bağlı boşluk oranı değişimi.

3.7. CBR Deney Sonuçları

Kutlubey Kampüsü killeri ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarda ÇATES uçucu kül katılarak elde edilen karışımlar, optimum su muhtevalarında CBR deneyi yapmak üzere kalıplarda sıkıştırılmış ve rutubetli ortamda kür edilmiştir. CBR deneyleri 1, 8, 16 ve 32 gün kür edilen numuneler üzerinde ASTM D1883 standartlarına uygun yapılmıştır.

Elde edilen deney sonuçlarından, her karışımın CBR değeri katkısız kil numunelerine oranla daha yüksek değer verdiği belirlenmiş olup elde edilen bu değerler kür süresinin artmasıyla yükselme eğilimi göstermiştir. Uçucu kül katkılı karışım numunelerinin CBR değerleri kür sürelerinin artması ile sürekli artış göstermiş ve katkısız kil numune değerlerinden oldukça yüksek değerlere ulaşmıştır. Genel olarak, katkısız kil numunelerine kıyasla 32 gün kür edilmiş %10-20 arası uçucu kül ilavesi ile elde edilen karışımların CBR değerlerinde iki kat bir artış söz konusudur. Deneysel olarak CBR değerlerindeki en iyi performans %21.2 değeri ile 32 günlük kür edilmiş %10 uçucu kül katkılı karışım numunesi için elde edilmiştir (Şekil 3.9).



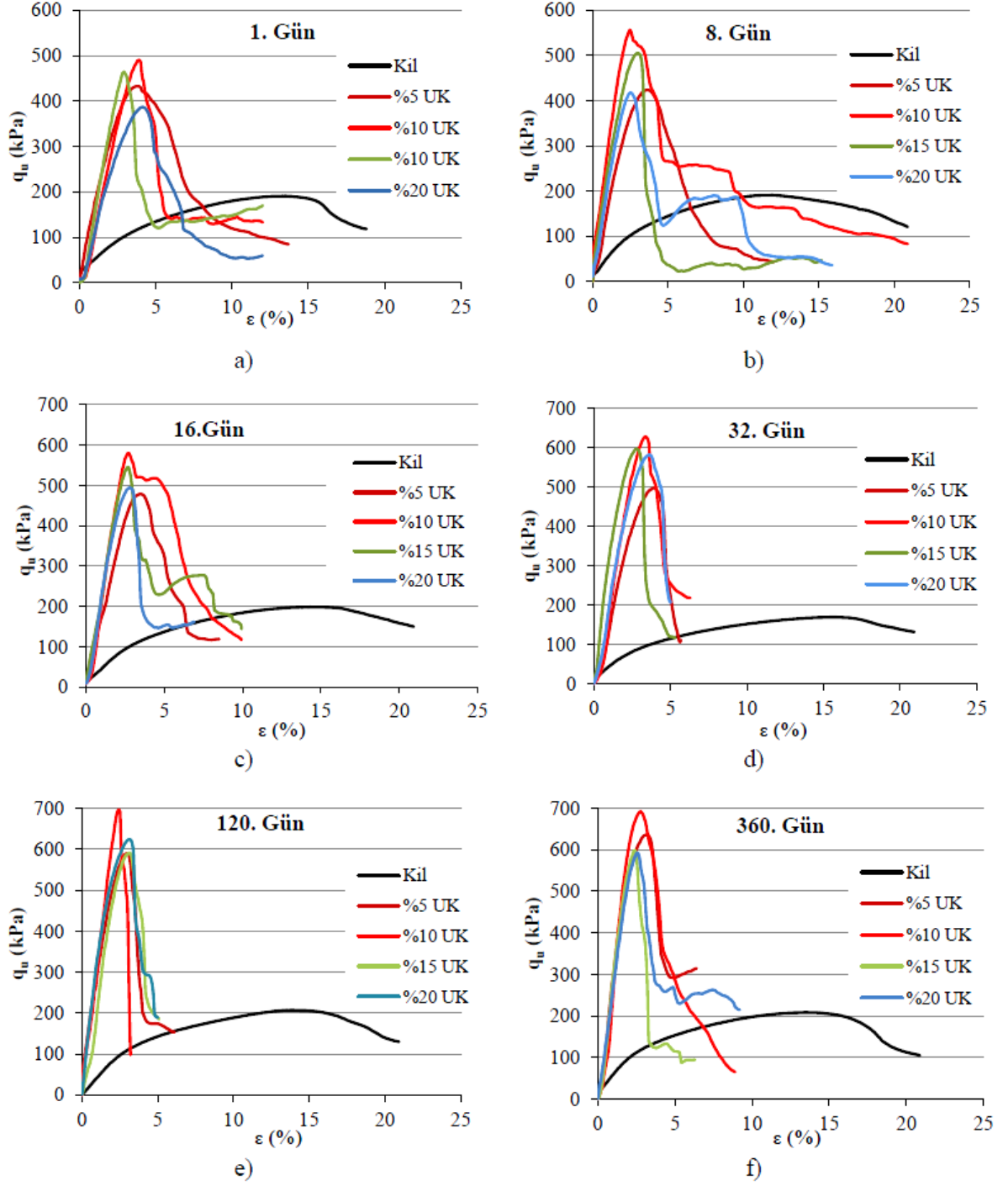
Şekil 3.9: CBR deneyi sonuçları.

3.8. Serbest Basınç Deney Sonuçları

Optimum su muhtevalarında sıkıştırılarak katkısız killi zemin ile kil zemine ağırlığınca %5, %10, %15 ve %20 oranlarında uçucu kül katılarak hazırlanan numuneler 1, 8, 16, 32, 120 ve 360 gün kür edildikten sonra serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Serbest basınç deneyi esnasında numunelerde genel olarak rijit yenilmeler meydana gelmiştir. Şekil 3.10'da gözlemlendiği üzere yenilme düzlemleri belirgin bir şekilde görülmektedir. Katkısız kil ile kil-üçucu kül karışımlarının birer numunesine ait tek eksenli basınç dayanımı - kür süresi grafiği Şekil 3.11'de verilmiştir. Bu şekil incelendiğinde katkısız kil numunelerde yenilmeler %12-14, kil-üçucu kül karışım numunelerinde ise yenilmeler %3-4 deformasyonlarda gerçekleştiği görülmektedir.



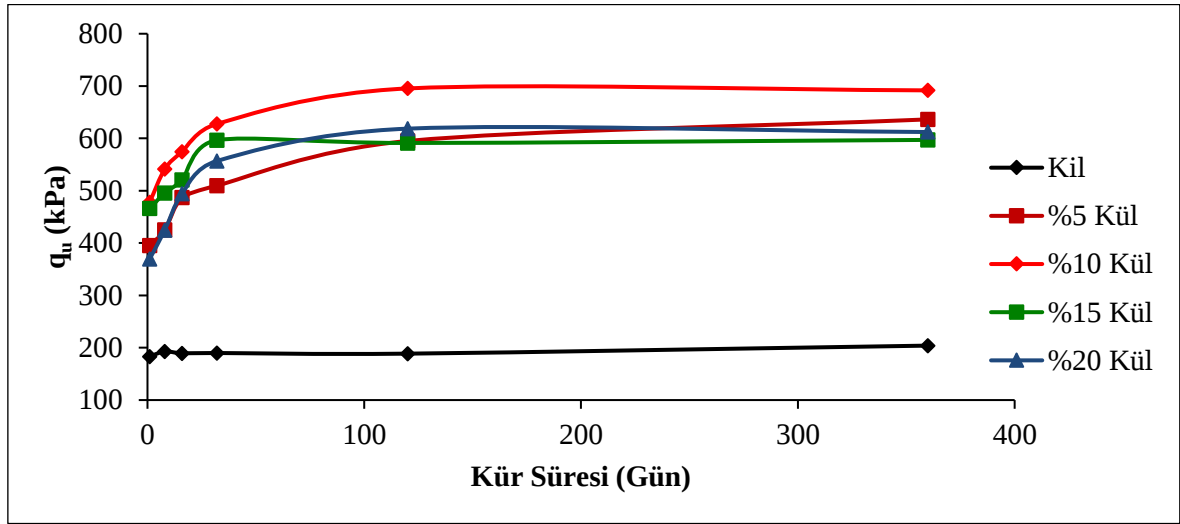
Şekil 3.10: Numunelerde gözlenen yenilme düzlemleri.



Şekil 3.11: Kür sürelerine bağlı serbest basınç deneyinde elde edilen şekil değiştirme – aksenal gerilme eğrileri (UK: uçucu kül, q_u : basınç dayanımı, ϵ : birim şekil değiştirme).

Uçucu kül oranlarına göre kür süresine bağlı ortalama serbest basınç dayanım değişimi toplu olarak Şekil 3.12’de sunulmuştur. Katkısız kil numunelerinin kür süresine göre, serbest basınç dayanımı 183.33 kPa ile 204.06 kPa arasında değişmekte olup ortalama değeri 191.38 kPa olarak belirlenmiştir.

Karışım içerisindeki uçucu kül oranlarına göre kür sürelerine bağlı olarak serbest basınç dayanım değerlerinde meydana gelen değişimlerin verildiği Şekil 3.12 incelendiğinde serbest basınç dayanımı tüm karışımlarda 120 gün kür süresine kadar arttığı, 120 gün sonra ise serbest basınç dayanımında kayda değer bir artış olmadığı gözlemlenmiştir. Serbest basınç deneyi sonunda her numunenin su muhtevası belirlenmiş ve kür süresi boyunca hiç bir numunede önemli miktarda su içeriğinde bir değişiklik tespit edilmemiştir. Serbest basınç dayanımı değerlerdeki görülen artışlar numunelerdeki su muhtevasında azalmasından kaynaklanmadığı söylenebilir. Katkısız killi zeminin, Şekil 3.12’de görüldüğü gibi kür süresine bağlı olarak serbest basınç dayanımı eğrisi yatay seyir göstermesi bunu desteklemektedir.



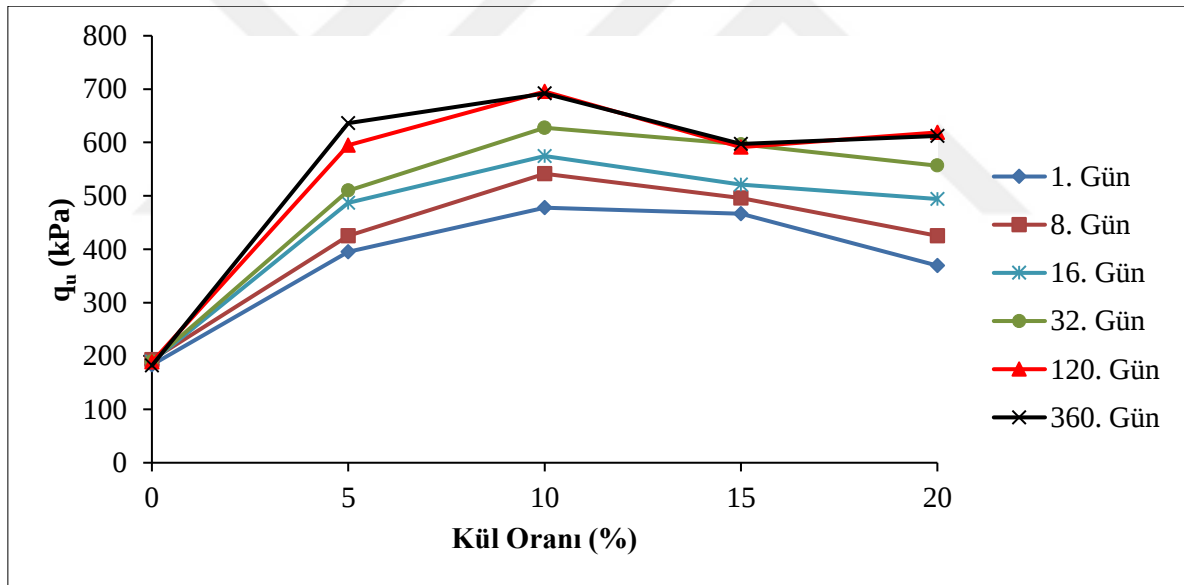
Şekil 3.12: Kür süresine bağlı serbest basınç dayanımındaki değişim (q_u : basınç dayanımı).

Serbest basınç deney sonucunda Şekil 3.12’de görüldüğü üzere kil numunesinin basınç dayanımı değeri, kil-uçucu kül karışım numunelerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında oldukça düşük olup ortalama 191 kPa olarak belirlenmiştir. Ayrıca deney karışım numunelerinin basınç değerleri kür süresine bağlı olarak her zaman artış göstermiştir.

Kür süresine bağlı serbest basınç dayanımı gösteren Şekil 3.12 incelendiğinde, tüm karışım numunelerinin serbest basınç dayanımı katkısız kil numunelerinin serbest basınç dayanımından 1.gün kür süresi dâhil olmak üzere oldukça yüksek değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. 120 günlük kur süreleri sonunda %5, %15 ve %20 uçucu kül katkılı numunelerin serbest basınç dayanımları birbirlerine yakın değerler aldığı gözlemlenmiştir.

Kutlubey Kampüs bölgesi killere %10 oranında uçucu kül eklenerek hazırlanan numunenin 120 günlük kur süresi sonundaki serbest basınç dayanımı 695.5 kPa değerine ulaşmış ve diğer deney numunelerinin serbest basınç dayanımından daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu değer katkısız killi zeminin serbest basınç dayanımı ile kıyaslandığında serbest basınç dayanımında 3.7 kat bir artış söz konusu olduğu görülmektedir.

ÇATES uçucu kül katkısı kili zeminlerin serbest basınç dayanımına etkisi bakıldığında Şekil 3.13'ten görüldüğü gibi, tüm kür süreleri için uçucu kül %10'a kadar katılmasıyla serbest basınç dayanımının artmasına neden olmuş, daha fazla kül oranı ise serbest basınç dayanımının azalmasına neden olmuştur. %10'dan yüksek oranlarda uçucu kül katılarak serbest basınç dayanımındaki görülen bu azalma uçucu kül oranı artmasına bağlı olarak uçucu kül özellikleri de kendini göstermeye başladığından kaynaklandığını düşünülmektedir.



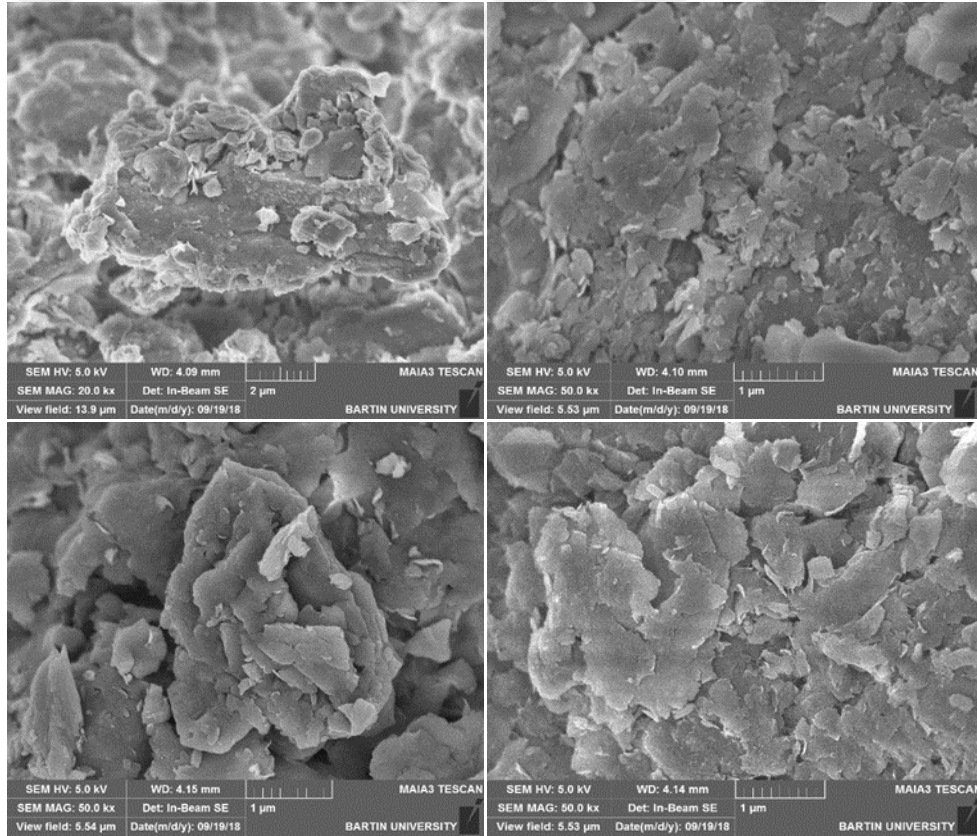
Şekil 3.13: Uçucu kül oranı – basınç dayanımı grafiği.

Literatürde konu ile ilgili yapılan birçok çalışmada farklı zeminlere katılan uçucu kül oranının artmasıyla zemin iyileşmede daha etkili sonuçlar alındığı belirtilmiştir (Chu ve Kao (1993); İnan vd., (2005); Aytekin (2009); Ünver (2015)). Ancak bu çalışmada zeminin geoteknik özelliklerinin iyileşmesi bakımından en iyi sonuçlar %10 oranında uçucu kül katılmasıyla elde edilmiştir. %10'dan sonra uçucu kül oranının artışının zemin dayanımının azalmasına neden olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, taşıma gücü zayıf kil zemin üzerinde Soma termik santralinden elde edilen uçucu külün etkilerini inceleyen Çokça

(2001), kil zemine eklenen uçucu kül miktarının %7'ye geldikçe numunenin serbest basınç dayanımının arttığını, oranın daha fazla artmasıyla karışım numunelerinin serbest basınç dayanımında azalmanın olduğu sonucuna varmıştır.

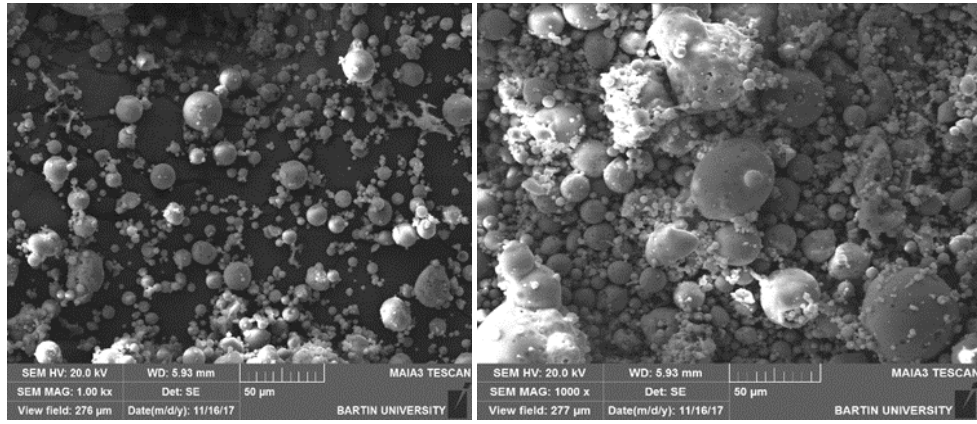
3.9. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) sonuçları

Deneylerde kullanılan Kutlubey Kampüsü kil zeminin SEM görüntüsü incelendiğinde kil tanelerinin tabakalı bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3.14). SEM analizinde kil taneleri pul şeklinde kat kat tabakalı bir yapıya sahiptirler. Kil minerallerini 1µm'den küçük farklı ebatlardaki mineraller birleşerek 2.5 µm boyutlarına kadar ulaştığı gözlemlenmiştir.



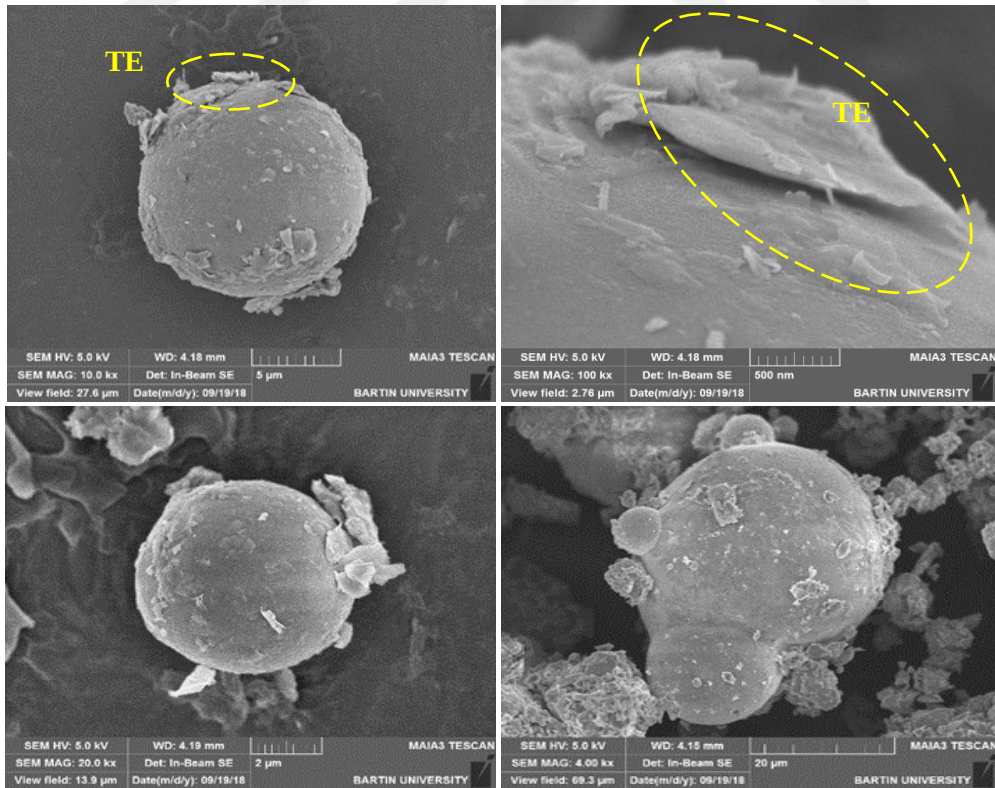
Şekil 3.14: Kil numunesinin SEM görüntüsü.

Zonguldak Çatalağzı Termik Santrali F sınıfı uçucu külünün SEM görüntüsü incelendiğinde ise minerallerin çoğunluğu tam küresel tanecikler olmakla birlikte yarı-köşeli taneciklerde içerisinde bulundurmaktadır. Tam küresel taneciklerin yüzeyinde kısmen birikintiler oluşturduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3.15).

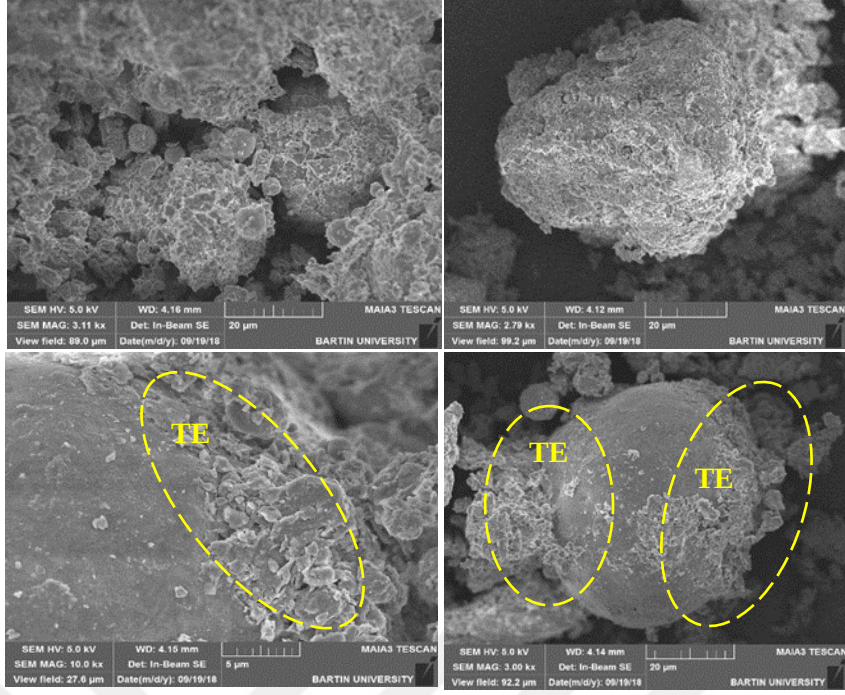


Şekil 3.15: Uçucu kül numunesinin SEM görüntüsü.

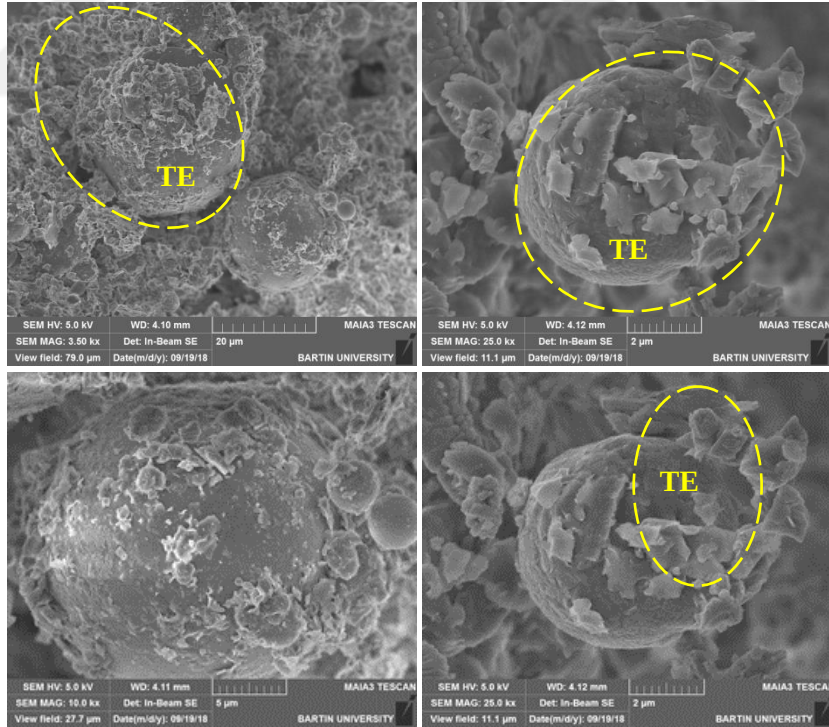
Kutlubey Kampüsü ait killere sırasıyla ağırlıkça %5, %10, %15, %20 oranlarda Çatalağzı Termik Santrali'ne ait F sınıfı uçucu kül katılarak oluşturulan deney örneklerinde kil ile uçucu kül taneleri arasında meydana gelen etkileşimi Şekil 3.16, 3.17, 3.18 ve 3.19'da sunulan Taramalı Elektron mikroskop görüntüleri üzerinde görülmektedir.



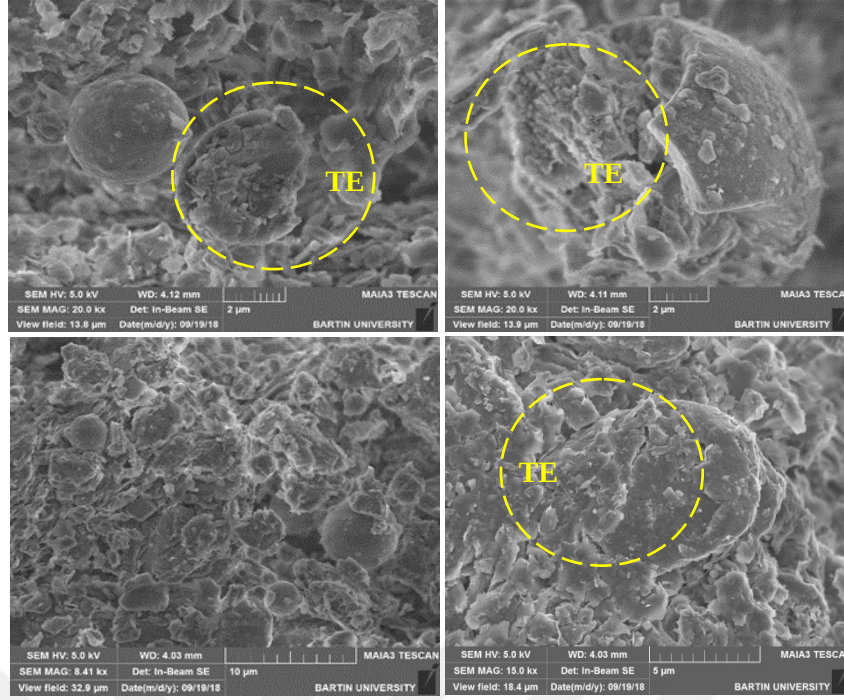
Şekil 3.16: %5 uçucu kül katkılı kil numunesinin SEM görüntüsü. (TE- taneler arası etkileşim).



Şekil 3.17: %10 uçucu kül katkılı kil numunesinin SEM görüntüsü. (TE- taneler arası etkileşim).



Şekil 3.18: %15 uçucu kül katkılı kil numunesinin SEM görüntüsü. (TE- taneler arası etkileşim).



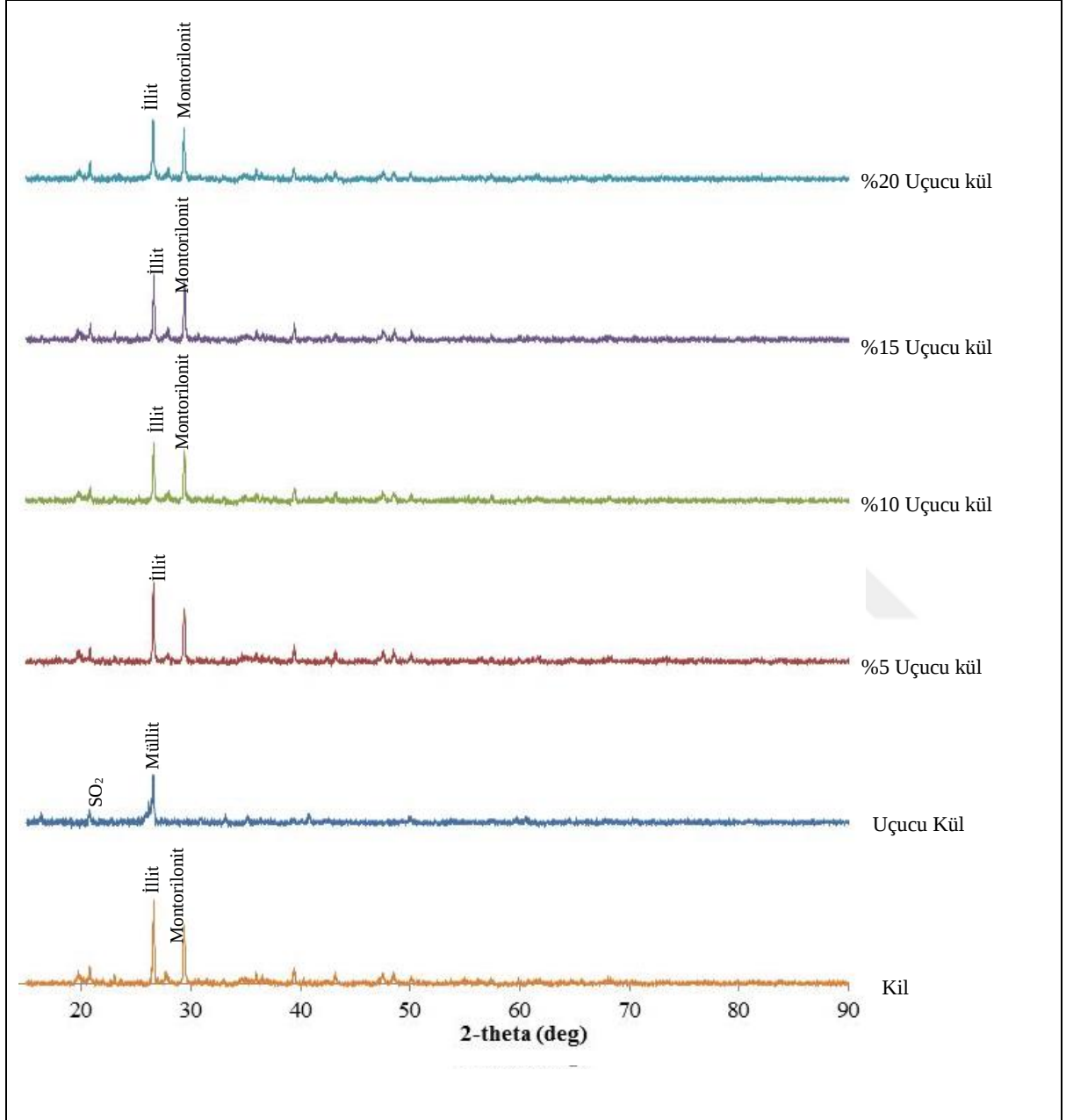
Şekil 3.19: Kil numunesinin (%20 uçucu kül katkılı) SEM görüntüsü. (TE- taneler arası etkileşim).

Yapılan SEM görüntüsü sonuçlarında, uçucu kül oranının artması ile kil numunelerinin taneler arası etkileşim oranı artmaktadır. Tanelerin yüzeyinde meydana gelen bu etkileşim sonucunda zeminde sertleşmenin olduğu ve deney numunelerinin, kür oranına bağlı olarak uçucu kül katkısının kil zemin tanelerinin yüzeylerine tutunma oranının artmasıyla kil zeminin geoteknik özelliklerinde pozitif değişimlere neden olduğu gözlemlenmiştir.

3.10 X Işınımı Deneyi (XRD)

Yapılan deneysel sonuçları neticesinde Kutlubey Kampüsüne ait killerin şişme potansiyeli, CBR ile serbest basınç dayanımı değerlerinin iyileştirilmesinde en etkili sonuçlar ağırlıkça %10 uçucu kül katılmasıyla elde edilmektedir. Bu iyileştirme iki nedene bağlanabilir. Nedenlerden birincisi maksimum kuru birim hacim ağırlığının en yüksek değeri %10 uçucu kül karışımında olmasıdır. Doğal zeminlerinin yoğunluğu zamana bağlı olmadığından geoteknik parametrelerdeki bu iyileşme sadece uçucu kül oranı ile ilişkilidir. İkinci nedeni ise kil-uçucu küllü karışımlarda mukavemet artışı SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Ca(OH)_2 ve Fe_2O_3 bileşiklerince oluşturulan silikat ve alüminat jelleri gösterdikleri puzolanik etkileridir. Karışımlara ait X Işını Kırınım analizi (Şekil 3.20) değerlendirildiğinde ana bileşenleri SO_2 ile Al_2O_3 olan ve Bartın kili oluşturan İllit ve

Montmorilonit minerallerin miktarının 120 gün kür süresi sonunda %10 uçucu kül katkı numunede en az şiddet değerini aldığı tespit edilmiştir. İllit ve montmorilonit minerallerinin miktarında gözlenen azalmaların kil-uçucu kül karışımlarında mukavemet artışına neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.20: X-ışını kırınım yöntemi (XRD) analiz sonuçları.

BÖLÜM 4

SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu tez çalışmasında, Zonguldak Çatalağzı Termik Santral İşletmesinden alınan atık malzeme uçucu küllerin, Bartın Üniversitesi Kutlubey Kampüsü Bölgesi killi zeminine eklenerek geoteknik özelliklerine etkisi araştırmak amacıyla yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Deney çalışmalarında kullanılan killi zemin oturma potansiyeli yüksek ve taşıma gücü düşük olarak tanımlamak mümkündür. Yapılan birçok araştırmada da olduğu gibi bu tür yumuşak ve taşıma gücü zayıf olan zeminlere katkı malzemesi eklenerek mukavemet, yük altında şekil değiştirme vb. özelliklerinin iyileştirilmesi incelenmiştir. Bununla birlikte kullanılacak olan katkı malzemelerinin seçimine ise büyük bir özen gösterilmiştir.

Yapılan bu tez çalışmasında da kullanılan katkı malzemesi atık malzeme olan uçucu küldür. Uçucu kül santrallerde atık olarak oluşan ve santralden taşınarak sahalarda depolanarak çevre kirliliğinin artmasına sebebiyet veren bir malzemedir. Depolanmayı, taşıma masraflarını ve zamandan tasarruf edilmesi amacıyla zemin stabilizasyonunda kullanılan ve etkili olan bir malzemedir.

Bartın ili ve çevresinde, zemin yapısı nedeniyle yol yapım, altyapı ve dolgu çalışmalarında heyelan, toprak kayma vb. durumların oluşması oldukça yüksektir. Bu yüzden çalışmalarımızda Bartın Üniversitesi Kutlubey Kampüsü kil zemini kullanılmıştır. Zeminin geoteknik özelliklerinin incelenmesi için atık malzeme olarak coğrafi konumunun yakınlığı, malzeme taşıma kolaylığı, zamandan ve maliyetten tasarruf sağlanması amacıyla Çatalağzı Termik Santralinde meydana gelen uçucu kül kullanılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmaları ilk aşamada Bartın ili Kutlubey Kampüsü bölgesi killerine ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %25 oranında Zonguldak Çatalağzı Termik Santral İşletmesinden alınan uçucu kül katılarak karışımların dane boyu analizi, kıvam

limitleri ve Standart Proktor deneyleri yapılmıştır. Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemine göre katkısız kil ile %5, %10, %15 ve %20 uçucu kül katkılı karışım numuneleri yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfına girerken %25 uçucu kül katkılı karışım numunesi düşük plastisiteli kil-silt (CL-ML) zemin sınıfına girmektedir. Karışım numuneleri içerisindeki uçucu kül oranındaki artış likit limit ile plastisite indisi değerlerinde düşüş meydana getirmiştir. Katkısız killi zemine %10'a kadar uçucu kül eklenmesiyle serbest basınç maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin arttığı, bu değerden sonra uçucu külün artması ile maksimum kuru birim hacim ağırlığının giderek düştüğü görülmüştür. Katkısız kil zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlık 15.6 kN/m^3 iken %10 oranında uçucu kül ilave edilen karışımın maksimum kuru birim hacim ağırlık 16.1 kN/m^3 değerine ulaşmıştır. Yüksek oranlarda uçucu kül katkılı karışımlarda kuru birim hacim ağırlığındaki düşüş geoteknik özellikleri olumlu yönde etkilemeyeceğini düşünülerek ilerideki deneysel çalışmalarında %25 uçucu kül katkılı karışımlar kullanılmamıştır.

Kutlubey Kampüsü bölgesine ait killere ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ÇATES uçucu kül katılarak karışımlar hazırlanmış, tüm deney numuneleri optimum su muhtevasında sıkıştırılmıştır. Konsolidasyon deneyi kür edilmeden, CBR deneyi 1, 8, 16, 32 gün, serbest basınç deneyi ise 1, 8, 16, 32, 120 ve 360 gün kür edildikten sonra yapılmıştır.

Optimum su muhtevasında sıkıştırılmış kil numunesi ile kil-uçucu kül karışımlarından oluşturulan karışım numunelerinde beklendiği gibi, artan uçucu kül oranlarıyla serbest şişme potansiyelinde azalma eğilimini göstermiştir. Katkısız kil numunesinde serbest şişme %12.45 iken bu değer artan uçucu kül oranı ile giderek düştüğü ve %15 uçucu kül katkılı numunede %4.7 mertebesine kadar gerilediği görülmüştür. Bartın Kutlubey Kampüsü killi zeminlerine %10 uçucu kül katılmasıyla, uygulanan statik yükler altında hacim değişimi %30 kadar azaldığını konsolidasyon deneyi ile belirlenmiştir.

Kutlubey Kampüsü kil ve ÇATES uçucu kül katkılı karışım numuneleri optimum su muhtevalarında sıkıştırılarak hazırlanmış ve CBR deneyine tabi tutulmuştur. Uçucu kül katkılı her karışımın CBR değeri katkısız kil numunelerine oranla daha yüksek değer verdiği belirlenmiş olup elde edilen bu değerler kür süresinin artmasıyla yükselme

eğilimi göstermiştir. Deneysel olarak CBR değerlerindeki en iyi performans %21.2 ile 32 günlük kür edilmiş %10 uçucu kül katkılı karışım için elde edilmiştir.

Karışım içerisindeki uçucu kül oranlarına göre kür sürelerine bağlı olarak serbest basınç dayanımı tüm karışımlarda 120 gün kür süresine kadar arttığı, 120 gün sonra ise serbest basınç dayanımında kayda değer bir artış olmadığı gözlemlenmiştir. Serbest basınç deney sonucunda katkısız kil numunesinin serbest basınç dayanımı ortalama 191 kPa olarak bulunmuştur. Kutlubey Kampüsü bölgesi killerine %10 oranında uçucu kül eklenerek hazırlanan numunenin 120 günlük kür süresi sonundaki serbest basınç dayanımı 695.5 kPa değerine ulaşmış ve diğer deney numunelerinin serbest basınç dayanımından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Katkısız kil numunesine ait serbest basınç dayanımı ile en iyi performans gösteren %10 uçucu kül katkılı 120 gün kür edilmiş karışımın serbest basınç dayanımı kıyaslandığında serbest basınç dayanımında 3.7 kat bir artış olduğu görülmektedir.

Kil-uçucu kül karışımlarının serbest basınç dayanımı tüm kür süreleri için %0'dan %10'a kadar artmıştır. %10'dan sonraki katkılarda ise bu değer azaldığı görülmüştür. Uçucu kül oranının artmasına bağlı olarak serbest basınç dayanımının azalma nedeninin uçucu külün kendi özelliklerini göstermeye başladığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Literatürde yapılan çalışmalarda farklı zeminlere katılan uçucu kül oranının artmasıyla zemindeki iyileşmenin daha etkili sonuçlar verdiği belirtilmesine rağmen, bu çalışmada zeminin geoteknik özelliklerini iyileştirme bakımından en iyi sonuçlar %10 oranında uçucu kül katılmasıyla elde edilmiştir.

Yapılan deneysel sonuçları neticesinde Kutlubey Kampüsü bölgesine ait killerin şişme potansiyeli, CBR ile serbest basınç dayanımı değerlerinin iyileştirilmesinde en iyi sonuçlar ağırlıkça %10 uçucu kül katılmasıyla elde edilmiştir. Bu iyileştirmenin nedenlerden birincisi maksimum kuru birim hacim ağırlığının en yüksek değeri %10 uçucu kül karışımında olmasından kaynaklanmaktadır. İkinci neden ise Kutlubey Kampüsü bölgesi kilerinin uçucu kül ile etkileşime girmesi ve yapısında bulunan illit ve montmorilonit minerallerinin miktarında kür süresi ile gözlenen azalmalar,

dolayısıyla uçucu külün puzolanik özelliğini göstermesinden ileri geldiğini düşünölmektedir.

Yapılan bu tez çalışmasında Çatalağzı Termik Santrali uçucu külünün oturma potansiyeli yüksek Kutlubey Kampüsü kiline eklenerek oluşturulan karışım numunelerinin geoteknik özelliklerine pozitif yönde etkilemesi atık malzeme olan uçucu külün geri kazanılmaya elverişli bir malzeme olduğu sonucuna varmaktadır. Çatalağzı Termik Santrali'nde açığa çıkan uçucu kül miktarının artması ile uçucu külü sahalarda depolamak yerine yan ürün olarak değerlendirilebilirliğinin mümkün olduğu saptanmıştır. Çalışmada, uçucu küllerin zemin iyileştirme, dolgu, baraj ve diğör zemin yapılarında değerlendirilmesi, depolama problemlerinin ortadan kaldıracağı gibi çevresel sorunların bertaraf edilmesini sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Acosta, H.A., Edil, T.B. ve Benson, C.H. (2003). Soil stabilization and drying using fly ash, Geo Engineering Report No. 03-03, Geo Engineering Program, University of Wisconsin-Madison, USA.
- Aksoy, İ.H. (1992). Uçucu külün geoteknikte kullanımı. *ZMTM 4. Ulusal Kongresi*, İTÜ, İstanbul, s. 248-259.
- Aksoy, H.S., Yılmaz, M. ve Akarsu, E.E. (2008). Killi bir zeminin Tunçbilek uçucu külü kullanılarak stabilizasyonu. *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 6 (3): s. 89-91.
- Alataş, T. (1996). Afşin Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Yol Stabilizasyonunda Çeşitli Maddelerle Birlikte Kullanımı. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 146 s.
- Alkaya, D. (2002). Uçucu Kül Katkısının Dolgu Zeminlerin Stabilitesine Etkisi. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 203 s.
- Alkaya, D. (2009). Uçucu küllerin zemin iyileştirmesinde kullanılmasının incelenmesi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5, 1, 61-72.
- Anon. (1975). TSE Uçucu Küller Standardı. TSE 639, TSE 640.
- Anon. (1979). Türkiye uçucu küllerinin özellikleri ve kullanım özellikleri. E.İ.E Genel Yayın Direktörlüğü, Ankara.
- Atanur, A. (1971). Uçucu küllerin kimyasal ve fiziksel vasıfları ve yapı malzemesi olarak kullanılması, Bayındırlık Bakanlığı, KGM, Yayınları, Ankara, s. 219.
- Ateş, A., Totiç, E. ve Yeşil, B. (2015). Kutlubey Kampüs alanının (Bartın Üniversitesi) yerleşime uygunluk açısından değerlendirilmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3, 2015, 373-397.
- Aytekin, S. (2009). Uçucu Küllerin Killi Zeminlerin Islahında Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana, 82 s.
- Blissett, R.S. ve Rowson, N.A. (2012). A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. *Fuel*, 97 (1): 23.
- Bozkurt Y. ve Yılmaz A. (2010). Türkiye’de kentsel katı atık yönetimi uygulamaları ve Kütahya Katı Atık Birliği (KÜKAB) örneği. *Dumlupınar Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 15 (1): 11-28.
- Brooks, R.M. (2009). Soil stabilization with fly ash and rice husk ash. *Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 1 (3): 209-217.

- Chu, S.C. ve Kao, H. S. (1993). A study of engineering properties of a clay modified by fly ash and slag: Fly Ash for Soil Improvement, *Geotechnical Special Publication*, 36: 89-100.
- Çates. (2017). Zonguldak Çatalağzı Termik Santrali Uçucu Küllerinin Kimyasal Özellikleri. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Bağımsız Deney Laboratuvarları Test Raporu, Zonguldak.
- Çetin, A.Y. (2011). Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Alternatif Malzemeler İle Stabilizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 121 s.
- Çokça, E. (2001). Use of Class C Fly Ashes for the Stabilization of an Expansive Soil. *ASCE J. of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, 127 (7): 568-573.
- Das, A., Jayashree, Ch. Ve Viswanadham, B.V.S. (2009). Effect of randomly distributed geofibers on the piping behaciour of embankments constructed with fly ash as a fill material. *Geotextiles and Geomembranes*, 27 (5): 341-349.
- Ecoba, (2001). Information Bulletin, Italy.
- Gökçe, A. (1995). Farklı İnceliklerdeki Uçucu Küllerin Betondaki Performanslarının Karşılaştırılması. Yüksek Lisan Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 68 s.
- Günel, R.G. (1996). Uçucu Külün Zemin Stabilizasyonunda Kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 76 s.
- İmançlı G., (2002). Uçucu Küllerin Zemin Özellikleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, 162 s.
- İnan, G., Sezer, A., Ramyar, K. ve Yılmaz, R. (2005). Değişik uçucu küllerin yüksek plastisiteli kilin serbest basınç dayanımına etkisi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 20 (1): 20-24.
- Kızgut, S., Çuhadaroğlu, D. ve Çolak, K. (2001). Çatalağzı Termik Santrali uçucu küllerinden tuğla üretim olanaklarının araştırılması. *Türkiye 17. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi*, TUMAKS 2001, © 2001, ISBN 975-395-416-6.
- Kurama, H., Bilgiç, C. ve Kaya, M., (1999). Evaluation of Tunçbilek coal fired power plant flyash for industrial usage. *Journal of Ore Dressing*. 1 (2): s. 791-806.
- MTA, (2019). Maden Tetkik Arama ve Teknolojisi Dairesi Başkanlığı 19009367 Sayılı Analiz/Test Raporu, Maden Tetkik Arama, Ankara.
- Nicholson, P.O. ve Kashyap, V., (1993). Fly ash stabilization of Tropic Hawaiian soils, fly ash for soil improvement. *Geotechnical Special Publication*, 36: 15-30.

- O'Neil, M.W. ve Poormoayed, N. (1980). Methodology for foundations, on expansive, clays. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 106:1345-1367.
- Öz M.Y. (2015). Sıvılaşmaya Karşı Jet Grouting Yöntemi İle Örnek Bir İyileştirme Uygulamasının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, 19 s.
- Parker, D. G., Thorton, S. ve Cheng, C.W. (1977). Permability of fly ash stabilized soils. *Conference of The Geotechnical Engineering Division, ASCE Geotechnical Practise for Disposal of Solid Waste Materials*, Michigan, 63-70.
- Sharma, N.K., Swain, S.K. ve Sahoo U.C., (2012). Stabilization of a clayey soil with fly ash and lime a micro level investigation, *Journal of Geotechnical Geological Engineering*, 30 (5): 1197–1205.
- Tan, O. ve İyisan, R. (1996). Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi*, 24-2 Ekim 1996, İzmir, s. 417-426.
- Tokay, M. (1954/55) Filyos Çayı Ağzı-Amasra-Bartın-Kozcağız-Çaycuma bölgesinin jeolojisi. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 47: 58-73.
- Toros, H. (1987). Afşin Elbistan Termik Santrali Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi Olarak Kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 117 s.
- Tsonis, P., Christoulas, S. ve Kolias, S. (1983). Soil improvement with coal ash in road construction. *Proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 23-26 Mayıs 1983, Helsinki, s. 961-4.
- TÜİK (2008). Termik santraller Su, atıksu ve atık istatistikleri, 2012 <http://www.turkstat.gov.tr/HbPrint.do?id=16164> (01.01.2019)
- Türker, D. ve Çokca, E. (2006). *Effects of addition of fly ash on swell potential of an expansive Soil. in Expansive Soils-Recent Advances in Characterization and Treatment*. Edited by Al Rawas, A. A. and Goosen, M.F.A. Taylor and Francis Group, Balkema, London. s. 453-463
- Türkmenoğlu, M. (2010). Uçucu Küllerin Liç Karakteristiklerinin ve Çevreye Etkilerinin Araştırılması. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana, 161 s.
- Usmen, M., Bowders, I. ve Gidley I. (1987). Stabilized Fly Ash Use As Low- Permeability Barriers, *Geoehnicl Special Publication*, ASCE, Newyork. 13.
- Ünver, E. (2015). Problemlili Kil Zeminlerin Uçucu Kül İle İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, 137 s.
- Wasti, Y. (1990). Uçucu küllerin geoteknik özellikleri ve kullanım olanakları. *İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergisi*, 1 (4): 177-188.

Yılmaz I. ve Karacan E. (1998). Zeminlerin şişme özellikleri. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 52: 17-26.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Merve YAŞAR
Doğum Yeri ve Tarihi : Balıkesir ve 05.01.1992

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Bartın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği
Yüksek Lisans Öğrenimi : Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce
Bilimsel Faaliyet/Yayınlar : Yaşar, M. (2019). Uçucu kül katkısının kilin geoteknik özelliklerine etkisi. International congress on engineering and life science, 26-29 Nisan 2018, Kastamonu.
Aldığı Ödüller :

İş Deneyimi

Stajlar : Balıkesir Köse İnşaat Site Yapım İnşaatı / DSİ 25.Bölge Müdürlüğü Baraj Yapım İnşaatı
Projeler ve Kurs Belgeleri :
Çalıştığı Kurumlar : Bartın Kurucasıle Belediyesi / Kurucasıle Kaymakamlığı Köylere Hizmet Götürme Birliği- Birlik Müdür V.

İletişim

E-Posta Adresi : muh.mrvyasar@gmail.com

Tarih : 13/12/2019 (Tez Savunma Tarihi)

